



OPUR : Observatoire des Polluants Urbains en Île de France

Thème de recherche : 2

Action de recherche : 2.2

**CONCEPTION PLURIDISCIPLINAIRE D'UNE METHODE
GENERALE D'EVALUATION DES FLUX DE
CONTAMINANTS ISSUS DES RUISSELEMENTS DES
MATERIAUX DE TOITURES A L'ECHELLE URBAINE.
DEVELOPPEMENT ET ILLUSTRATION A PARTIR DU CAS
DU ZINC A CRETEIL**

*Rapport final : Thèse de doctorat d'Emna Sellami-Kaaniche
Soutenue le 25 juin 2014*

- *Financement de la bourse de thèse assuré par le CSTB*





Mémoire de thèse présenté pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS EST

Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement

**Conception pluridisciplinaire d'une méthode générale
d'évaluation des flux de contaminants issus des ruissellements
des matériaux de toitures à l'échelle urbaine.**

Développement et illustration à partir du cas du zinc à Créteil

par

Emna Sellami-Kaaniche

Thèse soutenue le 25 juin 2014 devant le jury composé de :

| | |
|---------------------------|-----------------------|
| Gérard HEGRON | Président du jury |
| Didier JOSSELIN | Rapporteur |
| Fabrice RODRIGUEZ | Rapporteur |
| Manuel PRUVOST-BOUVATTIER | Membre invité |
| Ghassan CHEBBO | Directeur de thèse |
| Bernard de GOUELLO | Co-Encadrant de thèse |
| Marie-Christine GROMAIRE | Encadrant LEESU |

Thèse préparée au Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU)
Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

Financement par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

A la mémoire de mon Grand Père
Abdelhamid

Dédicace

A qui je dois énormément, qui a cru en moi et qui m'a donné les moyens d'aller aussi loin, à celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père Mohamed. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman Salwa que j'adore. Tu été pour moi la lumière qui me guide mes routes et qui m'emmène aux chemins de la réussite, c'est grâce à toi que je dois toute ma réussite. J'espère que mon travail sera le témoignage de ma gratitude et mon respect le plus profond.

A mon cher mari Mounir, mon âme sœur aucun mot ne saurait t'exprimer mon profond attachement et ma reconnaissance pour l'amour, la tendresse et la gentillesse sans égal dont tu m'as toujours entouré. Sans ton aide, tes conseils, tes encouragements et ta patience avec moi ce travail n'aurait vu le jour. Que dieu réunisse nos chemins pour un long commun serein.

*A ma petite sœur Fatma, merci pour ton amitié et tes encouragements et les coups de main dans la finalisation artistique de ma thèse ! La vie m'a fait un très beau cadeau en faisant de toi
Ma Sœur...*

A mon grand frère Ahmed, tu été à ma compagnie depuis mes études avec qui j'ai partagé des moments spécifiques de bonheur et de joie.

A mon petit frère Mohamed qui malgré la distance, tu es toujours dans mon cœur.

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

EMNA

Remerciements

Enfin, j'arrive au moment le plus émouvant pour écrire la dernière page de ma thèse. D'un ingénieur en Génie civil à un Chercheur, un parcours qui a bien mérité ces sacrifices ! Mais, aucun travail ne s'accomplit dans la solitude. Durant cette thèse, que j'ai menée pendant trois ans et demi, j'étais soutenue par beaucoup de personnes. Ainsi, je profite de ces quelques lignes pour dévoiler mes reconnaissances à ceux et celles qui d'une manière ou d'une autre ont participé à cette aventure, en espérant de ne pas avoir oublié personne...

Tout d'abord, je tiens à remercier le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment qui a financé ce projet de thèse et qui m'a accordée cette chance de faire partie de ce grand organisme. Egalement, je remercie le Laboratoire Eau, Environnement et systèmes Urbains LEESU, dirigé par Monsieur Bruno Tassin, qui m'a accueillie dans ses locaux au sein d'une équipe enthousiaste et passionnée durant quatre années et demie depuis mon master.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble des membres de mon jury qui ont accepté de juger mon travail de thèse : Monsieur Didier Josselin, Directeur de recherche au CNRS à Avignon, Monsieur Fabrice Rodriguez, Chercheur à l'IFSTTAR de Nantes, Monsieur Gérard Hégron, Directeur de Recherche à l'IFSTTAR de Nantes et Monsieur Pruvost-Bouvattier Manuel, Ingénieur à IAU île-de-France.

Un grand merci à mes 3 encadrants, pour leur aide tout au long de ces 3 années et demie et pour le goût de la recherche qu'ils ont su me transmettre. Je considère que j'ai une grande chance d'avoir cet encadrement très riche et fructueux avec trois encadrants de compétences très différentes qui m'a permis de profiter et de croiser des connaissances relevant des sciences de l'ingénieur et des sciences sociales. Ainsi, sans cette mixité une thèse pluridisciplinaire n'aurait pu être menée à bien.

Je remercie Monsieur Ghassan Chebbo, mon directeur de thèse, coordinateur du programme OPUR, dans lequel cette thèse s'intègre, pour avoir accepté de diriger ce travail et pour le temps qu'il m'a accordé malgré son planning chargé, pour ces remarques pertinentes mais aussi pour sa confiance.

Monsieur Bernard de Gouvello, mon co-directeur de thèse, qui a encadré de très près cette thèse, qui m'a soutenue, encouragée, et avec qui j'ai établi une relation de confiance. Il a toujours été disponible, à l'écoute de mes nombreuses questions, et s'est toujours intéressé à l'avancée de mes travaux. Je le remercie de m'avoir donnée sa confiance pour mener une thèse originale et pluridisciplinaire. J'ai appris beaucoup de lui, de ses idées fructueuses en recherche et particulièrement de m'avoir permis de découvrir un nouveau domaine, celui des sciences sociales, loin de mes compétences en tant qu'ingénieur en génie Civil. Cette thèse lui doit beaucoup. Un grand merci également pour ses grandes qualités humaines, sa gentillesse, ses capacités d'écoute et de compréhension, sa générosité et sa bonne humeur. Pour tout cela merci.

Madame Marie-Christine Gromaire, pour le temps qu'elle m'a accordée pour cette thèse, pour ses qualités scientifiques, ses remarques très efficaces et pertinentes, ses idées intéressantes mais aussi pour sa gentillesse et sa générosité.

J'adresse également mes sincères remerciements à Arnaud le Bris du laboratoire MATIS de l'Institut Géographique National pour son implication et le temps qu'il m'a accordée pour appliquer et améliorer la méthode de classification des images aériennes.

Je tiens également à remercier Ali Hannouche qui était disponible pour répondre à mes questions en statistique ainsi que pour ses conseils enrichissants qui m'ont permis de surmonter certains moments de doute dans mon approche statistique.

Je voudrai remercier Mme Annick Texier (Chercheuse et responsable du pôle métal dans le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH)), Mme Cécile Roland (Responsable Applications environnementale de la société VMZINC), M. Philippe Boisseau (Conseiller technique auprès des entreprises de couverture de Paris et petite couronne du syndicat des entreprises de génie climatique, de couverture-plomberie et de fumisterie - GCCP), M. Cédric Normand (Ingénieur Etudes et Recherche du Département Climatologie-Aérodynamique-Pollution-Epuration (CAPE) au CSTB de Nantes), M. Fabien Perez (Responsable Normes dans la société NICOLL), M. Christophe Bissery (Directeur du département R&D et Applications environnementales de la société VMZINC) et M. Simon Vaillant (Chargé de recherches au Centre d'archives d'architecture du 20^{ème} siècle) d'avoir accepté de me recevoir pour des entretiens avec eux afin d'alimenter mon travail de thèse, ainsi que pour leur ouverture et accueil.

Je souhaite remercier aussi, les étudiants que j'ai encadrés durant ce travail : Pénélope d'Allens, Pierre Prigent, Maria Foughali, Stéphanie Trébalage, Arthur Relave-Noiray, Sindy Tarazona, Louis Jeanne et Yourgo Mohamed Yassin qui ont travaillé et contribué dans ce travail de thèse.

Je tiens particulièrement à remercier Brigitte Vinçon-Leite et Bruno Lemaire qui m'ont permis de découvrir et aimer le domaine de la recherche en m'acceptant dans un stage de master au sein du LEESU.

Je souhaiterais également remercier tous les chercheurs et autres personnels du LEESU pour la chaleureuse ambiance de ce laboratoire dans lequel on se sent dans une famille. En particulier, je tiens à remercier Daniel Thévnnot de m'avoir permis de participer au workshop WWW-YES. Aussi, merci à Céline Bonhomme pour les échanges scientifiques que nous avons eu en particulier au sujet de la modélisation.

Un grand merci aussi à Mesdames Catherine Charleux et Annick Piazza, toujours là pour les problèmes administratifs, mais aussi et surtout pour nous encourager dans les moments difficiles. C'était un vrai plaisir de vous côtoyer au quotidien !

Merci à tous les doctorants ou aujourd'hui docteurs, plus particulièrement, Ali Belmeziti, Viet Tran Khac, Siyu Zhang, Antoine Van de Voorde, Ali Fadel, Elodie Moulin, Agathe Giangola-Murzyn, Julien Richard, Guido Petrucci, Emilie Rioust, Amandine de Coninck ... avec lesquels j'ai partagé de très bons moments surtout à la fameuse cafété du LEESU lieu de pause pour échanger et se détendre entre amis !

Mes sincères remerciements pour ma chère Talita avec qui j'ai partagé le bureau et passé de très bons moments depuis nos études en master. Nous nous sommes serrés les coudes et nous avons mené nos thèses à bien !

Merci à Tous !!

Emna Sellami-Kaaniche

Résumé

Ce travail de thèse vise à développer une méthode générale d'évaluation des flux de contaminants issus des ruissellements des matériaux de toiture à l'échelle urbaine. Cette méthode est fondée sur une démarche originale de *changement d'échelles* intégrant différents outils relevant des sciences de l'ingénieur et des sciences sociales.

Le travail comprend la création d'une base de données bibliographique qui permet de disposer d'une vision synoptique des matériaux de toiture nouveaux et anciens utilisés à l'échelle urbaine, ainsi que des contaminants associés. La démarche de changement d'échelle – du toit à l'échelle urbaine – repose sur la notion de *situation-type d'émission* d'un contaminant par un matériau de toiture à laquelle est associé un flux unitaire unique. Cette notion propose une nouvelle définition de l'émission à l'échelle du toit incluant uniquement les paramètres pertinents à l'échelle urbaine. Afin de faciliter le calcul du flux à l'échelle urbaine, différents *principes* méthodologiques sont adoptés pour exploiter des *bases de données urbaines* existantes (base des modes d'occupation du sol, cadastre, images aériennes) et les adapter ou les interpréter au prisme de la problématique particulière des émissions de toitures. Ainsi, les principes de *découpage* et de *croisement* sont utilisés pour diviser l'échelle urbaine en *entités homogènes*. Une entité consiste en un regroupement de bâtiments, caractérisée par une répartition propre de matériaux de toitures. Ces entités sont obtenues en croisant une *étude typologique* des bâtiments (élaborée à partir de la base des modes d'occupation du sol) avec *l'histoire urbaine* et avec *l'histoire des matériaux de toiture*. La définition d'un ensemble de *règles empiriques* est nécessaire pour permettre la quantification des matériaux des différents éléments de toitures à l'échelle de la ville. Ces règles sont élaborées à partir d'une enquête et d'entretiens menés auprès d'experts des matériaux de toitures (fabricants, syndicats...) ainsi que d'une étude historique et d'une étude du marché des matériaux de toiture.

Le développement intégral de la méthode jusqu'au calcul final rend indispensable le choix d'un terrain d'étude et d'un contaminant afin d'en illustrer en détail toutes les étapes de calcul. La ville de Créteil a été choisie car elle présente une mixité urbaine et historique suffisante pour embrasser la plupart des situations urbaines susceptibles d'être rencontrées en France. Elle offre également l'avantage de disposer d'un maximum de situations-types d'émissions renseignées pour le contaminant zinc qui a donc été retenu. Complétant les règles empiriques générales, une *méthode statistique* est développée sur ce cas d'étude. Croisée à une interprétation visuelle des matériaux de toiture à partir des images aériennes, elle permet d'évaluer la distribution des matériaux de toiture à partir d'un échantillonnage aléatoire simple de bâtiments appliqué à chaque entité homogène de la ville. Le couplage de cette distribution avec les situations-types concernées permet alors une estimation du flux de zinc émis par l'ensemble des toitures de Créteil, à savoir 813 kg.an^{-1} avec une incertitude de 16,6%.

La méthode élaborée est généralisable à d'autres villes et d'autres contaminants. Dans cette optique, la *démarche opérationnelle* à suivre a été formulée de manière synthétique en fin de travail. Son utilisation peut permettre, d'une part d'évaluer à coût réduit l'impact des toitures d'une métropole ou d'une zone urbanisée sur l'environnement et, d'autre part, d'orienter les pratiques de gestion et l'utilisation des eaux de ruissellement en limitant l'apport de contaminants par les matériaux de toitures. Afin de pouvoir appliquer cette méthode à tout contaminant, des pistes ont été dressées pour définir une approche optimisant l'acquisition de données de flux annuels unitaires pour les différentes situations-types.

Mots clés : flux d'émission, matériaux de toitures, contamination, eaux de ruissellement, zinc, changement d'échelle, bâtiment, échelle urbaine, outil d'évaluation, Créteil

Abstract

This thesis aims to develop a general method for modelling roofing materials emissions on the city scale. The proposed method is based on an original *scaling approach* integrating different tools within the engineering sciences and social sciences. The work includes the creation of a bibliographic database describing new and old roofing materials and their associated contaminants.

The scaling approach - from roof to the city scale – relies on a new concept called *typical-situation* of contaminant emission from roofing material on the roof. For each typical situation, a contaminant annual runoff rate is associated. This concept allows the transition between the roof scale and the city scale. To facilitate contaminant flow calculation on the city scale, different methodological principles are adopted to exploit and adapt existing urban databases (land use database, numerical cadastre, and aerial images) to the specific issue of roofing material emissions. Thus, *dividing* and *crossing* principles are used to divide the city into *homogeneous units*. A unit is a cluster of buildings characterized by a specific roofing materials distribution. These units are obtained by crossing a typological buildings study (developed from the land use database) with the city urban history and the roofing material historical evolution. Defining empirical rules is necessary to quantify the distribution of the material in the different roofing elements on the city scale. These rules are developed from a survey made by conducting interviews with experts of the roofing material sector (industrials, masters of work, architects...) as well as a historical study and a market study for roofing materials.

The full development of the method makes it essential to choose a study site and a contaminant in order to illustrate in detail all the computation steps. Créteil city was selected because it presents a big diversity and a large number of buildings in order to represent most of the urban functions of any city in France. In the city of Créteil, zinc annual runoff rates have been produced for different metallic materials for the maximum of zinc typical-situation. A *statistical approach* was developed to complete empirical rules to compute roofing materials area distribution on the city scale. This approach is based on a stratified random sampling technique in conjunction with aerial images interpretation of the different roofing material element applied for each unit. Given the roofing material distribution and the zinc typical-situations, annual zinc flow from roofing material at Créteil city was estimated by about $813 \text{ kg}\cdot\text{an}^{-1}$ with an uncertainty of 16.6%.

The developed method can be applied to other cities and other contaminants. In this context, the operational procedure of the application of this method was described at the end of this thesis. Our method can be used as a decision-making tool by urban planners at three levels to implement policies which allow the reduction of roofing pollutant emissions. In order to apply this method to any contaminant, different tracks were drawn to define an optimized approach that produces runoff rates for different typical situations.

Keywords: emission flux, roofing material, contamination, runoff, zinc, scaling, building, urban scale, assessment tool, Créteil

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Dédicace | i |
| Remerciements | iii |
| Résumé | v |
| Abstract | vii |
| Table des matières | 1 |
| Liste des Figures..... | 5 |
| Liste des Tableaux..... | 9 |
| Acronymes | 11 |
| Glossaire..... | 13 |
| INTRODUCTION GENERALE | 15 |
| PARTIE 1. LES TOITURES A L'ECHELLE URBAINE : UN PUZZLE DE MATERIAUX ANCIENS ET NOUVEAUX SOURCE DE CONTAMINATION | 27 |
| Chapitre 1.1. Panorama des éléments de toiture entrant en contact avec l'eau | 31 |
| 1. Toiture : Définition - Repères historiques | 31 |
| 1.1. Définition | 31 |
| 1.2. Evolution de la forme du toit | 32 |
| 1.3. Les premiers types de couverture | 33 |
| 1.4. Les fonctions d'une toiture | 34 |
| 2. Toiture inclinées..... | 37 |
| 2.1. Description des éléments de toitures inclinées et de leurs principaux matériaux | 37 |
| 2.2. Familles de matériaux et matériau | 46 |
| 2.3. Synthèse : Les familles des matériaux et leurs variétés..... | 58 |
| 3. Toiture-terrasse | 60 |
| 3.1. Description et fonctions des éléments de toiture-terrasse..... | 60 |
| 3.2. Classification des terrasses | 61 |
| 3.3. Matériaux des éléments entrant en contact avec l'eau | 61 |
| 3.4. Dispositifs d'évacuation des eaux pluviales..... | 67 |
| 3.5. Cas particulier : les toitures-terrasses végétalisées..... | 68 |
| 4. Répartition des matériaux de toiture en France | 69 |
| 4.1. Hiérarchisation du marché des matériaux de rampant..... | 71 |
| 4.2. Hiérarchisation des matériaux d'étanchéité des toitures-terrasses..... | 84 |
| 4.3. Cas des toitures végétalisées..... | 87 |
| 5. Synthèse | 89 |
| 5.1. Variétés des matériaux de toiture et marché | 89 |
| 5.2. Répartition des matériaux de rampant entre marché et patrimoine | 92 |
| Chapitre 1.2. Les matériaux de couverture entre l'histoire de l'urbanisation de la ville et l'histoire de la technologie industrielle | 93 |
| 1. Histoire de l'urbanisation de la ville..... | 94 |
| 1.1. La ville ancienne de l'Antiquité à la Renaissance..... | 95 |
| 1.2. La révolution industrielle et la ville moderne | 97 |
| 2. Histoire des matériaux de couverture | 108 |
| 2.1. Les matériaux de rampants des toitures inclinées | 108 |
| 2.2. Les matériaux des toitures-terrasses | 122 |
| 2.3. Les matériaux des autres éléments de la toiture | 125 |
| 2.4. Tableau chronologique de l'évolution des matériaux de toiture..... | 128 |
| 3. Synthèse | 135 |
| Chapitre 1.3. Caractérisation des émissions de contaminants par les matériaux de toiture anciens et nouveaux | 137 |
| 1. Sources de contaminants en temps de pluie à l'échelle urbaine | 138 |
| 1.1. Lessivage de l'atmosphère..... | 138 |

| | | |
|------|--|-----|
| 1.2. | Lessivage des surfaces urbaines imperméables..... | 139 |
| 2. | Contamination des eaux de ruissellement des toitures | 139 |
| 2.1. | Contaminants issus des apports atmosphériques..... | 140 |
| 2.2. | Contaminants issus des matériaux de toiture | 142 |
| 2.3. | Contaminants effectivement émis par les matériaux de toiture..... | 151 |
| 2.4. | Flux unitaires d'émission de contaminants par les matériaux de toiture : état de l'art | 164 |
| 3. | Synthèse des contaminants potentiellement émis et ceux effectivement émis par les matériaux de toiture | 169 |

PARTIE 2. METHODOLOGIE DE CHANGEMENT D'ECHELLE POUR L'EVALUATION DES FLUX URBAINS DE CONTAMINANTS ISSUS DES TOITURES 175

Chapitre 2.1. Emission de contaminants de l'échelle du toit à l'échelle urbaine : Problématique, données et approches adoptées..... 179

| | | |
|------|--|-----|
| 1. | Difficulté de l'évaluation de l'émission d'un contaminant à l'échelle urbaine..... | 179 |
| 1.1. | Echelle du toit..... | 179 |
| 1.2. | Echelle urbaine..... | 180 |
| 1.3. | Synthèse | 181 |
| 2. | Identification des données..... | 181 |
| 2.1. | Echelle du toit..... | 181 |
| 2.2. | Echelle urbaine..... | 182 |
| 3. | Méthodes et principes..... | 188 |
| 3.1. | Exploitation des données au niveau du toit..... | 188 |
| 3.2. | Exploitation des données au niveau de l'échelle urbaine | 189 |
| 3.3. | Méthodes de quantification..... | 191 |
| 3.4. | Principes..... | 192 |
| 4. | Synthèse..... | 194 |

Chapitre 2.2. Identification des paramètres d'émission de toiture pertinents à l'échelle urbaine : la notion de situation-type 197

| | | |
|------|--|-----|
| 1. | Emission d'un contaminant par un matériau au niveau d'une toiture..... | 198 |
| 1.1. | Processus engagés dans l'émission..... | 198 |
| 1.2. | Paramètres influençant l'émission | 203 |
| 1.3. | Quels paramètres reliés au toit sont-ils pertinents à l'échelle urbaine? | 210 |
| 2. | Description de la notion de « situation-type »..... | 212 |
| 2.1. | Appartenance à un matériau | 214 |
| 2.2. | Exemples de situations-types réelles..... | 216 |
| 2.3. | Flux unitaire par situation-type..... | 219 |
| 3. | Equation générale du flux annuel total d'émission d'un contaminant donné | 229 |
| 4. | Conclusion du chapitre..... | 230 |

Chapitre 2.3. Identification de critères de choix des matériaux de toitures à l'échelle urbaine : un découpage en entités homogènes..... 231

| | | |
|------|--|-----|
| 1. | Les méthodes de reconnaissance automatique des matériaux de toiture | 232 |
| 1.1. | Méthodes basées sur l'analyse des données hyperspectrales..... | 232 |
| 1.2. | Méthode basée sur l'analyse des images multispectrales..... | 234 |
| 1.3. | Méthode de classification des toitures par rapport à leur planéité..... | 235 |
| 1.4. | Contraintes et limites des méthodes de reconnaissance automatique | 236 |
| 2. | Méthodes de changement d'échelle..... | 238 |
| 2.1. | Méthode d'évaluation de l'impact du trafic sur la pollution de l'air à l'échelle européenne (MEET)..... | 238 |
| 2.2. | Méthodes d'évaluation de problématiques liées à l'eau à grande échelle | 239 |
| 2.3. | Méthodes d'évaluation des phénomènes liés au bâtiment à l'échelle urbaine..... | 242 |
| 2.4. | Les 3 étapes d'un changement d'échelle..... | 245 |
| 3. | Critères de choix des matériaux de toitures..... | 247 |
| 3.1. | Dimension historique..... | 250 |
| 3.2. | Dimension typologique..... | 251 |
| 3.3. | Dimension réglementaire..... | 252 |
| 3.4. | Dimension esthétique architecturale | 253 |
| 3.5. | Dimension : qualités écologiques | 254 |
| 3.6. | Dimension : caractéristiques du matériau | 254 |
| 4. | Principes de découpage de l'échelle urbaine en entités homogènes | 256 |
| 4.1. | Principes généraux..... | 257 |
| 4.2. | Principes spécifiques à l'échelle urbaine étudiée | 271 |
| 4.3. | Critères spécifiques non objectivables..... | 275 |
| 4.4. | Vers un découpage de l'échelle urbaine en entités homogènes en termes de répartition des matériaux de toiture..... | 275 |

Chapitre 2.4. Elaboration des règles empiriques d'identification et de quantification des matériaux des différents éléments de toit à l'échelle urbaine 277

| | | |
|------|---|-----|
| 1. | Principes d'élaboration des règles..... | 278 |
| 1.1. | Finalité des règles empiriques..... | 279 |
| 1.2. | Collecte de données pour l'élaboration des règles | 280 |
| 1.3. | Profils des personnes interrogées..... | 282 |

| | | |
|------|--|-----|
| 1.4. | Démarche de formulation des règles..... | 284 |
| 2. | Règles de passage de la famille de matériaux de rampant aux matériaux de rampant..... | 296 |
| 2.1. | Famille de matériaux en zinc..... | 297 |
| 2.2. | Famille de matériaux en tuiles..... | 301 |
| 2.3. | Synthèse des règles d'identification des matériaux de rampant..... | 304 |
| 2.4. | Synthèse des règles de quantification pour le passage de la famille de matériaux au matériau de rampant..... | 306 |
| 3. | Règles de corrélation famille de matériaux de rampant / matériaux de gouttière..... | 309 |
| 3.1. | Les règles d'identification des matériaux de gouttières (RIG)..... | 309 |
| 3.2. | Règles de corrélation entre la famille de matériaux ou matériau du rampant et le matériau de gouttière..... | 312 |
| 4. | Autres règles de corrélation..... | 316 |
| 4.1. | Règles de corrélation famille de matériaux de rampant / matériaux de descente..... | 316 |
| 4.2. | Règles de corrélation famille de matériaux de rampant / matériaux de noue..... | 317 |
| 4.3. | Règles de corrélation famille de matériaux de rampant / matériaux d'élément d'étanchéité..... | 317 |
| 5. | Des règles empiriques plus ou moins validées mais efficaces..... | 318 |

PARTIE 3. CALCUL PRATIQUE DU FLUX D'UN CONTAMINANT A L'ECHELLE URBAINE : LE ZINC A CRETEIL..... 321

Chapitre 3.1. Contaminant et terrain d'étude : choix et identification des données 325

| | | |
|------|---|-----|
| 1. | Choix du contaminant et du terrain d'étude..... | 326 |
| 1.1. | Choix du contaminant..... | 326 |
| 1.2. | Choix du terrain d'étude..... | 327 |
| 2. | Identification des données disponibles à Créteil..... | 331 |
| 2.1. | Données de flux unitaires d'émission du zinc..... | 332 |
| 2.2. | Données urbaines..... | 332 |
| 3. | Exploitation des données vis-à-vis de la quantification..... | 335 |
| 3.1. | Tableau des situations-types d'émission du zinc..... | 336 |
| 3.2. | Critère de choix des matériaux de toiture dans la ville de Créteil..... | 339 |
| 4. | Conclusion du chapitre..... | 351 |

Chapitre 3.2 Quantification des surfaces des familles de matériaux de rampants et des longueurs de gouttières et de noues associées 355

| | | |
|------|--|-----|
| 1. | Découpage de la ville en entités urbaines homogènes..... | 356 |
| 1.1. | Carte de classes de bâtiments et carte historique de Créteil..... | 356 |
| 1.2. | Création d'entités urbaines homogènes..... | 358 |
| 2. | Approche statistique et calcul d'incertitude..... | 360 |
| 2.1. | Première approche statistique..... | 361 |
| 2.2. | Approche statistique retenue..... | 362 |
| 2.3. | Développement et validation de la méthode statistique à travers la quantification des familles des matériaux de rampant..... | 364 |
| 2.4. | Quantification des longueurs de gouttières et de noues..... | 380 |
| 3. | Conclusion du chapitre..... | 387 |

Chapitre 3.3 Evaluation du flux d'émission du zinc à l'échelle de la ville de Créteil 389

| | | |
|------|---|-----|
| 1. | Quantification des familles des matériaux de rampant et des linéaires de gouttières et de noues associés..... | 389 |
| 1.1. | Méthode statistique..... | 389 |
| 1.2. | Méthode de traitement d'image : classification des familles des matériaux de rampant..... | 396 |
| 1.3. | Méthode statistique et méthode de traitement d'image..... | 403 |
| 2. | Quantification des matériaux : de rampants, de gouttières et de noue à l'échelle de la ville de Créteil..... | 404 |
| 2.1. | Application des règles de passage de la famille des matériaux de rampant au matériau de rampant..... | 406 |
| 2.2. | Application des règles de corrélation entre le matériau du rampant et le matériau de la gouttière..... | 407 |
| 2.3. | Application des règles de corrélation entre le matériau du rampant et le matériau de noue..... | 411 |
| 2.4. | Synthèse de l'application des règles..... | 411 |
| 3. | Calcul du flux du zinc à l'échelle de la ville de Créteil..... | 413 |
| 3.1. | Calcul d'incertitude sur le flux global du zinc..... | 413 |
| 3.2. | Analyses des résultats..... | 416 |
| 4. | Synthèse..... | 427 |

Chapitre 3.4. Méthode générale pratique d'évaluation de flux de contaminant à l'échelle d'une ville 429

| | | |
|------|---|-----|
| 1. | Présentation générale de la méthode..... | 429 |
| 1.1. | Finalité de la méthode..... | 429 |
| 1.2. | Principes de la méthode..... | 430 |
| 1.3. | Schéma de synthèse de la méthode..... | 431 |
| 2. | Démarche opérationnelle de l'application de la méthode..... | 433 |
| 2.1. | Choix du contaminant et de la ville d'étude..... | 433 |
| 2.2. | Identification des flux unitaires et des situations-types d'émission du contaminant par les matériaux de toiture à l'échelle du toit..... | 433 |
| 2.3. | Quantification des surfaces des familles des matériaux de rampants et des longueurs de gouttières et de noues associées..... | 435 |
| 2.4. | Quantification des matériaux de rampants et des autres éléments de toit..... | 444 |
| 3. | Synthèse..... | 447 |

| | |
|--|------------|
| CONCLUSION GENERALE..... | 471 |
| 1. Une démarche novatrice pour l'évaluation des flux de contaminants à l'échelle urbaine | 473 |
| 1.1. Synthèse des grandes lignes de la démarche..... | 474 |
| 1.2. Vers une méthode plus performante | 478 |
| 1.3. Perspectives d'application de la méthode | 482 |
| 2. Orientation de la démarche de production de données de flux unitaires annuels pour l'évaluation à l'échelle urbaine | 484 |
| 2.1. Renseignement des situations-types..... | 485 |
| 2.2. Stratégie d'acquisition de données..... | 487 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 491 |
| ANNEXES..... | 513 |
| Liste des Annexes..... | 515 |

Liste des Figures

| | |
|---|-----|
| Figure 1 : Exemples des variétés des toitures : 1) un versant; 2) deux versants ; 3) dôme ; 4) terrasse..... | 32 |
| Figure 2 : (a) Habitats troglodytique en Turquie; (b) Couverture en matière végétale | 33 |
| Figure 3 : Schématisation des différentes fonctions de la toiture | 34 |
| Figure 4 : Terminologie et principaux composants du toit rentrant en contact avec l'eau (NF P 30-101)..... | 38 |
| Figure 5 : Toitures métalliques à tasseaux et à joints-debout (DTU 40.3)..... | 41 |
| Figure 6 : Les différents modes de couvertures en ardoise (DTU 40.1) | 41 |
| Figure 7 : Les différents modes de couvertures en tuile (DTU 40.2)..... | 42 |
| Figure 8 : Disposition des bardeaux bitumineux sur une toiture (DTU 40.14)..... | 43 |
| Figure 9 : (a) Forme d'une plaque ; (b) Mode de fixation d'une plaque..... | 44 |
| Figure 10 : (a) Tuiles en terre cuite engobées ; (b) Tuile en terre cuite émaillées ; (c) Tuile béton; (d) Tuile métallique | 47 |
| Figure 11 : Élément en ardoise..... | 50 |
| Figure 12 : Ardoise en fibres ciment blanchie..... | 50 |
| Figure 13 : Toiture ancienne de la Cathédrale El Burgo d'Osma (Espagne) en plomb | 51 |
| Figure 14 : Toiture en cuivre | 52 |
| Figure 15 : Toiture en zinc | 52 |
| Figure 16 : L'aspect de surface des différents produits de zinc de gauche à droite : zinc naturel, quartz-zinc et anthra-zinc .. | 54 |
| Figure 17 : (a) Profil nervuré; (b) Profil ondulé; (c) Profil trapézoïdale..... | 54 |
| Figure 18 : Exemple de bardeaux bitumeux | 56 |
| Figure 19 : Exemple de plaques en plastique (Onduline, 2002) | 57 |
| Figure 20 : Exemple de plaque en fibres ciment..... | 58 |
| Figure 21 : Composition d'une toiture-terrasse (Remolu et Lauby, 2007) | 60 |
| Figure 22 : Composition de l'asphalte (Foughali, 2013)..... | 62 |
| Figure 23 : Composition d'une feuille bitumineuse (Remolu et Lauby, 2007)..... | 63 |
| Figure 24 : Composition d'une membrane synthétique (Remolu et Lauby, 2007) | 64 |
| Figure 25 : Système d'entrée d'eau pluviale dans une terrasse (Remolu et Lauby, 2007)..... | 67 |
| Figure 26 : Entrées d'eaux pluviales. Exemple de crapaudine et de galerie garde-grève | 67 |
| Figure 27 : Cas des toitures végétalisées et des toitures-terrasses jardins (Houssin <i>et al.</i> , 2012) | 68 |
| Figure 28 : Exemple sur élément porteur en maçonnerie de pente nulle (Houssin <i>et al.</i> , 2012)..... | 69 |
| Figure 29 : Marché des surfaces vendues (en millions de m ²) des petits et grands éléments de couverture en France entre 2001-2011 (MSI, 2006 ; MSI, 2012)..... | 72 |
| Figure 30 : Marché des petits et grands éléments de couverture en France en 2005 et 2011: répartition du marché et type d'usage (en millions de m ²) (MSI, 2006 ; MSI, 2012)..... | 72 |
| Figure 31 : Evolution du marché des Petits éléments de couverture en France, par type de matériau, 2001-2011 (Trébalage, 2013)..... | 73 |
| Figure 32 : Evolution du marché des grands éléments de couverture en France, par type de matériau, 2001-2011 (Trébalage, 2013) | 76 |
| Figure 33 : Marché des couvertures métalliques en 2005 et 2011 (MSI, 2006 ; 2012) | 77 |
| Figure 34 : Evolution des matériaux du rampant en fonction de la surface vendue en France entre 2001 et 2011, en pourcentage (Trébalage, 2013)..... | 80 |
| Figure 35 : Evolution des hiérarchisations de matériaux du rampant pour le secteur Résidentiel et non Résidentiel 2001/2005/2011 (Trébalage, 2013) | 81 |
| Figure 36 : Marché des petits et grands éléments de couverture en Île-de-France en 2005 (en %) (MSI, 2006)..... | 82 |
| Figure 37 : Marché des grands éléments de couverture en Ile-de-France en 2005 (en %) (MSI, 2006; Robert-Sainte, 2009) . | 82 |
| Figure 38 : Marché des petits éléments de couverture en Ile-de-France en 2005 (en %) (MSI, 2006; Robert-Sainte, 2009) ... | 83 |
| Figure 39 : Hiérarchisation des ventes des matériaux du rampant en Ile-de-France en 2005 (%) (MSI, 2006)..... | 83 |
| Figure 40 : Marché de l'étanchéité de toiture-terrasse, par secteur d'utilisation en 2011 (MSI, 2012) | 84 |
| Figure 41 : Evolution du marché des matériaux d'étanchéité-toiture entre 2001 à 2011 (par rapport à la surface vendue (m ²)) (MSI, 2006 ; MSI, 2012)..... | 85 |
| Figure 42 : Marché de l'étanchéité des toitures-terrasses en France, de 2001 à 2011, par type de matériaux (MSI, 2006 ; MSI, 2012) (Trébalage, 2013)..... | 85 |
| Figure 43 : Marché des produits d'étanchéité-toiture en Ile-de-France, par type de matériau en 2005 (en%) (MSI, 2006)..... | 87 |
| Figure 44 : Evolution du marché de la toiture végétalisée entre 2007 et 2011 (MSI, 2012)..... | 88 |
| Figure 45 : Marché des toitures végétalisées, par type de matériaux en 2011 (MSI, 2012)..... | 89 |
| Figure 46 : Marché des surfaces vendues (en millions de m ²) des matériaux de rampant et des étanchéités terrasse en France entre 2001-2011 (MSI, 2006 ; MSI, 2012)..... | 91 |
| Figure 47 : Marché des surfaces vendues (en millions de m ²) des matériaux de rampant et des étanchéités terrasse en France entre 2001-2011 (MSI, 2006 ; MSI, 2012)..... | 92 |
| Figure 48 : Paysage de la ville de Paris | 93 |
| Figure 49 : Hôtel du Département à Marseille | 105 |
| Figure 50 : Palais de l'Europe à Strasbourg | 105 |
| Figure 51 : Toiture en chaume..... | 109 |
| Figure 52 : Toiture en bois | 109 |
| Figure 53 : (a) Plan de la coupole du Panthéon au 17 ^{ème} siècle; (b) Coupole du Panthéon vue d'aujourd'hui..... | 112 |

| | |
|---|-----|
| Figure 54 : (a) Dôme des invalides 1851-1870; (b) Dôme des invalides aujourd'hui | 113 |
| Figure 55 : Aile du midi château de Versailles..... | 114 |
| Figure 56 : Église Sainte-Jeanne-de-Chantal (Paris) | 115 |
| Figure 57 : Toiture en Mansart..... | 116 |
| Figure 58 : Couverture en zinc à tasseaux | 116 |
| Figure 59 : (a) Gouttière saillante en forme de Gargouille ; (b) Tuyaux de descente | 126 |
| Figure 60 : Flux annuels d'émission du zinc par différents matériaux de rampant..... | 156 |
| Figure 61 : Les distributions de concentration du Zn et Cu des eaux de ruissellement en fonction du type de couverture de toit. La médiane est marquée d'un point rouge (Seidl <i>et al.</i> , 2013)..... | 159 |
| Figure 62 : Masses de mécoprop émises par les deux membranes B2 et HE cumulées sur 11 événements d'arrosage effectués en laboratoire (Burkhardt <i>et al.</i> , 2007) | 161 |
| Figure 63 : Evolution du taux de ruissellement du biocide diuron pour le premier événement (Wittmer <i>et al.</i> , 2011)..... | 162 |
| Figure 64 : Schéma de la méthodologie employée pour développer la méthode d'évaluation des flux de contaminants issus du ruissellement des matériaux de toitures à l'échelle urbaine..... | 195 |
| Figure 65 : Phénomènes de formation et de mobilisation de contaminants métalliques (Robert-Sainte, 2009) | 199 |
| Figure 66 : Schéma simplifié de certains éléments de toit entrant en contact avec l'eau : 1) rampant ; 2) éléments d'étanchéité fenêtre et cheminé ; 3) gouttière ; 4) descente | 206 |
| Figure 67: Schéma représentatif du phénomène d'émission d'un contaminant à l'échelle du toit | 209 |
| Figure 68: Définition de la situation-type d'émission d'un contaminant par les matériaux de couverture..... | 213 |
| Figure 69 : Schématisation des différents modes de présence d'un contaminant sur un toit | 215 |
| Figure 70 : Exemples de situations-types associées à la gouttière et la descente..... | 217 |
| Figure 71 : Exemples de situations-types associées à la noue | 217 |
| Figure 72 : Exemples de situations-types associées au rampant..... | 218 |
| Figure 73 : Exemples de situations-types associées aux éléments d'étanchéité | 218 |
| Figure 74 : (a) Image aérienne ; (b) Classification de matériaux de toit (Lemp and Weidner, 2004)..... | 233 |
| Figure 75 : (a) Image aérienne ; (b) Application du masque ; (c) Classification des matériaux de toitures (Brand, 2005)..... | 233 |
| Figure 76 : Critères de choix des matériaux de toiture | 249 |
| Figure 77 : Structuration des 5 niveaux hiérarchiques de la base MOS de l'IAU-IDF (Belmeziti, 2012)..... | 263 |
| Figure 78 : A Créteil (a) Toiture en aluminium de la Conservatoire de musique Marcel Dadi; (b) Toiture en zinc du Centre Socioculturel Madeleine Rebérioux | 267 |
| Figure 79 : Croisement BD-TOPO et image aérienne | 278 |
| Figure 80 : Etapes de la quantification des matériaux des différents éléments de toit pour une entité donnée..... | 279 |
| Figure 81 : Arbre de définition et de classification des règles..... | 294 |
| Figure 82 : (a) Une photo de la nouvelle tranche de la ville de Créteil prise à partir du toit au 11 ^{ème} étage de la mairie localisée à coté du lac ; (b) Zone pavillonnaire du vieux Créteil..... | 329 |
| Figure 83 : (a) Carte de modes d'occupation du sol pour 24 MOS (source : IAU-IDF) ; (b) Les quatre zones urbaines (source : PLU de Créteil)..... | 331 |
| Figure 84 : Processus d'un projet de construction et acteurs concernés (Fernandez, 2010) | 335 |
| Figure 85 : (a) Le centre ancien avec ses toitures en tuile en 1945; (b) Les espaces libres occupés par des cultures maraîchères en 1960..... | 341 |
| Figure 86 : (a) Le quartier des Bleuets; (b) Le quartier de Mont-Mesly (PLU, 2010)..... | 342 |
| Figure 87 : Photo aérienne de la première tranche du Nouveau I Créteil (PLU, 2010) | 343 |
| Figure 88 : (a) Les immeubles « Philippines » ; (b) Les « choux » ou « épis de maïs »; (c) Les immeubles à façades colorées | 344 |
| Figure 89 : Réhabilitation du Centre Ancien – Quartier La Bordière : ajouts des éléments en bardeaux bitumeux aux toits-terrasses bi-pentes | 345 |
| Figure 90 : Les différents quartiers avec les toitures en pente du Nouveau Créteil II (Source Créteil habitat – SEMIC) | 345 |
| Figure 91 : Les toitures noirâtres du quartier du Port avec des matériaux différents (tuile béton, bardeaux bitumineux...) .. | 346 |
| Figure 92 : Exemple des toitures terrasses avec des brisis en bardeaux bitumeux- Quartier L'Ormetteau..... | 346 |
| Figure 93 : (a) Répartition majoritaire des matériaux de toiture ; (b) Epoques de construction de l'espace bâti..... | 351 |
| Figure 94 : (a) Carte historique (b) Carte de classes de bâtiments..... | 357 |
| Figure 95 : Exemple d'ilot de bâtiments..... | 358 |
| Figure 96 : Correction du décalage BD-TOPO et classe de bâtiment..... | 359 |
| Figure 97 : Exemples de trois entités différentes de la ville de Créteil..... | 360 |
| Figure 98 : Stratégie d'estimation des caractéristiques d'une entité..... | 361 |
| Figure 99 : (a) Prise d'image à partir de la BD-ORTHO ; (b) Une prise d'image à partir de Mappy; (c)Prise de vue à partir de Street View..... | 364 |
| Figure 100 : Distribution des surfaces des bâtiments de la population 1 (75 bâtiments)..... | 366 |
| Figure 101 : Variabilité de k – Exemple de la famille « Tuile claire » un tirage de $n=40\%N_j$ des populations P_{100} et P_{2500} .. | 370 |
| Figure 102 : Exemple de calcul des statistiques pour différentes tailles d'échantillon pour la famille des matériaux « Tuile claire » dans une population de 500 bâtiments | 371 |
| Figure 103 : Exemple de calcul des erreurs absolues sur les proportions des familles des matériaux de rampant pour différentes tailles d'échantillon dans une population de 500 bâtiments..... | 373 |
| Figure 104 : Evaluation des tailles d'échantillonnage en fonction de la taille de la population pour différentes erreurs absolues | 374 |
| Figure 105 : Nombre de bâtiments à tirer sans remise en fonction de la taille de la population pour différentes erreurs absolues..... | 376 |

| | |
|---|-----|
| Figure 106 : Comparaison des intervalles de confiance simulés (Monte-Carlo) et estimés (Théorème) pour différentes tailles d'échantillon pour la répartition de la famille des matériaux « Tuile claire » dans une population de 500 bâtiments..... | 378 |
| Figure 107 : Localisation des gouttières et des noues pour les différentes formes de toitures..... | 381 |
| Figure 108 : Repérage de gouttières et de noues dans une toiture à partir d'une photo-aérienne | 382 |
| Figure 109 : Comparaison des intervalles de confiance simulés (Monte-Carlo) et estimés (Théorème) sur le calcul des longueurs de gouttières associées à la famille des matériaux « Tuile claire » pour différentes tailles d'échantillons dans une population de 500 bâtiments..... | 385 |
| Figure 110 : Comparaison des intervalles de confiance simulés (Monte-Carlo) et estimés (Théorème) sur le calcul des longueurs de noues associées à la famille des matériaux « Tuile claire », pour différentes tailles d'échantillon dans une population de 500 bâtiments..... | 385 |
| Figure 111 : Répartition hiérarchique des classes de bâtiments dans la « zone historique 1 » | 391 |
| Figure 112 : Répartition hiérarchique des classes de bâtiments dans la « zone historique 2 » | 391 |
| Figure 113 : Répartition hiérarchique des classes de bâtiments dans la « zone historique 3 » | 391 |
| Figure 114 : Processus de classification (adaptée) (Le Bris, 2007)..... | 397 |
| Figure 115 : Exemple de segmentation de l'image (BD-Ortho). Les contours verts délimitent les régions de radiométries homogènes | 398 |
| Figure 116 : Exemple de saisie des polygones pour différentes familles de matériaux | 400 |
| Figure 117 : A gauche une ortho-photo; A droite un exemple d'image label de classification effectuée pour tout Créteil.... | 401 |
| Figure 118 : Variabilité de la distribution des matériaux par zone historique | 417 |
| Figure 119 : Distribution des matériaux de toiture des classes : « Bureau », « Equipement administratif », « Equipement d'enseignement » et « Equipement de santé » dans les trois zones historiques..... | 419 |
| Figure 120 : Distribution des matériaux de toiture des classes : activité secondaire, surface commerciale, transport dans les deux zones historiques (2 et 3)..... | 420 |
| Figure 121 : Distribution du flux du zinc dans la « zone historique 1 » émis par les rampants, les gouttières et les noues.... | 424 |
| Figure 122 : Principes de la méthode générale d'évaluation des flux de contaminants dans le ruissellement des matériaux de toiture à l'échelle urbaine..... | 432 |
| Figure 123 : Répartition hiérarchique des classes de bâtiments dans la zone historique 1 de la ville de Créteil | 439 |
| Figure 124 : Création de la base de bâtiments pour une entité donnée..... | 440 |
| Figure 125 : Repérage de la famille de matériaux de rampant, de gouttières et de noues dans une toiture à partir d'une photo-aérienne | 442 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|------------------------------------|
| Tableau 1 : Liste des DTU utilisés relatifs à la couverture | 40 |
| Tableau 2 : Les différents éléments d'une toiture inclinée et leurs matériaux constitutifs | 45 |
| Tableau 3 : Les familles des matériaux et leurs variétés utilisées sur les différents éléments d'une toiture inclinée..... | 59 |
| Tableau 4 : Les différents revêtements d'étanchéité appliqués sur les toitures-terrasses (Nohra, 2010)..... | 66 |
| Tableau 5 : Les matériaux potentiellement existants à l'échelle urbaine : Répartition du marché par famille et par variété des matériaux de rampant sur les 11 années d'étude (2001-2011)..... | 90 |
| Tableau 6 : Les matériaux potentiellement existants à l'échelle urbaine : Répartition du marché des matériaux d'étanchéité sur les 11 années d'étude (2001-2011) | 91 |
| Tableau 7 : Tableau chronologique de l'évolution du paysage urbain français à partir du 19 ^{ème} siècle | 107 |
| Tableau 8 : Tableau chronologique de l'évolution des matériaux de toiture | Erreur ! Signet non défini. |
| Tableau 9 : Normes de composition des matériaux de couverture | 143 |
| Tableau 10: Récapitulatif des informations recueillies dans les FDES | 152 |
| Tableau 11: Récapitulatif des informations recueillies dans les DEP..... | 153 |
| Tableau 12: Flux annuels du Zn, Pb et Cd émis par des toitures réelles (Lamprea, 2009) | 157 |
| Tableau 13: Gamme des concentrations de différents contaminants dans les eaux de ruissellement de différentes toitures (Tobiszewski et al., 2010) | 158 |
| Tableau 14: Emission de bisphénol-A et des alkylphénols par différents matériaux (Lamprea, 2012) | 163 |
| Tableau 15: Les flux d'émission des contaminants métalliques élaborés dans la littérature | 166 |
| Tableau 16: Synthèse des contaminants potentiellement émis et ceux effectivement émis par les matériaux de toiture..... | 171 |
| Tableau 17 : Les différentes situations-types renseignées d'émission du zinc par les matériaux de toiture | 221 |
| Tableau 18 : Les différentes situations-types renseignées d'émission du cuivre par les matériaux de toiture..... | 223 |
| Tableau 19 : Les différentes situations-types renseignées d'émission du plomb par les matériaux de toiture..... | 225 |
| Tableau 20 : Les différentes situations-types renseignées d'émission de contaminants organiques par les matériaux de toiture | 227 |
| Tableau 21 : Comparaison de notre étude et de la méthode MEET..... | 239 |
| Tableau 22 : Les MOS retenus pour notre étude | 264 |
| Tableau 23 : Les MOS pour l'habitat collectif..... | 266 |
| Tableau 24 : Les MOS pour l'habitat individuel | 268 |
| Tableau 25 : Les MOS pour l'activité | 269 |
| Tableau 26 : Les MOS pour les équipements | 270 |
| Tableau 27 : Typologie des différentes personnes interrogées à travers les entretiens et l'enquête | 285 |
| Tableau 28 : Synthèse des données sur la répartition des matériaux en zinc | 299 |
| Tableau 29 : Synthèse des données sur la répartition des matériaux en tuile | 303 |
| Tableau 30 : Synthèse des règles d'identification des matériaux de rampants | 305 |
| Tableau 31 : Synthèse des règles de quantification pour le passages de la famille des matériaux de rampant au matériau de rampant..... | 307 |
| Tableau 32 : Synthèse des données sur la répartition des matériaux de gouttière pour les rampants en tuile..... | 313 |
| Tableau 33 : Synthèse des règles de corrélation entre la famille des matériaux/matériau de rampant et les matériaux de gouttière | 315 |
| Tableau 34 : Flux annuels du zinc émis par différents matériaux d'éléments de toit (Robert-Sainte, 2009)..... | 332 |
| Tableau 35 : Les différentes situations-types renseignées d'émission du zinc par les matériaux de toiture | 338 |
| Tableau 36 : Répartition des familles des matériaux de rampant pour la population 1..... | 365 |
| Tableau 37 : Les différentes populations étudiées..... | 366 |
| Tableau 38 : Base de données pour une population P _j | 367 |
| Tableau 39 : Données obtenues pour un échantillon de taille n pour un seul tirage | 368 |
| Tableau 40 : Données pour un échantillon de taille n pour un seul tirage | 368 |
| Tableau 41 : Base de données pour un échantillon de taille n tiré k fois dans une population P _j | 369 |
| Tableau 42 : Répartition réelle des familles des matériaux de rampant pour la population 2 et 3 | 378 |
| Tableau 43 : Taille d'échantillon nécessaire pour assurer différentes valeurs absolues pour les deux populations..... | 379 |
| Tableau 44 : Exemple de calcul des erreurs absolues estimées pour un échantillon assurant une erreur absolue simulée E _a =2% pour la population 2..... | 379 |
| Tableau 45 : Résultats du calcul de la taille d'échantillonnage pour les populations 1 et 2..... | 380 |
| Tableau 46 : Calcul des longueurs de gouttières et de noues par famille de matériaux de rampant pour la population 1 | 382 |
| Tableau 47 : Résultats du calcul d'erreurs absolues sur l'estimation des longueurs de gouttières et de noues par famille de matériaux de rampant pour un échantillonnage choisi pour assurer une erreur absolue E _a = 4% | 387 |
| Tableau 48 : Récapitulatif des surfaces des toitures et du nombre de bâtiments associés à chaque zone historique | 390 |
| Tableau 49 : Récapitulatif des tailles des échantillons tirés des entités choisies | 392 |
| Tableau 50 : Extrait d'un échantillon tiré pour les habitats collectifs dans la « zone historique 1 »..... | 393 |
| Tableau 51 : Surface de rampant, longueur de gouttière et longueur de noue pour chaque famille de matériaux pour les entités : habitats individuels, habitats collectif et activité de la « zone historique 1 » (1900-1950) | 395 |
| Tableau 52 : Tableau récapitulatif des meilleurs résultats (en pourcentages) obtenus sur tout Créteil..... | 401 |
| Tableau 53 : Comparaison de notre méthode et celle de classification par AVET | 403 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 54 : Les règles appliquées pour la quantification des matériaux de rampants en zinc dans les différentes zones historiques..... | 407 |
| Tableau 55 : Les règles et le principe de majoration appliqués pour la quantification des matériaux de gouttières dans les différentes zones historiques..... | 410 |
| Tableau 56 : Récapitulatif des distributions des matériaux des différents éléments de toit émetteur du zinc par zone historique..... | 412 |
| Tableau 57 : Variabilité de l'émission du zinc dans la « zone historique 2 »..... | 421 |
| Tableau 58 : Variabilité de l'émission du zinc entre les différentes zones historiques..... | 423 |
| Tableau 59: Comparaison du flux annuel du zinc issus de différentes sources et dans différents sites (Sellami-Kaaniche et al., 2013)..... | 426 |
| Tableau 60 : Hiérarchisation des situations-types de la plus importante à la moins importante pour chaque contaminant | 434 |
| Tableau 61 : Base de données pour une entité..... | 441 |
| Tableau 62 : Bâtiments de l'échantillon tiré..... | 441 |
| Tableau 63 : Résultats de l'interprétation de la photo-aérienne pour les caractéristiques des toitures de l'échantillon tiré.... | 442 |
| Tableau 64 : Evaluation des éléments de toitures par famille de matériaux de rampant dans l'échantillon..... | 442 |
| Tableau 65 : Forme de résultat de la quantification des surfaces des familles des matériaux de rampants et leurs longueurs des différents éléments de toit associées..... | 444 |

Acronymes

AIMCC : Association des Industries de Produits de Construction
ANAH : Agence nationale de l'habitat
Aocdtf : Association Ouvrière des Compagnons du Devoir du Tour De France
APP : Polymère polypropylène atactique
BATIMAT : Salon international de la construction est un salon professionnel consacré à la construction et au bâtiment.
BBP : Butylbenzyle
BHT : metilox, l'hydroxytoluène butylé (stabilisant thermique)
CAUE : Conseils d'Architecture d'Urbanisme et d'Environnement
CICLA : Centre d' Information du Cuivre, Laiton et Alliages
COS : Coefficient d'Occupation des sols
CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DCE : Directive Cadre sur l'eau
DEBDE : Décabromodiphényléthers
DEHP : di-(2-éthylhexyle) (phtalate)
DEP : Déclaration Environnementale de Produit
DIDP : di-isodécyle (phtalate)
DINP : di-isononyle (phtalate)
DnOP : di-n-octyle (phtalate)
DTU : Documents Techniques Unifiés
DATAR : Délégation à l'Aménagement du Territoire
DTADD : Directive territoriale d'aménagement et de développement durables
EPDM : Ethylène-propylène-diène-monomère
EEP : Entrées d'eaux pluviales
ESWA : Association européenne des producteurs de membranes d'étanchéité synthétiques pour toitures
FAU : Fonds d'Aménagement Urbain
FDES : Fiches de déclaration environnementale et sanitaire
FDS : Fiches de déclaration sanitaire
FFTB : Fédération Française des tuiles et des briques
FPO : Polyoléfine flexible
HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HBCD : Hexabromocyclododécane
HLM : Habitation à Loyer Modéré
HQE : Haute Qualité Environnementale
IGN : Institut national de l'information géographique et forestière
IAU-IDF : Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la région Ile-de-France.
IDF : Ile-de-France
IGH : Immeubles à grande hauteur
INIES : Base nationale française de référence sur les impacts environnementaux et sanitaires
INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques.
ISO : International Standard for Organisations
ISTAR : Intelligence, Surveillance, Target Acquisition, and Reconnaissance
LEESU : Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains
MO : Maître d'Ouvrage
MOS : Mode d'Occupation du Sol
MOS-IAU : Mode d'Occupation du Sol de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme.
MSI : Marché des matériaux de couverture des toits en France
MRU : Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme
OCBDE : Octabromodiphényléthers
OPAH : Opérations Programmées d'Amélioration de l'Habitat

OPH : Offices Publics de l'Habitat
PBB : Polybromodiphényles
PBDE : polybromodiphényléthers
PCB : Polychlorobiphényles
PEBDE : Pentabromodiphényléthers
PLU : Plan Local d'Urbanisme
PMMA : Polyméthacrylate de méthyle
POS : Plan d'Occupation des sols
PUD : Plans d'Urbanisme Directeurs
PVC : Polyvinyle de chlorure
PVDF : Polyvinylidene fluoride
PVC-P : Polychlorure de vinyle plastifié
REACH : Registration, Evaluation Authorisation restriction of Chemicals
RNU : Le Règlement national d'urbanisme
RT : Réglementation thermique
RUTP : Rejets Urbains de Temps de Pluie
SBS : Styrène-Butadiène-Styrène
SCOT : Le Schéma de Cohérence Territoriale
SDAU : Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme
SDRIF : Schéma Directeur de la Région Île-de-France
SEL : Systèmes d'étanchéité liquide
SEMAEC : Syndicat d'Economie Mixte d'Aménagement et d'Équipement de la ville de Créteil
TBBPA : Tetrabromobisphénols A
TPO (polyoléfine thermoplastique)
ZAC : Zone d'Aménagement Concerté
ZUP : zones à Urbaniser en Priorité
UV : ultraviolet

Glossaire

Dans ce glossaire nous définissons deux types de concepts associées à deux types distincts de mise en forme :

- Le « style italique » correspond à la définition de nouveaux concepts qui ont été définis dans cette thèse ;
- Le « style normal » correspond à la définition de concepts existants en rajoutant quelques précisions par rapport à leurs exploitations dans le cadre de cette thèse.

Accessoires d'une toiture inclinée: crochets de fixations des ardoises, chatière, passage de ventilation...

Bâtiment : toute construction destinée à l'habitation ou constituant un abri. Dans cette thèse, le mot bâtiment est utilisé pour désigner l'échelle de la mise en œuvre des matériaux des différents éléments de toiture (gouttière, noue, rampant, descente...).

BD-ORTHO : c'est une base d'images aériennes permettant l'identification visuelle ou par un outil de classification des matériaux utilisés sur les toits grâce à leurs radiométries ainsi que leurs surfaces projetées. Elle couvre tout le territoire français et elle est fournie par l'IGN.

BD-TOPO : cette base couvre tout le territoire français et elle est fournie par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Elle permet de reproduire fidèlement la réalité du territoire par digitalisation des bâtiments. Elle permet une focalisation sur le bâti donc on obtient la surface projetée de chaque toiture.

Classe de bâtiments : c'est nouvelle typologie de bâtiments caractérisée par une même « signature d'utilisation de matériau de toit ». Par signature nous entendons une répartition spécifique de matériaux de toiture. Par exemple la signature des toitures des habitats individuels est définie par : 90% en tuiles en terre cuite et 10% en autres matériaux. Cette classe est obtenue par le regroupement des modes d'occupation de sol de la base MOS-IAU. 12 « classes de bâtiments » ont été retenues : habitat individuel, habitat collectif, habitat autre, activité secondaires, bureaux, sport (construit), équipement d'enseignement, équipement de santé, équipement culturel, équipement administratif, entrepôt logistique et transport/commerce.

Contaminant : d'après la Fondation de l'Eau Potable Sûre (Safe Drinking Water Foundation) un contaminant est défini comme « une substance qui se retrouve dans l'eau et qui peut avoir des risques sur la santé ». Dans notre travail, un contaminant est une substance émise par les matériaux dans l'eau de ruissellement de toiture.

Couverture : ensemble des éléments qui composent une toiture inclinée et elle est faite de matériaux spécifiques : ardoise, tuile, zinc...

DTU (Documents Techniques Unifiés) : ils sont des normes de mise en œuvre qui définissent les conditions à respecter dans le choix et la mise en œuvre des matériaux de construction. Ils englobent la grande majorité des matériaux qu'on trouve sur les toitures françaises. Ces DTU évoluent et rentrent en révision tous les cinq ans.

Echelle urbaine : toute échelle comportant un grand nombre de bâtiment (quartier, ville...). Elle est caractérisée par une diversité de mode d'occupation de sol et une impossibilité d'une description toit par toit.

Éléments d'étanchéité : il s'agit des jonctions entre différents éléments d'une toiture inclinée. On trouve alors, des jonctions entre pans de toiture (noue, faitage, arêtiers et brisures). D'autres assurant l'étanchéité des ouvrages de pénétration tels que cheminée, fenêtre de toit, lucarne et chien assis. Enfin, la rive est un élément de jonction entre un pan et un mur.

Eléments d'évacuations des eaux de pluies : égout, gouttière et chenaux, descente.

Entité : elle est définie par une classe de bâtiments localisée dans une zone historique. Chaque entité est homogène en termes de classe de bâtiments et historique ce qui permet de lui attribuer une répartition spécifique des matériaux de toitures.

Famille de matériaux : elle comporte les différentes variétés d'un matériau naturel ou initial. Ainsi, la famille tuile comporte la tuile en terre cuite et la tuile béton. La variété peut être obtenue par un traitement spécifique (ex : le prélaquage, prépatinage, coloration en masse...) ou par un changement de la composition du matériau initial. Par exemple, l'acier est une famille de matériaux qui comporte l'acier naturel, l'acier galvanisé (qui a subi une galvanisation par une couche de zinc), acier galvanisé peint (ajout d'une couche de peinture), acier inoxydable (alliage spécifique différents de l'acier naturel).

Flux unitaire : c'est un flux moyens annuels d'émission d'un contaminant par un matériau d'un élément de la toiture par temps de pluie. Ce flux est produit à petites échelles expérimentales (toiture ou banc d'essai).

Gouttière : canal destiné à la collecte et à l'évacuation des eaux pluviales, placé à la base des pentes d'un toit. La gouttière est plus légère que le chéneau, elle peut être pendante ou portée.

MOS-IAU (Modes d'Occupation du Sol de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la région Ile de France) : cette base représente l'atlas cartographique informatisé de l'occupation du sol de l'Île-de-France. C'est un outil de suivi et d'analyse du territoire francilien. La base de connaissance sur le MOS est une carte interactive qui montre l'occupation du sol détaillée en 81 postes de légende dans sa dernière version de 2008.

Matériau : c'est le produit final obtenu à partir du matériau initial présentant des caractéristiques spécifiques suite à des traitements spécifiques ou des ajouts dans la composition du matériau initial.

Noe : c'est la jonction des deux versants d'une toiture, cette jonction formant un angle rentrant. Elle assure l'étanchéité de la jonction.

Rampant : c'est la partie inclinée du toit, elle constitue la plus grande partie de la toiture.

Règle d'identification ou de quantification d'un matériau de toit à l'échelle urbaine : est définie comme un ensemble de contraintes qui se réunissent pour aboutir à un choix définitif ou une proportion d'un matériau dans un cadre temporel et à une échelle spécifique.

Revêtement d'étanchéité : matériau spécifique à la toiture-terrasse, il permet d'éviter l'infiltration de l'eau à l'intérieur du bâtiment.

Situation-type d'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture à l'échelle du toit : c'est un cas élémentaire d'émission d'un contaminant caractérisé par son appartenance à un matériau et sa localisation sur le toit. A chaque situation-type on associe un flux unitaire d'émission d'un contaminant.

Toiture inclinée : c'est une toiture formé par au moins un pan incliné ayant une pente supérieure à 15%.

Toiture-terrasse : elle est définie principalement par une pente inférieure à 15%.

Toiture végétalisée : c'est une toiture-terrasse comportant une couche de substrat convenant à des plantes variées.

INTRODUCTION GENERALE

*« Ô bruit doux de la pluie Par terre et sur les toits ! Pour un cœur qui
s'ennuie, Ô le chant de la pluie !*

Il pleut doucement sur la ville »

Verlaine

La ville est un système complexe formé de plusieurs éléments (bâtiment, route, jardin, homme...). Chaque élément contribue individuellement à des phénomènes qui peuvent influencer l'environnement d'une manière positive ou négative. Ces phénomènes se produisant à petites échelles spatiales posent le problème de leur impact à l'échelle de la ville. Aujourd'hui, nous assistons à un intérêt grandissant à résoudre des problématiques de changement d'échelle dans différents domaines liés à la ville (bâtiments, transport, sol, eau...). Ainsi, des approches sont de plus en plus développées pour modéliser les ambiances sonores urbaines (Picaud *et al.*, 2012). En effet, à l'échelle d'une ville, plusieurs sources provoquent du bruit qui est considéré comme un problème sociétal majeur impactant la santé (atteinte aux facultés auditives, stress, troubles du sommeil...). D'autres travaux ont été menés pour évaluer l'impact de la mise en place des toitures végétalisées sur l'économie d'énergie, la réduction du bruit, la pollution de l'air, la gestion de l'eau de pluie à l'échelle urbaine (Hongbing *et al.*, 2011). Dans le domaine du transport, des modèles ont été développés pour simuler les déplacements des véhicules dans les réseaux routiers dans le but de planifier le développement d'un réseau face à l'essor du monde automobile (Aguiléra et Leurent, 2012). Cet essor, provoquant de plus en plus de problèmes de pollution, a incité d'autres équipes de recherche à mettre au point des méthodes d'évaluation de l'émission de polluants par les transports dans l'air (Hickman *et al.*, 1999 ; Prud'homme *et al.*, 2011). L'objectif de ces travaux est d'améliorer les moyens de transports alternatifs pour limiter l'impact sur la pollution de l'air. Enfin, dans le domaine de l'eau, nous citons une étude récente qui a été menée pour évaluer l'impact du développement de la récupération de l'eau de pluie à grande échelle sur la gestion et l'économie de l'eau (Belmeziti *et al.*, 2013).

L'émission de contaminants par les matériaux de toitures par temps de pluie devient une nouvelle préoccupation opérationnelle liée au bâtiment. Cette préoccupation prend de plus en plus d'importance en particulier dans le cadre du développement du concept de bâtiments de haute qualité environnementale HQE et de la notion de « ville durable » (Ademe, 2004). Ainsi, il est important d'évaluer son impact à l'échelle urbaine. Dans ce cadre, notre travail de thèse s'intéresse à développer une méthode d'évaluation des émissions de contaminants par les matériaux des toitures à l'échelle urbaine.

Les eaux de ruissellement des toitures un nouvel enjeu environnemental

Des études menées, depuis les années 1970, ont mis en évidence la pollution des eaux pluviales urbaines et l'impact négatif de cette pollution sur les milieux récepteurs (Bachoc, 1984 ; Ellis et Hvitved Jacobsen, 1996 ; Saget *et al.*, 1995). Ainsi, la notion de « Rejets Urbains de Temps de Pluie » (RUTP) est définie comme l'ensemble de tous les rejets se produisant, par temps de pluie, à l'interface du système d'assainissement d'une agglomération urbaine et du milieu récepteur (Chebbo *et al.*, 1995).

Dans ce cadre, des travaux ont été menés pour étudier et maîtriser ces rejets quantitativement et qualitativement par temps de pluie.

Qualitativement, plusieurs recherches ont été développées pour caractériser les pollutions des RUTP et identifier leurs sources (Tassin, 1993 ; Burton et Pitt, 2002 ; Zgheib, 2009). Cette pollution générée par temps de pluie est issue de sources potentielles diffuses et multiples reliées aux différents types d'activités au sein d'une ville. En effet, l'eau de pluie issue du ruissellement sur les différentes surfaces urbaines (les habitats, les chaussées...) se charge d'une part de polluants atmosphériques qui se sont accumulés *via* les retombées de temps sec (ex : industries) et d'autre part de polluants émis soit par les automobiles soit par les matériaux des surfaces urbaines.

Les émissions de polluants par les matériaux de toitures sont une source non négligeable dans la pollution des RUTP. Depuis les années 1990, plusieurs études ont montré que les matériaux de toiture constituent une source importante de contamination, en particulier métallique, des eaux de ruissellement des toitures (Quek *et al.*, 1993 ; Gromaire-Mertz *et al.*, 1999; Odnevall Wallinder *et al.*, 1998). Ces eaux représentent environ la moitié du volume de ruissellement d'une zone urbaine (Förster, 1996), leurs niveaux de contamination influent donc de façon directe sur les eaux de ruissellement globales.

L'impact des RUTP et en particulier des eaux de ruissellement des toitures sur les milieux récepteurs est devenu un problème écologique très sensible suite à l'adoption de la Directive Cadre sur l'Eau du 23 octobre 2000 (DCE, 2000/60/CE) qui a établi un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau d'une manière générale. Cette directive fixe comme objectif général l'atteinte, à l'horizon 2015, d'un bon état écologique et chimique des masses d'eau souterraines et de surface, ces dernières incluant les eaux côtières et de transition (estuariennes en particulier). Cette directive a été récemment mise à jour en 2013 sous le nom DCE 2013/39/EU, elle liste 45 substances (contre 33 substances pour la DCE 2000)

pour lesquelles les émissions doivent être réduites, voire supprimées. Parmi ces substances nous retenons le cadmium, le plomb, le mercure et le nickel qui sont émis par les matériaux de toiture (Robert Sainte, 2009). Nous pouvons citer aussi une autre directive plus récente (Directive 2006/11/CE) du parlement européen et du conseil du 15 février 2006 qui s'intéresse à la pollution causée par certaines substances dangereuses déversées dans le milieu aquatique de la Communauté. Cette directive évoque 9 polluants spécifiques caractéristiques du bon état écologique des eaux non présents dans la DCE tel que le zinc, le cuivre et le chrome. Ces derniers sont aussi émis par les matériaux de couverture.

Au niveau du bâtiment, la Directive Produits de Construction de 1989 (Directive 89/106/CEE, modifiée en 1993 par la Directive 93/68/CEE) présente un ensemble d'exigences par rapport à l'ouvrage construit avec divers produits. Cet ensemble doit en particulier assurer « l'hygiène », « la santé » et respecter « l'environnement » : « l'ouvrage doit être conçu et construit de manière à ne pas constituer une menace pour l'hygiène ou la santé des occupants ou des voisins, du fait (...) de la pollution ou de la contamination de l'eau ou du sol ». Dans ce cadre, un nouveau comité technique (CEN TC 351) a été créé dans le but d'intégrer la problématique de l'« *Emission des substances dangereuses réglementées par les produits de construction* ». Il s'agit de préparer des normes décrivant les méthodes d'évaluation normalisées concernant l'émission et/ou le contenu de substances dangereuses réglementées couvertes par la directive/règlement relatif aux produits de construction en prenant en compte les conditions normales d'utilisation du produit. Elles concernent l'émission dans l'air intérieur, le relargage dans le sol, les eaux de surface et les eaux souterraines et la radioactivité naturelle des matériaux de construction. Ainsi, les documents normatifs sont élaborés pour répondre aux exigences de la Directive européenne 89/106/CEE relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des Etats Membres concernant les produits de construction et au règlement européen (RPC) 305/2011 de même objet.

Caractérisation et quantification des émissions de contaminants par les matériaux de toitures

Durant les vingt dernières années, les travaux sur les émissions des matériaux de toiture se sont focalisés sur la production de données de caractérisation et de quantification de ces émissions. Ainsi, des études expérimentales des processus d'émission à petites échelles

(laboratoire, bancs d'essai) et à l'échelle du toit ont été développées. Ces travaux se sont étendues à l'acquisition de données de flux unitaires moyens annuels d'émission de certains contaminants par certains matériaux. La plupart de ces études se sont focalisées sur l'émission des métaux par les matériaux de rampants¹ métalliques (Verbiest *et al.*, 1999; Odnevall Wallinder *et al.*, 2001; Leuenberger-Minger *et al.*, 2002 ; Bertling *et al.*, 2006).

Récemment, en France, la thèse de Robert-Sainte (2009) a montré une forte contribution des matériaux de toiture dans la contamination métalliques des eaux de ruissellement de Paris et Noisy-le-Grand (France). L'acquisition de données de flux s'est étendue à l'évaluation des émissions des gouttières métalliques. Une autre thèse (Van de Voorde, 2012) a mis en évidence la contribution des pratiques d'entretien des toitures dans l'émission de molécules organiques telles que les biocides et en particulier le benzalkonium dans les eaux de ruissellement de toiture. Ce travail montre des effets toxiques potentiels de cette molécule dans le cas où le milieu récepteur ne permet pas un facteur de dilution important (plan d'eau ou petit ru).

Les données produites à petites échelles spatiales allant des bancs d'essai jusqu'aux toitures restent ponctuelles et ne permettent pas d'appréhender de manière satisfaisante les émissions à l'échelle de la ville.

Les émissions des matériaux de toitures à l'échelle de la ville : quel modèle ?

A l'échelle de la ville, nous nous confrontons à un paysage spécifique et complexe d'utilisation de matériaux de toitures. Une diversité conditionnée par des facteurs liés à la ville, des facteurs historiques, réglementaires, de planification, d'urbanisation... A ce jour, aucune étude spécifique, à part quelque travaux d'évaluation grossière (Thévenot *et al.*, 2007; Gromaire *et al.*, 2011), n'a été menée pour évaluer les émissions de polluants dans les eaux de ruissellement de toiture au niveau d'une ville.

L'émission de contaminants par les matériaux de toiture est un phénomène lié au bâtiment, son évaluation à l'échelle de la ville pose la problématique de changement d'échelle.

Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de développer une *méthode de référence générale d'évaluation des flux de contaminants issus des ruissellements des matériaux de toiture à l'échelle urbaine*.

¹ Rampant : c'est la partie inclinée du toit, elle constitue la plus grande partie de la toiture.

Nous définissons l'échelle urbaine comme une échelle caractérisée par une diversité de modes d'occupation de sol et l'impossibilité d'une description toit par toit à un coût raisonnable.

Cette méthode a pour objet, d'une part, de participer à l'évaluation de l'impact d'une métropole ou d'une zone urbanisée sur l'environnement et, d'autre part, d'orienter les pratiques de gestion et l'utilisation des eaux de ruissellement. Elle permettra d'élaborer des politiques de réduction des émissions des contaminants par les toitures en particulier en agissant sur les plans d'aménagement et d'urbanisation de la ville pour limiter l'utilisation des matériaux émetteurs de contaminants. Enfin, cette méthode orientera les travaux futurs de production de données pour la modélisation à l'échelle urbaine.

Dans le cadre de la thèse de Belmeziti (2012) une approche de changement d'échelle a été développée pour évaluer l'impact potentiel de l'utilisation de l'eau de pluie dans le bâtiment sur les consommations d'eau potable à l'échelle urbaine. Cette approche est basée d'une part sur l'exploitation d'une base de données existante de mode d'occupation du sol en définissant de nouvelles typologies de bâtiments au regard de la récupération de l'eau de pluie. D'autre part, elle est fondée sur quatre principes (distinction, agrégation, majoration, hiérarchisation) permettant de simplifier les différentes étapes de modélisation.

Nous nous inspirons de ce modèle en proposant une méthode basée sur une démarche pluridisciplinaire relevant de disciplines différentes : hydrologie urbaine, urbanisme, architecture, géographie, chimie, sciences humaines et science de l'ingénieur et faisant appel à des outils très différents : une enquête de terrain (des déplacements au sein du site d'étude pour analyser la réalité du terrain), des entretiens auprès de professionnels de la construction et de l'urbanisme, des outils statistiques, des analyses historiques, des études bibliographiques scientifiques et techniques, des systèmes d'informations géographiques ; des études de réglementations et des outils de traitement d'image. Ces outils permettront d'exploiter et d'intégrer des données urbaines existantes (ex : bases d'occupation du sol, base d'images aériennes) et de définir de nouvelles approches sans avoir besoin de faire une description toit par toit, ce qui représente un travail très fastidieux. L'objectif final de cette thèse est de produire une méthode opérationnelle et facilement applicable sur n'importe quel territoire urbain. En d'autres termes, les outils et les approches utilisées dans cette méthode sont accessibles.

Cette démarche est présentée dans ce manuscrit sous la forme de trois grandes parties.

La première partie intitulée « *Les toitures à l'échelle urbaine : un puzzle de matériaux anciens et nouveaux source de contamination* » vise à établir une vision globale des matériaux de toitures utilisés à l'échelle urbaine aussi que de la contamination des eaux de ruissellement des toitures. Ainsi, l'évaluation à l'échelle urbaine nécessite une connaissance approfondie des matériaux : leurs caractéristiques (couleurs, aspect...), les traitements qu'ils ont subis, leurs mise en œuvre sur les différents éléments de toiture (gouttière, noue, rampant...), les réglementations concernées et l'évolution de leur part de marché au cours du temps. Un travail bibliographique est effectué à partir d'une littérature scientifique et technique (ex : brochures des industriels). Ce travail est complété par un aperçu historique de l'évolution des matériaux de toiture (apparition, disparition...). Cette étude historique est croisée avec l'histoire de la morphologie urbaine française et de l'évolution de l'architecture afin de mieux appréhender l'utilisation des matériaux de toitures au niveau du patrimoine bâti. Au niveau de l'émission de contaminant par temps de pluie, un travail bibliographique est indispensable pour repérer les molécules émises.

La deuxième partie intitulée « *Méthodologie de changement d'échelle pour l'évaluation des flux urbains de contaminants issus des toitures* » décrit le développement de la méthodologie générale d'évaluation du flux annuel d'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture à l'échelle urbaine. Tout d'abord, une description de la problématique de changement d'échelle et des approches adoptées pour la résoudre est abordée. Ensuite, une étude du phénomène d'émission d'un contaminant à l'échelle du toit permet d'identifier les différents paramètres influençant l'émission à l'échelle du toit et à l'échelle urbaine et ainsi de créer un moyen de passage entre ces deux échelles. Un travail d'identification des paramètres influençant l'utilisation d'un matériau de toiture à l'échelle urbaine est alors opéré. Il s'agit de définir une échelle intermédiaire entre l'échelle du toit et l'échelle urbaine en découpant celle-ci en zones homogènes en termes de répartition propre des matériaux de toiture. Enfin, pour mieux appréhender la répartition des matériaux de toitures à l'échelle urbaine, des règles empiriques d'identification et de quantification des matériaux des différents éléments du toit sont établies. Notons que la définition des zones homogènes et des règles sont basées sur une enquête et des entretiens avec des experts des matériaux de toiture.

La Partie 2, étant théorique, fait surgir le besoin d'un terrain et d'un contaminant d'étude pour concrétiser et généraliser la méthode à d'autres contaminants et à d'autres terrains d'études.

La troisième partie intitulée « *Calcul pratique du flux d'un contaminant à l'échelle urbaine : Le zinc à Créteil* » s'attache à étudier l'émission du zinc par les matériaux de toiture dans la ville de Créteil. Le choix de la ville de Créteil et du contaminant zinc est effectué selon un ensemble de critères. La ville de Créteil permet de consolider la méthode en appliquant la démarche de changement d'échelle établie dans la Partie 2. De plus, nous avons développé de nouvelles approches de quantification des matériaux de toitures. Ainsi, une méthode statistique de quantification des matériaux des différents éléments de toitures est développée et validée en la comparant à une méthode existante de traitement d'image. De plus, les bases de données urbaines existantes sont utilisées et adaptées pour atteindre notre objectif. Enfin, le calcul du flux du zinc dans la ville de Créteil permettra d'en tirer la méthode générale pratique d'évaluation de flux pour tout contaminant dans n'importe quelle ville. Un certain nombre de principes méthodologiques et de règles concrètes sont élaborés.

« [A]u lieu de ce grand nombre de préceptes dont la logique est composée, je crus que j'aurais assez des quatre suivants, pourvu que je prisse une ferme et constante résolution de ne manquer pas une seule fois à les observer.

Le premier était de ne recevoir jamais aucune chose pour vraie, que je ne la connusse évidemment être telle, c'est-à-dire, d'éviter soigneusement la précipitation et la prévention ; et de ne comprendre rien de plus en mes jugements, que ce qui se présenterait si clairement et si distinctement à mon esprit, que je n'eusse aucune occasion de le mettre en doute.

Le second, de diviser chacune des difficultés que j'examinerais, en autant de pour celles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre.

Le troisième, de conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu, comme par degrés, jusques à la connaissance des plus composés ; et supposant même de l'ordre entre ceux qui ne se précèdent point naturellement les uns les autres.

Et le dernier, de faire partout des dénombrements si entiers, et des revues si générales, que je fusse assuré de ne rien omettre. »

Descartes, le discours de la méthode

PARTIE 1.

**LES TOITURES A L'ECHELLE URBAINE : UN PUZZLE DE
MATERIAUX ANCIENS ET NOUVEAUX SOURCE DE
CONTAMINATION**

*« Les fenêtres s'ouvriraient sur Paris, sur cet océan de maisons aux toits
bleuâtres, pareils à des flots pressés emplissant l'immense horizon »*

Emile Zola, La curée

A l'échelle urbaine voisine une diversité très importante des matériaux de toiture qui mêlent anciens et nouveaux matériaux. Aussi, pour aborder la question des émissions de contaminants par les matériaux de toiture à l'échelle urbaine, il est indispensable d'avoir une liste des matériaux susceptibles d'être mis en œuvre sur les toitures ainsi qu'une liste des contaminants qui sont ou peuvent être émis par les matériaux de toitures.

Dans ce cadre, un grand travail bibliographique a été engagé dans cette [Partie 1](#). Il s'agit d'avoir une vision complète des matériaux de toiture utilisés à l'échelle urbaine et de faire le point sur ce que l'on sait aujourd'hui quant à leurs émissions de contaminants.

Le premier [Chapitre 1.1](#) présente un état des lieux des matériaux utilisés sur les différents éléments de toitures (couvertures et terrasses). Ce chapitre, certes long, mais il présente une vision complète des matériaux de toiture permettant d'une part de découvrir ce domaine et d'autre part de développer notre méthode. Il débouche sur une liste des matériaux potentiellement existants à n'importe quelle échelle urbaine. Une étude existante du marché de couverture a été analysée et a permis de hiérarchiser la répartition des matériaux de toiture à partir de leur vente. Cette étude, effectuée entre 2001 et 2011, montre une stabilité des répartitions des matériaux sur la période d'étude. Néanmoins, au niveau du patrimoine la vision reste incomplète, car à l'échelle urbaine nous trouvons des toitures de bâtiments anciens dont les matériaux ne sont pas les mêmes que ceux utilisés actuellement. Ainsi, dans le [Chapitre 1.2](#), nous étudions l'évolution historique des matériaux de toiture : leur apparition, leur disparition, l'évolution de leur caractéristiques et propriétés (composition, durabilité...). Cette étude a permis de produire un tableau historique général des matériaux de toiture. Il s'agit d'un tableau opérationnel qui pourra être utilisé à n'importe quelle échelle urbaine.

La ville en tant qu'une échelle urbaine présente une urbanisation spécifique qui évolue au fil du temps et qui influence l'utilisation des matériaux de toiture. Ainsi, nous dressons, dans le [Chapitre 1.2](#), l'histoire du paysage urbain Français et nous repérons les moments historiques qui ont marqué les matériaux de toiture.

Le croisement de la liste des matériaux actuels de toiture avec le tableau historique des matériaux et avec l'histoire de l'échelle urbaine permet de créer un filtre permettant de mieux appréhender les matériaux de toiture existants au niveau du patrimoine d'une portion de ville donnée.

Enfin, après avoir cette liste des matériaux, dans le [Chapitre 1.3](#), nous élaborons une étude bibliographique sur les contaminants potentiellement émis ou réellement émis à partir des matériaux identifiés. Nous dressons aussi un tableau des flux annuels moyens de contaminants

évalués dans la littérature. Ces données de flux unitaires seront utilisées dans notre modèle d'évaluation des flux de contaminants à l'échelle urbaine.

Chapitre 1.1. Panorama des éléments de toiture entrant en contact avec l'eau

Ce chapitre dresse, tout d'abord, un panorama des éléments de toiture entrant en contact avec l'eau en différenciant toitures inclinées et terrasses. Pour chaque élément de toit les différents matériaux possibles sont identifiés à partir d'un état des lieux basé sur des documents commerciaux (ex : brochures des produits), ainsi que la consultation des réglementations et des normes (ex : Documents Techniques Unifiés (DTU)). Les différents éléments de toit en fonction de leurs matériaux sont résumés dans un tableau.

Ensuite, nous présentons une étude détaillée des différents matériaux de toiture. L'étude sera faite par famille de matériaux (zinc, tuile...), chaque famille se déclinant elle-même en différentes variétés. En effet, certains matériaux subissent des traitements spécifiques (comme le prélaquage, prépatinage, coloration en masse...) donnant lieu à des matériaux dérivés ayant de nouvelles caractéristiques. Il s'agit donc d'identifier les différentes familles de matériaux ainsi que leurs variétés et leurs utilisations sur les éléments de toitures. Ce travail permettra d'avoir une liste des matériaux potentiellement existants à une échelle urbaine donnée.

Enfin, nous allons présenter deux études de marché des matériaux de couverture ([MSI, 2006](#) ; [MSI, 2012](#)) permettant de présenter une image récente de l'évolution des matériaux de couverture (2001-2011) et d'effectuer une hiérarchisation de l'utilisation de ces matériaux de toiture en France.

Ce travail bibliographique a été enrichi dans le cadre d'un stage master 2 ([Trébalage, 2013](#)).

1. Toiture : Définition - Repères historiques

1.1. Définition

Dans le vocabulaire de la construction, un toit ou une toiture est défini comme l'ensemble des parois supérieures couvrant un édifice et comprenant à la fois la peau étanche dite couverture ou étanchéité et son support mécanique direct appelé charpente ([Roy et Blin-Lacroix, 2002](#); [Paulin, 2003](#)).

D'une manière générale deux grandes catégories de toitures se distinguent, la toiture inclinée et la toiture-terrasse. Ensuite, pour chaque catégorie nous trouvons plusieurs variétés selon

leurs formes et leurs usages. Nous pouvons citer sans exhaustivité (Paulin, 2003), pour les toitures inclinées (pente supérieure à 15%) la toiture à un versant, la toiture à deux versants, en dôme, etc. Pour les toitures-terrasses (pente inférieure à 15%) nous distinguons la terrasse plate (pente comprise entre 1% et 5%), la toiture circulaire (c'est une toiture plate prévue pour la circulation des véhicules), etc. (cf. Figure 1).

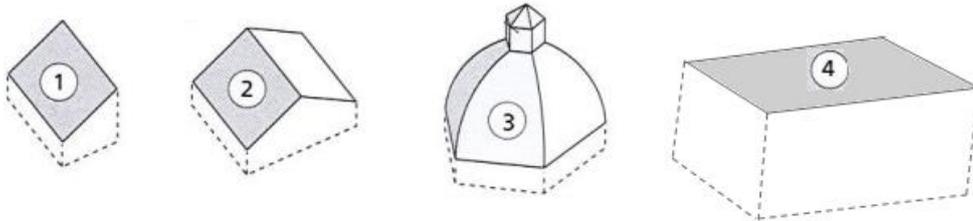


Figure 1 : Exemples des variétés des toitures : 1) un versant; 2) deux versants ; 3) dôme ; 4) terrasse

1.2. Evolution de la forme du toit

Construit par rapport à un axe vertical, le toit traditionnel à double pente, qui a survécu jusqu'au 20^{ème} siècle sans subir de modifications profondes, assurait une fonction d'abri et d'adaptations aux conditions climatiques (AOCDF, 1989).

La toiture représente un enjeu culturel plus vif que celui issu du débat sur la structure. Le problème de la couverture ne s'arrête pas à la seule préoccupation de protéger l'espace habité. La toiture traite des questions plus générales ressortant de l'échelle urbaine et de son caractère extérieur. Le dessin de la toiture exprime l'ordre urbain au même titre que les façades qui délimitent l'espace public qu'est la rue (Mestelan, 2005). Avec l'architecture contemporaine, la toiture a été considérée comme « la cinquième façade ». Les « maîtres du mouvement moderne » en particulier Le Corbusier, expriment une critique radicale du toit à double pente. Imposant un langage à caractère universel à l'architecture, il a été un farouche défenseur de la toiture terrasse (Mestelan, 2005). En 1926, il a défini « les cinq points d'une architecture nouvelle », parmi lesquelles figure, en seconde position, le toit plat utilisé comme terrasse ou comme jardin. Il explique que ce toit a été adopté pour des raisons économiques et de confort. En effet, les pentes des toits représentent de vastes espaces inutilisés et présentent un souci hygiéniste dus aux espaces sombres situés dans les combles. En outre, le mouvement moderne voit que la maison contemporaine doit être claire et ensoleillée : elle doit répondre aux besoins de lumière et d'espace des populations urbaines. De plus, le toit jardin permet de réintroduire la nature et les espaces verts au cœur même de la ville. Il s'agit d'une image de la

ville contemporaine qui serait une immense nappe de verdure masquant les édifices bâtis (AOCDTF, 1989).

Quelques années après ce mouvement, un retour plus au moins affirmé du toit en pentes avec de nouvelles formes architecturales, après le parti pris d'horizontalité des architectes fonctionnalistes (AOCDTF, 1989).

Aujourd'hui, en regardant une ville, il y a une mixité et une diversité impressionnante de formes de toiture (toit plat, toit à double pente, fusion des deux types de toit, coupole...).

1.3. Les premiers types de couverture

Le problème de la couverture est étroitement lié à celui du matériau susceptible d'assurer l'étanchéité de l'intérieur de l'habitation à la pluie et au vent, au soleil, éventuellement au froid. Mais la nature des matériaux, leurs poids, les facilités de fixation qu'ils peuvent offrir sous-entendent une charpente adaptée aux nécessités qui leur sont propres.

Le premier toit est la caverne, une couverture naturelle en pierre. Il s'agit des habitats troglodytiques creusés dans des roches assez tendres pour pouvoir être taillées facilement, mais suffisamment tenaces pour ne pas s'effriter trop rapidement (cf. Figure 2).

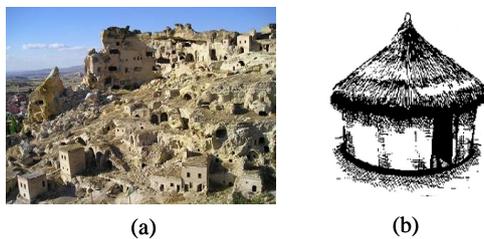


Figure 2 : (a) Habitats troglodytique en Turquie; (b) Couverture en matière végétale

D'autres types de couverture ont été utilisés comme la couverture de peau, des nattes tissées en matière végétale, des tissages en laine de troupeaux. Les plaques d'écorce, les feuilles larges, les tiges de céréales, d'herbes sèches ont été aussi utilisées pour la couverture du toit.

Avec le perfectionnement de la charpente, les couvertures minérales en pierres plates apparaissent. Se développe alors, les couvertures de tuile et d'ardoise. Pour l'ardoise son utilisation dépend principalement de la proximité de carrières de schiste ardoisier ou la facilité du transport. La tuile, par contre, est depuis l'Antiquité, répandue comme élément de couverture de bâtiments nobles (AOCDTF, 1989).

1.4. Les fonctions d'une toiture

Outre sa fonction esthétique, une toiture doit principalement protéger l'habitation et ses occupants des incidences extérieures (précipitations, vent, rayonnement solaire, bruit). La forme triangulaire d'une toiture inclinée lui permet de résister aux vents puissants, d'évacuer facilement les eaux de pluie et de constituer un excellent tampon de chaleur (cf. Figure 3).

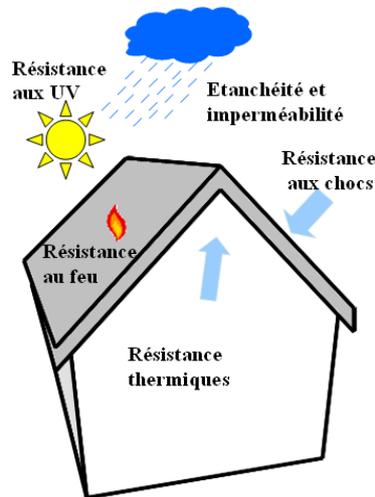


Figure 3 : Schématisation des différentes fonctions de la toiture

Une toiture doit être durable (NF EN 14351-1) en termes de :

- Résistance aux conditions d'exposition : poussière, chocs (orage, grêle, vent...)
- Résistance au feu ;
- Résistance thermique ;
- Résistance aux UV ;
- Étanchéité et imperméabilité.

Ces différentes fonctions sont assurées par les matériaux utilisés dans les toits. Ces matériaux peuvent assurer ces propriétés soit par leurs caractéristiques propres soit en rajoutant des éléments spécifiques dans la composition de ces matériaux.

1.4.1. Fonction esthétique

La fonction esthétique du toit est assurée principalement par le matériau du rampant, par sa forme et sa couleur. Par exemple les toitures métalliques donnent la couleur de leurs matériaux (ex : acier : gris, cuivre : verte...) et se présentent en feuilles métalliques. Dans le

cas des tuiles en béton, des pigments pour la coloration sont rajoutés dans la masse du béton à base d'oxyde de fer (Caumette, 1990).

Pour préserver l'aspect d'une toiture, cette dernière peut être entretenue. Par exemple les toitures en tuiles peuvent être colonisées par des mousses et des algues qui amènent les propriétaires à les traiter par des produits d'entretien à base de biocides (Van de Voorde, 2012).

1.4.2. Résistance au feu

La toiture doit être résistante au feu, cette propriété est assurée généralement par les matériaux non combustibles du toit (ex : tuile). Pour certains matériaux, en particulier les polymères, des additifs sont rajoutés appelés retardateurs de flammes qui limitent la propagation de la flamme dans le matériau (Brossas, 1999; EFRA, 2004). Les principaux types de retardateurs de flammes sont des composés contenant des halogènes (brome et chlore), du phosphore, de l'azote, des minéraux (composés d'aluminium et de magnésium) et d'autres types comme les borates, l'oxyde d'antimoine Sb_2O_3 (EFRA, 2004). Parmi ces composés, nous distinguons les phtalates qui sont des plastifiants utilisés dans les PVC (polychlorure de vinyle plastifié) ayant une excellente résistance à la propagation de la flamme (Verrier, 1992).

1.4.3. Limitation de l'infiltration d'eau

Pour assurer l'étanchéité de la toiture, plusieurs modes sont possibles. Tout d'abord, le rampant assure l'étanchéité par son matériau comme les tuiles, l'ardoise, les feuilles en zinc...Celles-ci doivent être correctement mises en œuvre sur le toit. Au niveau des jonctions de la toiture, l'étanchéité est assurée par des bavettes d'étanchéité, des raccords de pénétration, des solins², des noquets³ et des systèmes d'évacuation des eaux pluviales. Tous ces éléments sont fabriqués à partir de différents types de matériaux : le zinc, le plomb, le cuivre, l'aluminium, l'acier et les polymères comme le PVC. Les étanchéités liquides par résine assurent aussi l'étanchéité.

² Solins : Garnissage en mortier ou en plâtre en forme de talus, recoupé du côté de la tuile et s'amortissant sur la paroi du mur ou de la pénétration

³ Noquets : Ouvrage métallique à relief destiné à raccorder la couverture ardoise avec une pénétration contre un mur ou un tasseau

1.4.4. Résistance aux conditions d'exposition

Les matériaux utilisés dans le toit doivent résister à l'usure sous l'effet des conditions climatiques extérieures. Il s'agit du vent très fort ou des particules ramenées par le vent et la pluie : les grêles, différents solides et des particules fines comme la poussière atmosphérique. D'une manière générale, les matériaux employés sont compacts, solides et résistants (acier, zinc, tuile, ardoise...). Mais au cours du temps et sous l'effet des conditions climatiques, ces matériaux s'usent et perdent progressivement leurs caractéristiques. Par exemple pour les métaux, la corrosion est un processus activé par les conditions atmosphériques générant l'usure du matériau à long terme. Pour cela, dans le cas du zinc, un traitement de surface est effectué pour limiter la corrosion donnant lieu à un nouveau produit prépatiné (ex : anthra-zinc produit Umicore) (Racek, 2007).

D'autres matériaux comme le PVC sont exposés à différents types de dégradations, comme la dégradation par oxydation par l'oxygène de l'air et la déshydrochloruration ce qui rend nécessaire la mise en place de certains stabilisants (Girois, 2004) comme les stabilisants à base de plomb. Certains biocides sont employés comme des adjuvants dans les polymères pour empêcher l'attaque de microorganismes ou bien le développement d'algues ou des mousses (Girois, 2004).

1.4.5. Résistance aux UV

Pour assurer la résistance aux UV, des stabilisants photochimiques communément appelés stabilisants UV (ultraviolet) sont rajoutés à certains matériaux (Carette, 1992). Ils sont employés pour protéger les polymères de la dégradation photochimique causée par les rayons UV. Nous avons dans ce type de stabilisants, les absorbeurs UV qui sont les stabilisants les plus employés dans les polymères (Girois, 2013).

1.4.6. Résistance thermique

Cette propriété est assurée par la partie inférieure du toit (utilisation des isolants thermiques...) qui n'est pas en contact avec l'eau de ruissellement. Elle n'entre donc pas dans le champ de notre étude.

Pour qu'une toiture remplisse ses fonctions, les matériaux utilisés subissent des traitements spécifiques avant la mise en œuvre ou après la mise en œuvre du matériau. Dans la suite du chapitre nous allons repérer et classer les différents matériaux utilisés sur une toiture inclinée ou une toiture terrasse et nous nous focaliserons sur la France comme domaine de recherche.

2. Toiture inclinées

2.1. Description des éléments de toitures inclinées et de leurs principaux matériaux

2.1.1. Éléments de toiture inclinée

Avec sa forme en deux ou plusieurs pans, la toiture se présente comme un ouvrage complexe. Cette complexité vient de sa forme inclinée qui fait appel à plusieurs éléments singuliers⁴ de différentes natures. Ces éléments sont essentiels pour assurer l'étanchéité de la toiture.

La toiture inclinée fait intervenir quatre grandes catégories d'éléments (cf. Figure 4) :

- *Le rampant* : c'est la partie inclinée du toit, elle constitue la plus grande partie de l'ouvrage.
- *Les éléments d'étanchéité* : il s'agit des jonctions entre différents éléments de toit. Nous distinguons alors, des jonctions entre pans de toiture (noue, faîtage, arêtiers et brisures). D'autres assurent l'étanchéité des ouvrages de pénétration tels que cheminée, fenêtre de toit, lucarne et chien assis. Enfin, la rive est un élément de jonction entre un pan et un mur.
- *Les éléments d'évacuations des eaux de pluies* : égout, gouttière et chenaux, descente.
- *Les accessoires* : crochets de fixations des ardoises, chatière, passage de ventilation...

La réalisation de ces éléments singuliers nécessite un travail minutieux pour assurer l'étanchéité et la pérennité de la toiture.

La définition détaillée des différents éléments est en [Annexe 1](#).

⁴. Définition à partir des DTU en particulier **NF P 30-101** : Couverture Terminologie

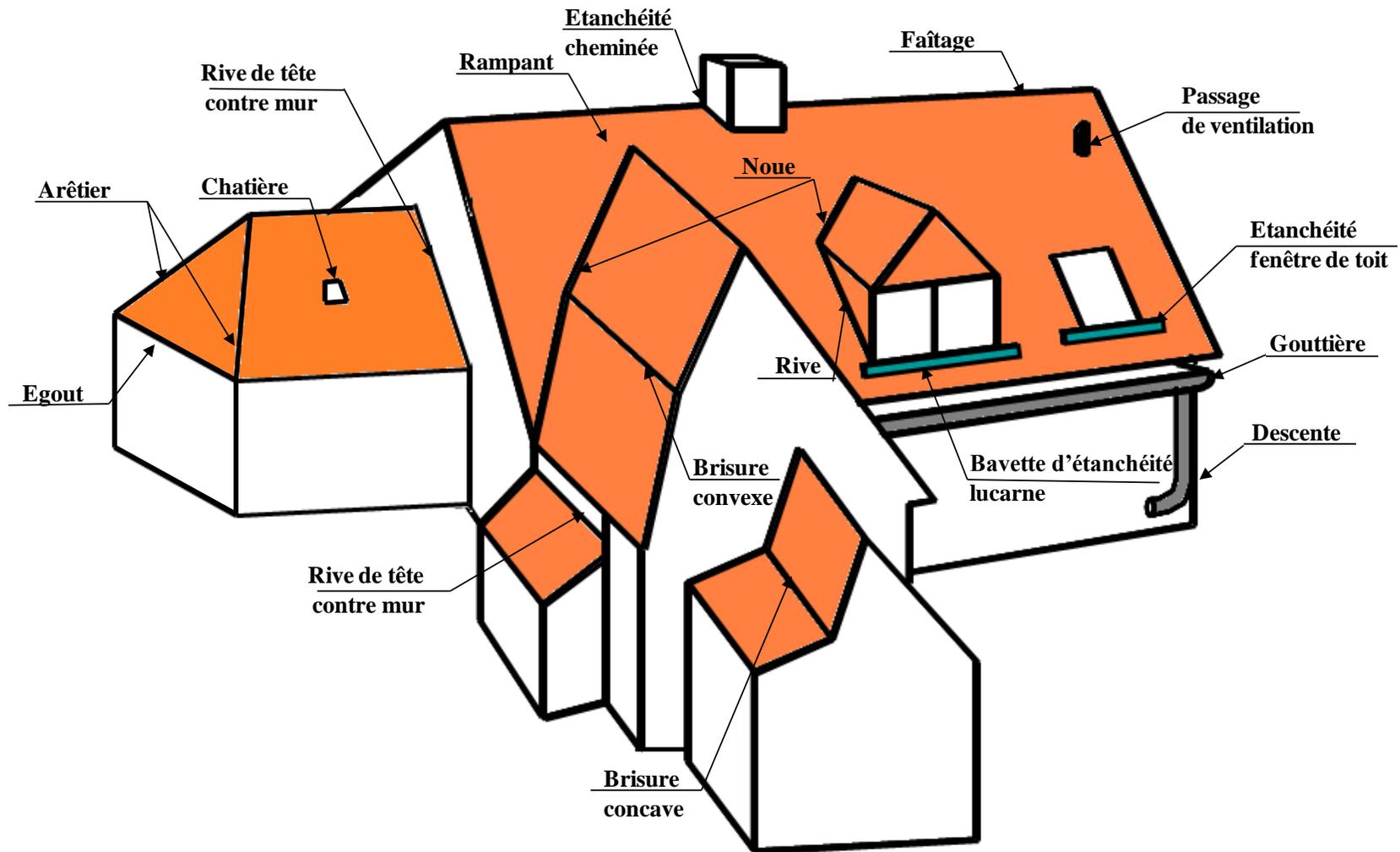


Figure 4 : Terminologie et principaux composants du toit rentrant en contact avec l'eau (NF P 30-101)

2.1.2. Toiture inclinée et matériaux en France

Dans ce paragraphe, nous allons effectuer un aperçu général sur les matériaux de toiture utilisés en France. Pour identifier ces matériaux ainsi que leurs caractéristiques nous avons consulté différents documents :

- *Les DTU (Documents Techniques Unifiés)* : Ils sont des normes de mise en œuvre qui définissent les conditions à respecter dans le choix et la mise en œuvre des matériaux de construction. Ils englobent la grande majorité des matériaux utilisés sur les toitures françaises. Ces DTU évoluent et rentrent en révision tous les cinq ans.

- *Les Avis Techniques* : Ils concernent certains matériaux comme les tuiles métalliques, les toitures plastiques, les toitures-terrasses avec revêtement PVC qui ne figurent pas dans les DTU. Ils expriment l'opinion, formulée après expertise de manière neutre et impartiale par un groupe d'experts, sur l'aptitude à l'emploi d'un produit, composant ou système destiné à la construction.

- *Les études de marché (MSI, 2006 ; MSI, 2012)* : Elles présentent le marché des matériaux de couverture de toits installés lors de la construction neuve ou de l'entretien-rénovation de logements et de bâtiments non-résidentiels traditionnels et industrialisés.

L'étude de marché des matériaux de couverture fournit uniquement des informations sur les matériaux de rampant. Les DTU et les Avis techniques décrivent les grandes familles de matériaux de rampant mais aussi ceux des éléments singuliers. Ainsi, les grandes familles de matériaux de couverture du rampant sont classées comme suit :

- *Des matériaux en grands éléments de couvertures* incluant les couvertures métalliques en acier, zinc, aluminium, cuivre et plomb, les plaques ondulées en fibres ciment, les plaques d'éclairage (PVC, Polyester et Polycarbonate) et les plaques bitumineuses.

- *Des matériaux en petits éléments de couvertures* parmi lesquels nous distinguons les tuiles en terre cuite (canal, plates ou à emboîtement), les ardoises naturelles, les tuiles en béton, les ardoises en fibres ciment, les tuiles métalliques et les bardeaux bitumineux.

Les DTU relatifs à la couverture sont regroupés dans 2 catégories principales (cf. [Tableau 1](#)) : DTU 40 (couverture) et DTU 43 (étanchéités de toitures). Ces DTU sont ensuite divisés en sous-catégories, chacune relative à un matériau spécifique et à sa mise en œuvre (en tant que rampant ou en élément singulier).

La liste des DTU, des normes et des avis techniques considérés dans cette étude est rapportée dans le [Tableau 1](#).

L'étude des matériaux de couverture sur le rampant et les éléments singuliers est faite par famille de matériau.

Tableau 1 : Liste des DTU utilisés relatifs à la couverture

| DTU 40 : Couverture | | | |
|---|--|--|----------------------------|
| Catégorie | N° | Intitulé | Date de publication |
| DTU 40.1 : Ardoise et matériaux divers | 40.11 | Couverture en ardoises | 05 / 1996 |
| | 40.13 | Couverture en ardoises en fibres ciment | 12/2009 |
| | 40.14 | Couverture en bardeaux bitumés | 05 / 1993 |
| DTU 40.2 : Tuiles | 40.21 | Couverture en tuiles de terre cuite à emboîtement ou à glissement relief | 10 / 1997 |
| | 40.22 | Couverture en tuiles canal de terre cuite | 05 / 1993 |
| | 40.23 | Couverture en tuiles plates de terre cuite | 09 / 1996 |
| | 40.24 | Couverture en tuile en béton à glissement et à emboîtement longitudinal | 05 / 1993 |
| | 40.25 | Couverture en tuiles plates en béton | 12 / 1984 |
| DTU 40.3 : Couverture en plaques métalliques | 40.32 | Travaux de couverture en plaques ondulées métalliques | 04 / 1967 |
| | 40.35 | Couverture en plaques nervurées issues de tôles d'acier revêtues | 05 / 1997 |
| | 40.36 | Couverture en plaques nervurées d'aluminium prélaqué ou non | 05 / 1993 |
| DTU 40.4 : Couverture en feuilles et bandes métalliques | 40.41 | Couverture par éléments métalliques en feuilles et longues feuilles de zinc | 06 / 1987 |
| | 40.42 | Travaux de couverture par grands éléments métalliques en feuilles et bandes d'aluminium | 06 / 1965 |
| | 40.43 | Travaux de couverture par grands éléments métalliques en feuilles et bandes d'acier galvanisé | 06 / 1965 |
| | 40.44 | Travaux de couverture par grands éléments métalliques en feuilles et bandes d'acier inoxydable étamé | 12 / 1994 |
| | 40.45 | Travaux de couverture par grands éléments métalliques en feuilles et bandes en cuivre | 05 / 1995 |
| | 40.46 | Travaux de couverture en plomb sur support continu | 09 / 1994 |
| DTU 40.5 | Travaux d'évacuations des eaux pluviales | | 11 / 1993 |
| DTU 43 : étanchéité des toitures | | | |
| Catégorie et intitulé | | | Date |
| DTU 43.1 : Travaux d'étanchéité des toitures-terrasses avec éléments porteurs en maçonnerie | | | 07 / 1994 |
| DTU 43.2 : Etanchéité des toitures avec éléments porteurs en maçonnerie de pente 3-5% | | | 05 / 1993 |
| DTU 43.3 : Mise en œuvre des toitures en tôles d'acier nervurées avec revêtement d'étanchéité | | | 06 / 1995 |
| Normes | | | |
| Catégorie et intitulé | | | Date |
| NF P 37-410 : Chatières à grille métalliques | | | 08 / 1987 |
| NF P 30-101 : Couverture Terminologie | | | 01 / 1948 |
| NF EN 14351-1 : Fenêtres et blocs portes extérieurs pour piétons sans caractéristiques de résistance au feu et/ou dégagement de fumée | | | 06 / 2006 |
| Avis Techniques | | | |
| Titre | | | Date |
| Couvertures en plaques profilées en fibres ciment faisant l'objet d'un Avis Technique- Cahier des Prescriptions Techniques d'exécution (Cahiers du CSTB, Cahier 3297) | | | 11/2000 |

a. Les couvertures métalliques

Les couvertures métalliques sont généralement réalisées à partir de feuilles qui sont des produits plats laminés à froid obtenus à partir d'une bobine et livrés sous forme quadrangulaire (carré ou rectangle). Pour les feuilles de cuivre, aluminium, zinc et aciers, les

techniques de mises en œuvre sont identiques. Nous distinguons les toitures à tasseaux et à joints-debout (cf. Figure 5). Pour les toitures en plomb, les règles de mise en œuvre sont particulières (Moralès, 2005).

Les éléments d'étanchéité et les accessoires : Pour ces toitures métalliques, les *éléments d'étanchéité* sont réalisés avec le *même matériau* que celui utilisé pour *le rampant* dans le but d'éviter les phénomènes de corrosion accélérés liés au contact de deux matériaux de potentiel différent. Ces éléments sont : rives, faîtages et arêtières, noues, égouts et raccords sur pénétration ou étanchéité.

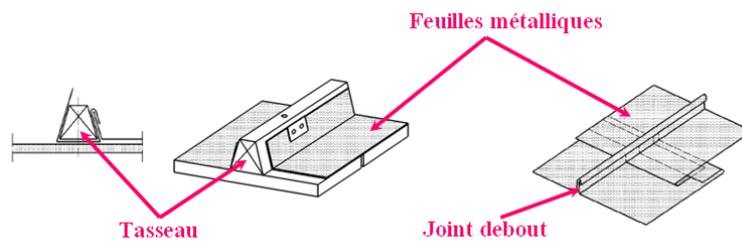


Figure 5 : Toitures métalliques à tasseaux et à joints-debout (DTU 40.3)

b. Les couvertures en ardoises

En tant que petit élément, la couverture en ardoise nécessite plus d'éléments singuliers qui sont soit en ardoises soit en métal. La pose des éléments en ardoise peut se faire en trois modes (cf. Figure 6) : une couverture en modèles carrés posés en diagonale (a), couverture à pureau entier (b), couverture à pureau développé avec un recouvrement longitudinal (c) et enfin, couverture à claire-voie avec recouvrement latéral et écartement des éléments en ardoise (d).

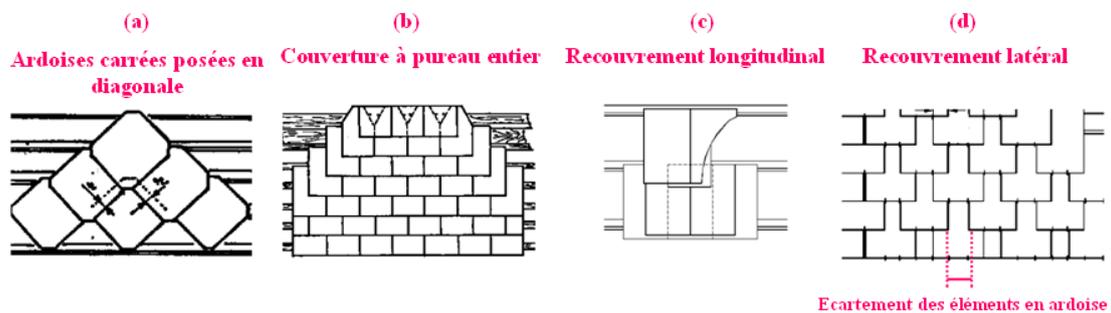


Figure 6 : Les différents modes de couvertures en ardoise (DTU 40.1)

Les éléments d'étanchéité et les accessoires : Les éléments de fixations (clous, crochets) sont des éléments métalliques (zinc, acier inoxydable ou galvanisé, cuivre). Pour les éléments

assurant l'étanchéité tels que la noue, la brisure et la rive, le matériau utilisé pourra être de l'ardoise ou du métal (zinc ou plomb). Les chatières assurant la ventilation sont de divers matériaux : en métaux comme différents aciers ; en plastique résistant. Enfin les autres éléments singuliers sont métalliques.

c. Les couvertures en tuiles

De la même manière que la couverture en ardoise, la couverture réalisée en tuiles utilise des éléments métalliques ou en tuile. En outre, certains éléments singuliers (faîtages, arêtières...) peuvent être réalisés à partir de mortiers (à base de ciment ou de chaux).

La couverture en tuile se présente sous trois formes qui dépendent de la forme de la tuile (cf. Figure 7). Nous distinguons alors les tuiles :

- *Les tuiles canal (a)*, qui sont exclusivement en terre cuite, remontent à l'antiquité, de forme tronconique ou demi-ronde.
- *Les tuiles à emboîtement ou à glissement (b)* existent en deux formats : les grands moules, dont le nombre au mètre carré est inférieur ou égal à 15, et les petits moules. Ces tuiles sont communément appelés tuiles mécaniques, car elles n'ont pas besoin d'élément de fixation.
- *Les tuiles plates (c)*, sont de forme rectangulaire comme les éléments en ardoise.

Chaque forme fait appel à une mise en œuvre spécifique décrite par les DTU 40.2.

Les éléments d'étanchéité et les accessoires : De la même manière que les toits en ardoises, les couvertures réalisées en tuiles utilisent des éléments métalliques ou encore du mortier : elles sont le plus souvent en zinc ou en plomb pour les éléments d'étanchéité.

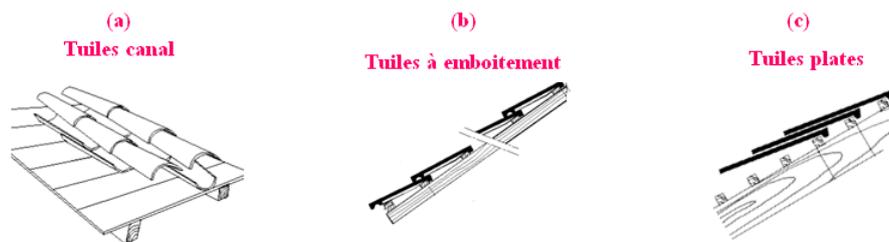


Figure 7 : Les différents modes de couvertures en tuile (DTU 40.2)

d. Les couvertures en bardeaux bitumineux

Les bardeaux sont des matériaux de couverture se présentant sous la forme de plaques semi-rigides de forme (cf. Figure 8), d'épaisseur et de finition variées, se posant de façon traditionnelle par recouvrement. Les différents éléments singuliers sont réalisés soit en bardeaux bitumineux soit en métaux.

Les éléments d'étanchéité et les accessoires : Les éléments de fixation sont soit prévus par les fabricants (dos des bardeaux autocollants, ou apport de colles spéciales), soit des pointes qui sont généralement en acier, en aluminium ou en cuivre. Les éléments d'étanchéité sont souvent des bandes métalliques (ex : plomb) ou des étanchéités à base de bitume.

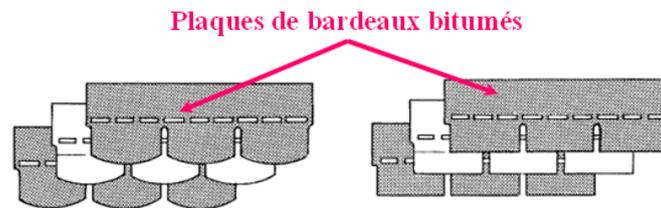


Figure 8 : Disposition des bardeaux bitumineux sur une toiture (DTU 40.14)

e. Les couvertures en plaques

Ces couvertures sont présentes sous forme ondulée (cf. Figure 9). Nous distinguons :

- *Les plaques bitumineuses* relevant de la norme *NF EN 532*. Elles sont destinées à la réalisation de couverture « sèche » (désigne un type de toiture en pente comportant un parement extérieur étanche en acier).
- *Les plaques profilées en fibres ciment* relevant de la norme *NF EN 494*. Elles sont aussi destinées à la réalisation de couverture « sèche » ou de couverture apte à recevoir des tuiles canal (ou d'un type dérivé).
- *Les plaques d'éclairage translucides conformes* à la série de normes *NF EN 1013*. Ces plaques sont au même profil que les plaques en fibres ciment visées par l'Avis Technique concerné. Il ne peut y avoir de plaques d'éclairage en rives de toiture. Elles sont souvent en PVC, en polyester ou en polycarbonate.

Les éléments d'étanchéité et les accessoires :

- *Pour les plaques d'éclairage* : les éléments de fixation, sont des éléments métalliques (aciers, aluminium, plomb) avec une rondelle d'étanchéité spécifique. Des compléments d'étanchéité sont aussi prévus, et doivent être compatibles avec les plaques.
- *Pour les plaques bitumineuses* : Les éléments de fixation sont en métal. Les éléments de faîtage peuvent être du même matériau que la plaque et les étanchéités sont assurées par des cordons de mastic.
- *Pour les plaques en fibres ciment* : Les éléments singuliers sont des éléments métalliques, des mastics, des mousses de polyuréthanes.

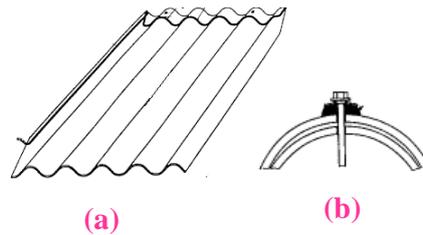


Figure 9 : (a) Forme d'une plaque ; (b) Mode de fixation d'une plaque

f. Les éléments d'évacuations des eaux de pluies

Les éléments d'évacuation des eaux pluviales sont constitués généralement de gouttières et de descentes, avec divers raccords. Les gouttières sont indispensables puisqu'elles permettent une protection des façades des projections sur le sol et évitent aussi un vieillissement prématuré des menuiseries extérieures et des façades.

Les matériaux communément utilisés pour les systèmes d'évacuation des eaux de pluies, tels que les gouttières, accessoires et descentes, sont :

- *Zinc* : largement utilisé en raison de son caractère traditionnel (DTU 40.5).
- *PVC* : économique et facile à poser (Avis Technique n°14+5/04-923)
- *Aluminium (prélaqué)* : présente différentes couleurs (Avis Technique n°5/05-1823).
- *Cuivre* : plus utilisé dans l'Est de la France (DTU 40.5).
- *Acier galvanisé* : il se corrode (DTU 40.5).
- *Acier inoxydable* : un métal durable (DTU 40.5).
- *Plomb* : il s'agit d'anciennes gouttières (DTU 40.5).
- *Fonte* : utilisée pour la partie basse des descentes surtout en ville (DTU 40.5).

g. Synthèse des différents éléments d'une toiture inclinée et leurs matériaux constitutifs

Ce premier travail bibliographique basé sur l'analyse des DTU et les Avis Techniques, nous a permis de dégager un premier tableau *opérationnel* (cf. [Tableau 2](#)) résumant par type de couverture les différents éléments de toiture en fonction de leurs matériaux constitutifs.

Tableau 2 : Les différents éléments d'une toiture inclinée et leurs matériaux constitutifs

| Couverture | | | | | | |
|--|---|--|---|------------------------------------|-------|--|
| Elément de toit | Tuile | Ardoise | Bardeaux bitumineux | Couvertures métalliques | | Plaques |
| Rampant | Tuile | Ardoise | Bardeaux bitumineux | Cuivre, Aluminium, Zinc, Aciers | Plomb | Plaque d'éclairage, plaque en fibres ciment |
| Fixation | - | Zinc, Acier inoxydable, acier galvanisé, Cuivre | Acier galvanisé, Aluminium, Cuivre, Acier inoxydable | - | - | Acier avec bouchon d'étanchéité |
| Faîtage et arêtières | Tuile | Zinc, Acier inoxydable, acier galvanisé, Cuivre, Plomb | Eléments métalliques, éléments en Bardeaux bitumineux | Cuivre, Aluminium, Zinc, Aciers | Plomb | - |
| Noues | Tuile, Zinc, Plomb, Mortier | Ardoise, Zinc, Cuivre, Plomb | Bardeaux bitumineux, Eléments métalliques | Cuivre, Aluminium, Zinc, Aciers | Plomb | Mastic, Mousse de polyuréthanes |
| Egout | Zinc, Mortier (ciment ou chaux), Tuile | Bois, Plâtre, Zinc, Plomb | Bardeaux bitumineux | Cuivre, Aluminium, Zinc, Aciers | - | - |
| Rives | Tuile, Zinc, Plomb, Mortier | Ardoise, Zinc, Plomb | Eléments métalliques, éléments en Bardeaux bitumineux | Cuivre, Aluminium, Zinc, Aciers | Plomb | Plaque en fibres ciment |
| Pénétration | - | Zinc, Plomb | métalliques | Cuivre, Aluminium, Zinc, Aciers | Plomb | - |
| Etanchéité lucarne, passage de ventilation, fenêtre, cheminée | Zinc, Plomb | Zinc, Plomb | métalliques | Cuivre, Aluminium, Zinc, Aciers | Plomb | - |
| Brisures | Tuile, Zinc, Plomb | Ardoise, Zinc, Plomb | | Cuivre, Aluminium, Zinc, Aciers | Plomb | - |
| Chatière | - | zinc, tôles d'acier galvanisées en continu, pré-laquées ou non, tôles d'acier galvanisées à chaud au trempé après façonnage, acier inoxydable, acier inoxydable étamé-plombé, aluminium, cuivre, plomb | | | Plomb | - |
| Ressaut | - | - | - | Cu, Al, Zn, Aciers | - | - |
| Gouttière | Zinc, Cuivre, Acier inoxydable, PVC, Aluminium, Acier galvanisé laqué | | | | | |
| Descente | Zinc, Cuivre, Acier inoxydable, Acier, Fonte, PVC | | | | | |

(-) L'information sur le matériau n'est pas indiquée dans les normes.

2.2. Familles de matériaux et matériau

Les matériaux utilisés dans les différents éléments de la toiture ne se limitent pas aux grandes familles de matériaux (zinc, tuile...) décrites dans le paragraphe précédent 3.1. En effet, ces familles de matériaux se déclinent sous d'autres variétés dans le but de permettre à la toiture de remplir ses fonctions. Par exemple, certains matériaux subissent des traitements spécifiques avant la mise en œuvre donnant lieu à des matériaux dérivés ayant de nouvelles caractéristiques. Ces traitements subis par les matériaux influencent leurs émissions de contaminants par temps de pluie. Ces émissions peuvent être moins importantes que celles du matériau original comme elles peuvent contenir d'autres contaminants issus des traitements subis.

Pour mieux étudier cette grande variété des matériaux de couverture, nous optons pour la classification suivante : *Famille de matériaux et Matériau*.

Une *famille de matériaux* comporte les différentes variétés d'un *matériau* naturel ou initial. Ainsi, la famille tuile comporte la tuile en terre cuite et la tuile béton. La variété peut être obtenue par un traitement spécifique (ex : le prélaquage, prépatinage, coloration en masse...) ou par un changement de la composition du matériau initial. Par exemple, l'acier est une famille de matériaux qui comporte l'acier naturel, l'acier galvanisé (qui a subi une galvanisation par une couche de zinc), acier galvanisé peint (ajout d'une couche de peinture), acier inoxydable (alliage spécifique différents de l'acier naturel).

Le *matériau* est le produit final obtenu à partir du matériau initial présentant des caractéristiques spécifiques suite à des traitements spécifiques ou des ajouts dans la composition du matériau initial.

Le but de ce paragraphe est d'effectuer un état des lieux des différentes variétés de matériaux pour chaque famille de matériaux de couverture ainsi que leurs caractéristiques et les éventuels traitements subis.

2.2.1. Famille des tuiles

Nous distinguons les tuiles en terre cuite (émaillée ou engobée ou siliconée), les tuiles béton, les tuiles métalliques et les tuiles en plastiques. La [Figure 10](#) illustre quelques variétés de matériaux de tuile. Les tuiles en terre cuite sont très durables. En effet, leur durée de vie est d'environ 100 ans.



Figure 10 : (a) Tuiles en terre cuite engobées ; (b) Tuile en terre cuite émaillées ; (c) Tuile béton; (d) Tuile métallique

a. Les tuiles en terre cuite

La France est le premier producteur d'Europe de tuiles en terre cuite (CSTB, 1999; CSTB, 2005). La majorité des constructions est recouverte de tuiles.

La tuile en terre cuite est un mélange cuit d'argile et d'eau. L'agglomérat de grains qui la compose comporte (Lyonnet, 2004a; Techniques de l'ingénieur, 2013a) :

- des cristaux résiduels de quartz, de feldspaths et de mica des roches initiales ;
- mais aussi des nouveaux petits cristaux qui se forment sous l'effet de la cuisson, en l'occurrence : le quartz, mullite, hématite, silicates de calco-aluminium⁵.

Pour la tuile en terre cuite, il existe différentes finitions qui diversifient les variétés de tuiles (cf. Figure 10) : le siliconage, l'engobage et l'émaillage.

- *La tuile siliconée* : L'action du siliconage permet la réduction de la capacité d'absorption d'eau et ainsi de ralentir le développement des microflores (lichens, mousses...) (Lyonnet, 2004b; Techniques de l'ingénieur, 2013b).

- *La tuile engobée* : L'engobage désigne le procédé de coloration en surface de la tuile qui transforme sa couleur rougeâtre d'origine. Il précède toujours l'étape de la cuisson qui permet de lier l'engobe au tessou par effet de céramisation, pour obtenir un revêtement parfaitement homogène. L'engobe, comme l'émail, a des propriétés de durabilité de haute performance : il résiste au gel, aux UV et aux acides (pollution, pluies, etc.) et garantit la stabilité de la teinture dans le temps.

De manière générale, les engobes sont constitués de 4 types de composants chimiques (Lyonnet, 2004a; Techniques de l'ingénieur, 2013a) :

⁵ www.francaise-tuiles-briques.fr

- des argiles de base, un élément fondant : la fritte dont la fonction est de garantir la liaison entre les différents éléments de l'engobage et le tesson de la tuile ;
- des oxydes tels que l'oxyde de titane (couleur blanche ou jaune), l'oxyde de fer (pour renforcer la couleur rouge), l'oxyde de manganèse (couleur noire), etc. ;
- de l'eau, qui permet l'application des différents composants solides de l'engobe.

La grande différence avec l'émail est que l'engobe contient beaucoup plus d'argile dans sa composition qu'un émail. L'engobe a aussi la propriété d'être souvent un bon support pour les végétaux, contrairement à l'émail.

- *La tuile émaillée* : L'émaillage est un procédé de fabrication consistant à déposer sur la tuile une couche vitreuse, transparente ou colorée. A la différence de l'engobage, la tuile émaillée est ensuite soumise à une température d'environ 800 °C. Cette couche vitrifiée dure, lisse et non poreuse, confère à la tuile une protection exceptionnelle contre le développement des algues. Les tuiles émaillées ont une grande durabilité, une grande résistance aux rayures et aux agents chimiques, et sont faciles à nettoyer (Lyonnet, 2004a; Techniques de l'ingénieur, 2013a).

L'émail est composé d'une substance vitreuse composée, notamment, de silice, de feldspath (minéral à base de silicate double, d'aluminium, de potassium, de sodium ou de calcium), de kaolin (argile blanche) et d'oxydes métalliques pour la coloration tels que l'oxyde de fer (couleur bleue ou brune ou noire), l'oxyde de chrome (couleur le verte ou rose), l'oxyde de cuivre (couleur verte ou rouge ou bleu), etc.

b. Les tuiles béton

Les tuiles en béton, qui figurent dans la liste des matériaux de couverture les plus répandus, se composent de ciment, de sable, de pigments (ex : oxyde de fer) et d'eau (cf. Figure 10). Ces composants sont mixés puis extrudés ou pressés dans des moules pour donner forme à des tuiles en béton (Ramani et Whittier, 2012). Une couche d'acrylique est souvent appliquée pour une meilleure résistance aux intempéries (Société Eternit). La couverture en tuile béton a une durée de vie estimée à plus de cinquante ans⁶.

Les tuiles béton sont plus lourdes que les tuiles en terre cuite, entraînant un vieillissement plus rapide de la charpente. Par ailleurs, leur apparence est jugée par beaucoup d'utilisateurs comme moins esthétique que celle des tuiles en terre cuite, et leur vieillissement est souvent variable. En effet, ces dernières tendent à se décolorer sous l'effet des UV et des intempéries.

⁶ <http://www.tuiles-beton.com/>

Toutefois, les tuiles béton constituent une alternative économique aux tuiles en terre cuite, avec un coût d'achat 15% à 20% moins élevé (Bresson, 2006).

c. Les tuiles métalliques

Les tuiles métalliques ou panneaux tuiles métalliques désignent des supports profilés en acier galvanisé et prélaqué, protégés par des enduits et revêtus d'une finition acrylique¹⁷ (cf. Figure 10). Il s'agit de plaques en acier en forme de tuile. L'utilisation de ce type de matériau est marginale en ville. Elles sont plutôt utilisées en montagne ou en zone littorale⁷ car elles résistent bien aux conditions climatiques agressives de ces zones (ventées, fortement pluvieuses, ou neigeuses). Les tuiles métalliques sont aussi utilisées dans le renouvellement des bardeaux bitumineux ainsi que des plaques en fibres ciment (MSI, 2006). Il s'agit d'ajouter un lattage sur les bardeaux existant (sans les enlever) puis de placer les tuiles métalliques au dessus (Entretien du 08/10/2012 avec M. Normand ingénieur qui a travaillé sur l'instruction des Avis Techniques au CSTB).

La couverture en tuiles métalliques a une durée de vie estimée au minimum 40 ans en fonction des conditions atmosphériques⁸.

d. Plaques imitation tuile en plastique

Aujourd'hui sur le marché des matériaux de couverture de nouveaux produits de tuile en matière plastique sont apparus. Elles se caractérisent par une rapidité et facilité de pose mais moins durable (20 ans environ)⁹.

2.2.2. Famille des ardoises

La famille des ardoises comporte deux variétés : l'ardoise naturelle et l'ardoise en fibres ciment.

a. L'ardoise naturelle

L'ardoise est une roche (le phyllade) appartenant à la famille des schistes. Elle a comme particularité une structure lamellaire entièrement orientée dans un même plan. La roche est débitée en plaques de faibles épaisseurs dans lesquelles sont découpés des éléments de couverture (cf. Figure 11). Les ardoises sont dans la plupart du temps de couleur gris-bleu (CERTU, 2003).

La couverture en ardoise a une durée de vie de 100 ans (MSI, 2006).

⁷ <http://produits-btp.batiproduits.com/Ahi-Roofing/Gerard-Classic/fiche/r?id=1342597047>

⁸ <http://www.abiatex.com/pdf-web/spany.pdf>

⁹ <http://www.toiturelegere.fr/plaques-imitation-tuiles-xsl-342.html>



Figure 11 : Élément en ardoise

b. L'ardoise en fibres ciment

L'ardoise en fibres ciment est une imitation de l'ardoise naturelle (cf. Figure 12). C'est un matériau moins cher constitué d'un mélange de ciment et de fibres. Avant 1997, les fibres étaient en amiante. Le terme amiante désigne une série de fibres minérales naturelles appartenant aux groupes minéralogiques des serpentines ou amphiboles. Le Chrysolite (amiante blanc) représente la variété la plus répandue (Brondeau *et al.*, 2009 a; Brondeau *et al.*, 2009 b).



Figure 12 : Ardoise en fibres ciment blanchie

Aujourd'hui, après l'interdiction de l'amiante, l'ardoise en fibres ciment est constituée d'un mélange de ciment sans amiante, de fibres organiques (comme de la cellulose), d'additifs minéraux et d'eau. De plus, elles sont colorées dans la masse mais arborent une couche de peinture à base d'acrylique (Cembrit, 2012 ; Eternit, 2013).

L'ardoise en fibres ciment est moins durable que l'ardoise naturelle avec une durée de vie de 15 ans (MSI, 2006). En vieillissant elle blanchit et pâlit et parfois se décolore entièrement.

2.2.3. La famille Plomb

Le plomb est un métal argentifère qui est extrait des minerais de galène¹⁰ et cérusite¹¹. Les anciens cherchaient plutôt l'argent, alors que le plomb n'était qu'un résidu. Il a été obtenu en

¹⁰ La galène est une espèce minérale composée de sulfure de plomb de formule PbS

¹¹ La cérusite est une espèce minérale composée de carbonate naturel de plomb de formule (PbCO₃)

traitant les sulfures de plomb argentifères (Lebouteux, 2000; Lebouteux, 2007). Utilisé à ses débuts comme toiture à part entière (plomb coulé sur sable, bande de plomb étamé) (cf. Figure 13). Aujourd'hui, le rampant en plomb est rarement utilisé sauf sur quelques bâtiments prestigieux. Il est plus utilisé en tant qu'élément d'étanchéité de toiture inclinée. Il se décline maintenant sous forme de bande de plomb laminé, plissé, ou même laqué (coloration proche des tuiles en terre cuite par exemple). La durée de vie d'une couverture en plomb peut aller jusqu'à 200 ans (MSI, 2006).



Figure 13 : Toiture ancienne de la Cathédrale El Burgo d'Osma (Espagne) en plomb

2.2.4. Famille cuivre

Les utilisations du cuivre en couverture portent principalement sur les bâtiments d'équipements dans des secteurs tels que l'éducation, la santé ou la culture. Les hôpitaux, les groupes scolaires ou les médiathèques sont des exemples plus spécifiques où le cuivre sert de couverture (MSI, 2006). Le cuivre peut couvrir des formes à double courbure comme la coupole (cf. Figure 14). Le progrès du laminage et de nouveaux alliages ont permis son emploi même pour les couvertures de maisons de particuliers (Lebouteux, 2000). Aux débuts de son utilisation, beaucoup d'impuretés étaient présentes dans l'alliage du cuivre (comme l'arsenic, élément chimique nocif). Ce métal est aussi utilisé pour les accessoires : tuyaux de descente, gouttières, chéneaux, noues, bandes de rive, solin, couverture de mansardes, avant-toit, entablement, marquises, loggia, etc. Une toiture en cuivre a une durée de vie de plus de 100 ans (MSI, 2006).

Les différentes variétés du cuivre sont (CICLA, 2013) :

a. Le cuivre Cu-b (Cu-DHP)

C'est le cuivre (exempt d'oxygène) qui est le plus utilisé aujourd'hui, car il ne contient aujourd'hui qu'environ 0,3 % de phosphore résiduel et peu d'impuretés.

b. Le cuivre allié

Plusieurs alliages sont disponibles comme les alliages cuivre/étain, cuivre/bronze, cuivre/alumine, cuivre/zinc. Ces alliages permettent ainsi une large gamme de cuivres de différentes couleurs.

c. Cuivre prépatiné ou oxydé

Le cuivre naturel subit un traitement de surface à base de chlorure de sodium (Na Cl) et nitrate de cuivre (CuNO_3). Ce matériau est de plus en plus populaire.



Figure 14 : Toiture en cuivre

2.2.5. Famille zinc

Le zinc est un élément naturel extrait du minerai de la blende. Un processus métallurgique, comprenant le grillage de la blende, la réduction de l'oxyde de zinc obtenu et le raffinage par électrolyse, permet l'obtention du zinc utilisé dans la construction. Les feuilles, bobines et rouleaux destinés à la fabrication des produits courants découlent du laminage à chaud (site VMZINC).

Le zinc est un matériau durable ayant une durée de vie entre 40 et 50 ans (MSI, 2006).



Figure 15 : Toiture en zinc

La [Figure 15](#) présente le profil des plaques en zinc. Le zinc naturel est formé par un alliage normalisé comprenant du cuivre, du titane et de l'aluminium. Ce produit subit des traitements de surface et des ajouts en masse pour obtenir de nouvelles variétés de zinc. Toutes les

informations sur les variétés du zinc sont recueillies du site de VMZINC. Ainsi, nous pouvons classer les variétés du zinc comme suit :

a. Le zinc naturel allié (Zn-Cu-Ti-Al)

Il s'agit d'un alliage zinc-cuivre-titane-aluminium décrit selon la norme NF EN 1179 (septembre 2003). C'est un alliage présentant un degré de pureté élevé de 99,995% de zinc avec une addition de :

- titane : min 0,06 % - max 0,2 %
- cuivre : min 0,08 % - max 1,0 %
- aluminium : max 0,015 %

b. Le zinc prépatiné

C'est du zinc naturel qui a subi un traitement de surface. Le premier zinc prépatiné a été lancé par la filiale VMZINC. Cette patine protectrice grise est un traitement chimique de phosphatation. Sa protection est assurée par un recouvrement sur les deux faces d'une résine organique mince. Le zinc prépatiné est associé avec les toitures en ardoise et en lauze, il est utilisé notamment pour les accessoires d'évacuations d'eaux. Nous distinguons deux types de prépatinage produits par VMZINC (cf. Figure 16) :

- Quartz-zinc : Il s'agit d'un zinc prépatiné gris velours avec un aspect similaire au zinc naturel après quelques mois d'exposition à l'air.
- Anthra-zinc : Il s'agit d'un zinc anthracite qui se marie bien avec l'ardoise à laquelle il est très souvent associé.

c. Autres variétés du zinc

- Zinc bi-laqué : Ce zinc est obtenu par l'application d'une laque polyester de 25 microns polymérisée au four.
- Le zinc coloré en masse : Le zinc coloré en masse est produit par VMZINC sous la marque PIGMENTO avec différentes teintes : rouge terre, vert lichen, bleu cendre, du zinc coloré avec une nouvelle couleur brun écorce.
- Le zinc allié au cadmium : L'alliage du zinc au cadmium a donné un matériau qui en s'oxydant donne un revêtement gris bleuté. Mais depuis 1992, le cadmium a été abandonné, car il est considéré comme un élément chimique nocif. La composition de ce zinc est mal connue à ce jour puisqu'il a été utilisé avant l'apparition de la normalisation en 1983 (d'après entretien Expert VMZINC).



Figure 16 : L'aspect de surface des différents produits de zinc de gauche à droite : zinc naturel, quartz-zinc et anthra-zinc

2.2.6. Famille des aciers

L'acier ou plutôt les aciers sont des alliages de fer et de carbone, dont la teneur en carbone peut varier de 0,002% à 1% (ECCA, 2012). Nous regrouperons dans la famille acier : l'acier inoxydable, les tôles d'acier galvanisé ou les tôles ondulées, les tôles d'acier électro-zinguées et laquées ou bac acier. Les plaques d'acier sont disponibles sous différents profils (cf. Figure 17). La durée de vie d'une couverture en acier est d'environ 100 ans (MSI, 2006).

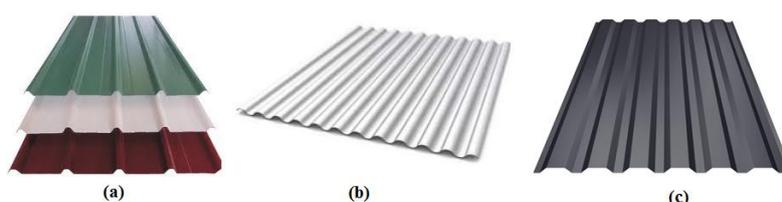


Figure 17 : (a) Profil nervuré; (b) Profil ondulé; (c) Profil trapézoïdale

a. L'acier inoxydable

Les aciers inoxydables sont des aciers alliés avec du chrome, supérieur ou égal à 10,5%, qui provoquent la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome. D'autres éléments d'alliages peuvent être ajoutés, tels que le cuivre, le titane, le nickel, etc. (Invernizzi, 2000). Ces alliages sont communément appelés « *aciers inoxydables duplex* ».

- *Les aciers inoxydables duplex* : Dans l'Annexe 3 figurent les compositions chimiques des cinq groupes d'aciers duplex de seconde génération (Stainless et Pittsburgh, 2011; Nickel, 2012):

- Lean duplex : sans addition de molybdène (Mo) ;
- Duplex standard : représente 80% des usages ;
- Duplex : avec 25% chrome (Cr) ;
- Superduplex : avec 25-26% Cr à teneur accrue en Mo et en azote (N) ;
- Hyperduplex (Années 2000) : aciers inoxydables fortement alliés.

- *L'acier inoxydable laqué* : Afin de garder l'aspect de la surface, l'acier inoxydable peut subir des revêtements de peintures ou vernis acrylique-polyuréthane à haute performance (Invernizzi, 2000).

- *Les aciers UGINOX FTE et UGINOX AME* : Les aciers ferrite UGINOX FTE sont stabilisés au Titane à 17% (EN 1.4510). L'acier inoxydable austénitique UGINOX AME est étamé avec Molybdène (EN 1.4404), UGINOX FTE et AME (cf. Annexe 4) peuvent être utilisés dans une couverture à tasseaux, à joints debout et en accessoires de couverture, ils sont également employés dans la couverture autoportante sous forme de profils et panneaux sandwich. (UGINE, 2002; Arcelor, 2002). L'acier inoxydable supporte le contact avec le zinc, l'aluminium, le plomb et le cuivre, les mortiers, le plâtre, le bois, l'asphalte ainsi que d'autres matériaux.

b. Acier galvanisé

L'acier galvanisé est recouvert d'une couche de zinc qui ne contient pas trop d'impuretés ce qui le protège des corrosions pour de nombreuses années. Dans les premiers temps, les tôles de fer étaient trempées dans un bain de zinc liquide, ce qui produisait une couche de zinc relativement épaisse (Lamesch, 2004).

Nous distinguons deux types d'acier galvanisé : l'aluzinc et le galvan. L'aluzinc est produit par une filiale d'Arcelor, son revêtement est composé de 55% d'aluminium, de 43,5% de zinc et de 1,5% de silicium. Ce revêtement s'utilise en majorité pour des tôles de couverture et de bardage de halls métalliques. Il est garanti de non déformation pour une durée de 20 ans. Le galvan est recouvert de 95% de zinc, allié à 5% d'aluminium avec des traces de mischmetal. Le galvan permet à la tôle de subir des déformations sévères sans se fissurer. Il constitue également une excellente base pour le prélaquage (Lamesch, 2004).

c. Acier prélaqué

En pleine expansion, par sa gamme diverse en termes de coloris, l'acier prélaqué présente un revêtement organique (peinture). Il s'agit d'une couche de finition composée de (Mathieu et Hellouin, 2008; ECCA, 2012) :

- Liants (ou résines) dont la nature chimique est la suivante :
 - Polyesters (les plus souvent utilisés) ;
 - Polyuréthanes :
 - PVDF (poly fluorure de vinylidène);
 - PVC (polyvinyle de chlorure) ;
- Pigments ;

- Solvants ;
- Additifs¹² qui contribuent notamment à l'homogénéité et à la stabilité de la peinture ; (moins de 1 % du poids total de la peinture)

2.2.7. Famille aluminium

La famille aluminium comporte deux principales variétés : les alliages d'aluminium et l'aluminium laqué (Lebouteux, 2000). La durée de vie d'une couverture en aluminium est plus de 100 ans.

a. Les alliages d'aluminium

Des ajouts à l'aluminium rendent ce matériau plus résistant et utilisable en couverture : nous pouvons prendre l'exemple de l'alliage d'aluminium contenant du cuivre et du magnésium ; ou encore l'alliage d'aluminium avec 13 % de silicium affiné au sodium.

b. L'aluminium prélaqué

Le principe de l'aluminium prélaqué est le même que celui de l'acier prélaqué (ECCA, 2012). Il est donc en concurrence avec l'acier prélaqué.

2.2.8. Les bardeaux bitumeux

Les bardeaux bitumeux sont des matériaux de couverture se présentant sous la forme de plaques semi-rigides de forme, d'épaisseur et de finition variées (cf. Figure 18), se posant de façon traditionnelle par recouvrement.



Figure 18 : Exemple de bardeaux bitumeux

Ils sont constitués d'une armature de voile de verre enrobée de bitume protégé par des paillettes d'ardoise ou des granulés céramiques ou encore protégé par une feuille de cuivre. La durée de vie des bardeaux bitumineux est limitée à 25 ans (MSI, 2006).

¹² Les additifs, également appelés adjuvants, confèrent diverses propriétés au film ou à la peinture. Ils contribuent notamment à l'homogénéité et à la stabilité de la peinture. Les additifs sont introduits en faible quantité (moins de 1 % du poids total de la peinture), mais leur rôle est souvent essentiel.

2.2.9. Famille plastique

Sur le rampant les plaques d'éclairage translucides sont posées en complément de grands éléments de couverture (cf. Figure 19). Ces plaques laissent passer la lumière du soleil pour offrir un éclairage naturel des bâtiments (Onduline, 2002). Les matériaux plastiques utilisés en couverture sont essentiellement à base de résines synthétiques. Certaines matières sont pratiquement constituées de chlorure de polyvinyle pur, excepté les pigments et les stabilisants qui sont ajoutés en cours de fabrication. Le chlorure de polyvinyle (PVC) est une résine synthétique, de la grande famille des matières plastiques. Alors que d'autres sont composées de résines polyesters ; c'est-à-dire d'une matière plastique thermodurcissable, armée d'un mat de fibre de verre. Elles sont éventuellement munies d'un renforcement en fil de nylon (Emery et Sentier, 1970). Nous distinguons différentes variétés de plastique : le polyester, le PVC, le polycarbonate et le PMMA.

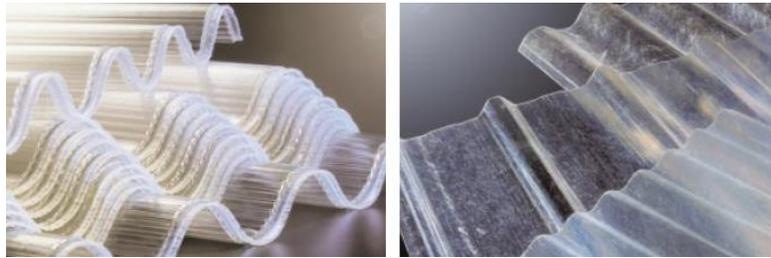


Figure 19 : Exemple de plaques en plastique (Onduline, 2002)

a. Polyester

La résine de polyester armée de fibres de verre est le premier matériau de synthèse à être apparu sur le marché de l'éclairage. Le polyester est composé d'une résine polyester thermodurcissable renforcée de fibres de verre (Onduline, 2002).

b. Le PVC

Le PVC (chlorure de polyvinyle) se constitue de deux matières premières : le sel, matière naturelle abondante qui représente 57% de sa composition puis des dérivés du pétrole à 43%. Comme c'est le cas pour toutes les matières plastiques, un raffinage est effectué afin de transformer le pétrole en carburant. Ces résidus sont ensuite récupérés et employés pour la fabrication. Le PVC est arrivé plus récemment sur le marché des produits d'éclairage, après le polyester, offre une transparence, avec la légèreté des produits de synthèse (Onduline, 2002). Cette résine permet d'obtenir un classement de réaction au feu M1 (Onduline, 2002). Le PVC est la troisième matière plastique la plus utilisée au monde dont la majeure quantité est consommée dans le bâtiment (Forum PVC, 2010).

Le cycle de vie est estimé long ; il est d'environ 40 à 50 ans (Saykali, 2012).

c. Polycarbonate

Les plaques polycarbonates constituent la troisième génération des produits d'éclairage de synthèse. Elles présentent une résistance aux impacts, de bonnes propriétés mécaniques, une bonne stabilité thermique et un classement de réaction au feu M1 (Onduline, 2002).

d. PMMA

Le polyméthacrylate de méthyle, PMMA, est issu de la polymérisation du méthacrylate de méthyle. Il s'agit d'un thermoplastique transparent employé récemment dans quelques types de couvertures (Pardos, 2013).

2.2.10. Plaques bitumineuses

Les plaques bitumineuses sont des plaques ondulées, composées de fibres cellulosiques imprégnées de bitume, avec généralement une adjonction de résine thermodurcissable et de pigments et, pour le haut de gamme, de peinture de surface. Le support nécessaire à la pose des plaques bitumineuses est coûteux, ce qui rend ce matériau moins compétitif (elles sont concurrencées par les couvertures en aciers) (MSI, 2006).

2.2.11. Plaques en fibres ciment

Les plaques sont composées de la même manière que les ardoises en fibres ciment (cf. Figure 20) seul le pourcentage massique des composants change. Les égouts et les évacuations peuvent être en plastique (PVC) ou métalliques (Eternit, 2007). Les plaques en fibres ciment ont une longévité de 50 ans (MSI, 2006).



Figure 20 : Exemple de plaque en fibres ciment

2.3. Synthèse : Les familles des matériaux et leurs variétés

Cet état des lieux sur les familles des matériaux et leurs variétés montrent une diversité très importante. Nous avons résumé ces matériaux dans le [Tableau 3](#).

Tableau 3 : Les familles des matériaux et leurs variétés utilisées sur les différents éléments d'une toiture inclinée

| Famille de matériau | Matériau |
|--|--|
| Acier | Naturel |
| | Inoxydable |
| | Galvanisé |
| | Prélaqué |
| Aluminium | Les alliages d'aluminium : - Alliage Cu et Mg - Alliage de silicium affiné au sodium |
| | L'aluminium prélaqué |
| | |
| Ardoise | Naturelle |
| | Fibres ciment |
| | <i>Amiante</i> |
| Bardeaux bitumeux | Bardeaux bitumeux |
| Bitume | Bitume |
| Cuivre | Cu-b (Cu-DHP) |
| | Le cuivre allié |
| | Cuivre prépatiné |
| Matériaux en fibres ciment | Fibres ciment |
| | <i>Amiante</i> |
| Plastique | Polyester |
| | PVC |
| | Polycarbonate |
| | PMMA |
| Plomb | Plomb |
| Tuile | Terre cuite |
| | Terre cuite engobée |
| | Terre cuite émaillée |
| | Terre cuite siliconée |
| | Béton |
| | Métallique (acier laqué) |
| | Plastique |
| Zinc | Naturel allié (Zn-Cu-Ti-Al) |
| | Prépatiné |
| | Bi-laqué |
| | Coloré en masse |
| | Allié au cadmium |
| <i>Amiante : c'est un matériau qui n'existe plus sur le marché (interdit en 1997).</i> | |

D'après ce tableau, certains matériaux sont toujours existants sur le marché alors que d'autres ont disparus comme l'amiante mais qui sont toujours présents sur des toitures anciennes. En termes de marché ces variétés sont très différentes, certaines présentent de grandes parts de marché, d'autres sont limitées. Nous traitons cette variabilité de parts de marché dans la [Section 4](#).

Ce travail d'identification des matériaux des différents éléments d'une toiture inclinée nous permettra d'identifier les matériaux potentiellement existants sur les toitures d'une échelle urbaine donnée.

3. Toiture-terrasse

Une *toiture-terrasse* est définie principalement par une pente inférieure à 15% (Roy et Blin-Lacroix, 2002; Paulin, 2003).

3.1. Description et fonctions des éléments de toiture-terrasse

Les toitures-terrasses sont composées essentiellement de quatre éléments (ANAH, 2012; CERTU, 2003; Remolu et Lauby, 2007) (cf. Figure 21) :

- *l'élément porteur* : il a pour rôle de supporter les charges de la toiture. Les matériaux de base de cet élément de structure sont : le béton, le bois ou l'acier ;
- *le support d'étanchéité* : il est destiné à recevoir le revêtement d'étanchéité ;
- *le revêtement d'étanchéité* : il est destiné à assurer l'étanchéité à l'eau.
- *la protection de l'étanchéité* : elle peut être directement incorporée au revêtement d'étanchéité ou rapportée.

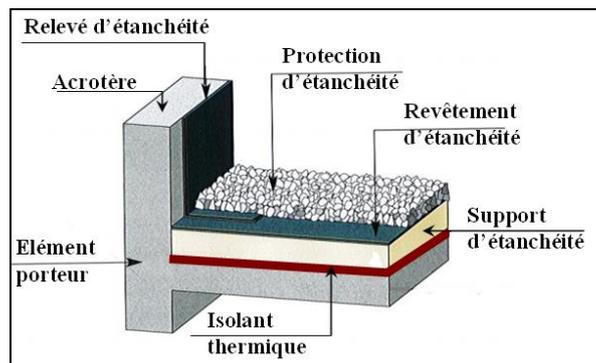


Figure 21 : Composition d'une toiture-terrasse (Remolu et Lauby, 2007)

A ces ouvrages principaux s'ajoutent selon le cas, des éléments ayant des rôles spécifiques tels que :

- *l'isolation thermique* : (pare vapeur (éviter l'humidité) + isolant thermique)
- *l'acrotère* : muret en bord de toiture situé dans le prolongement de la façade qui sert d'appui au relevé d'étanchéité

De tous ces ouvrages, les principaux éléments entrant en contact avec les eaux de ruissellement sont *la couche de surface du revêtement d'étanchéité* et *la couche de protection*.

3.2. Classification des terrasses

D'après l'Agence nationale de l'habitat (ANAH), les toitures-terrasses peuvent être distinguées selon deux critères principaux : leur *destination* et leur *pente* (ANAH, 2012; Remolu et Lauby, 2007).

La destination de la terrasse est le plus important paramètre (choix du maître d'ouvrage) et conditionne le choix de la plupart des autres paramètres. Par exemple, une terrasse accessible au piéton, nécessite un élément porteur en maçonnerie et une protection lourde dure. Nous distinguons cinq variétés :

- terrasse inaccessible (sauf pour entretien) ;
- terrasse accessible aux piétons ;
- terrasse accessible aux véhicules légers ou lourds ;
- terrasse technique (accueillant des équipements et comportant des accès aux zones de travail nécessaires aux interventions d'entretien ou de réparation) ;
- terrasse jardin (à végétation intensive ou extensive).

La pente est fonction des différents paramètres (composition de la toiture-terrasse, destination). Nous distinguons trois variétés :

- terrasse rampante de pente comprise entre 5% et 15% ;
- terrasse plate de pente comprise entre 1% et 5% ;
- terrasse à pente nulle (pente inférieure à 1%).

3.3. Matériaux des éléments entrant en contact avec l'eau

Les seuls éléments intéressants pour notre travail sont ceux qui entrent en contact avec les eaux de ruissellement, à savoir : *la couche de surface du revêtement d'étanchéité* et *la couche de protection*. En conséquence, les autres éléments de la toiture-terrasse ne seront pas abordés.

3.3.1. Revêtement d'étanchéité

Le revêtement d'étanchéité joue un rôle très important pour éviter l'infiltration de l'eau à l'intérieur du bâtiment. Nous distinguons quatre grandes familles d'étanchéités utilisées pour la réalisation des toitures-terrasses (ANAH, 2012; CERTU, 2003) : les étanchéités coulées en asphalte, les membranes d'étanchéité bitumineuses, les membranes d'étanchéité synthétiques

et les systèmes d'étanchéité liquide (SEL) ou encore résines. Ces revêtements peuvent se présenter en monocouche, en bicouches ou plus.

a. Asphalte

L'asphalte est un revêtement d'étanchéité liquide coulé sur place, sur toute la surface de la toiture. C'est un mélange de bitume et de roche broyée, portée à une température de l'ordre de 230°C. Notons que l'asphalte naturel est obtenu par broyage de la roche aspartique qui se constitue d'un mélange de calcaire et de bitume natif (Foughali, 2013). Pour l'étanchéité dans le bâtiment, les revêtements en voirie et pour les dallages industriels, l'asphalte coulé utilisé se compose de : bitume, filler (ou fines), sable, gravillons (cf. Figure 22).

Au moment de la pose, l'asphalte est un liquide chaud coulé et mis en œuvre en une ou plusieurs couches. Il se solidifie en refroidissant. Il est mis en œuvre en indépendance, c'est-à-dire séparé du support d'étanchéité par un écran. Ce type de revêtement convient aux pentes inférieures à 3% pour les toitures-terrasses dont l'élément porteur est en maçonnerie (ANAH, 2012; CERTU, 2003).

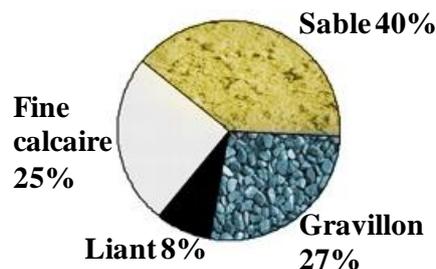


Figure 22 : Composition de l'asphalte (Foughali, 2013)

Trois types d'étanchéité asphalte sont utilisés en toiture-terrasse: l'asphalte pure en étanchéité, l'asphalte sablé et l'asphalte gravillonné. Le revêtement asphalte est généralement bicouche, monocouche, parfois nous trouverons des cas de revêtement tricouche.

Une couverture d'asphalte a une durée de vie estimée de 25 à 30 ans (CERTU, 2003).

b. Membranes bitumineuses

Le bitume est un hydrocarbure qui s'est constitué par un procédé naturel durant une très longue période à partir du plancton accumulé et enfoui au fond des bassins sédimentaires. Il se compose en moyenne 80 à 85% de carbone, 10 à 15% d'hydrogène, 2 à 3% d'oxygène et, en moindre quantité, du soufre, de l'azote (USIRF, 2010).

Il contient également des traces de métaux (fer, nickel, aluminium, silicium), qui malgré leur faible teneur, influencent les propriétés physiques et chimiques (Honnert et Mater, 2012).

Les membranes bitumineuses doivent être marquées CE conformément à la norme NF EN 13707. Elles sont composées de quatre éléments (Remolu et Lauby, 2007) (cf. Figure 23) :

- *liant* : bitume élastomère SBS, bitume élastomérique SBS (Styrène-Butadiène-Styrène) ou bitume plastomères APP (polymère polypropylène atactique). Pour le cas des terrasses jardins les feuilles de finitions ont un liant avec un adjuvant répulsif de racines ;
- *armature* : voile de verre, grille de verre, grille de polyester...
- *finition de surface* pour : fonction de protection anti-UV, fonction esthétique, fonction tenue au feu, fonction mise en œuvre, fonction anti-adhérence des spires du rouleau. Nous distinguons alors : autoprotection minérale (anti UV), autoprotection métallique (anti UV, aspect pour le cuivre, tenue au feu anticorrosion pour l'inox), film thermofusible (mise en œuvre, anti-adhérence), grésage (mise en œuvre, anti-adhérence).
- *finition de sous-face* : (fonction de mise en œuvre, fonction anti-adhérence des spires du rouleau). Il s'agit d'un film thermofusible (mise en œuvre, anti-adhérence) et du grésage (mise en œuvre, anti-adhérence).

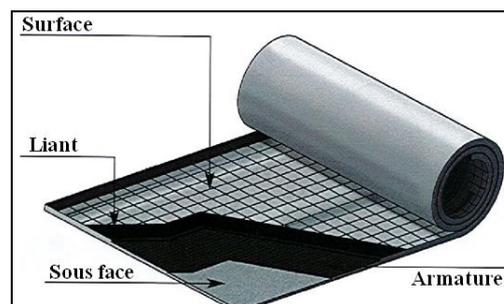


Figure 23 : Composition d'une feuille bitumineuse (Remolu et Lauby, 2007)

Nous distinguons deux types de membranes bitumineuses :

- *Les membranes bitumineuses oxydées* : Ce sont des revêtements multicouches à base de bitume oxydé qui sont mis en place soit en bicouche soit en plusieurs couches.

Le bitume est dit oxydé, car lors de sa préparation, l'air est soufflé au moment de sa production dans l'industrie, et il est aussi connu sous le nom « bitume soufflé » (Cognard, 2005). Ce revêtement d'étanchéité est formé par deux types, les feutres bitumés et les chapes de bitume armé. Aujourd'hui, ce type de revêtement est remplacé par le bitume modifié.

- *Membranes bitumineuses modifiées* : Dans ces membranes des agents modificateurs qui sont des polymères sont rajoutés au bitume : les élastomères SBS, les plastomères APP (Lafont, 1993; Remolu et Lauby, 2007). Ces polymères sont généralement employés à une teneur de 2

à 7 % en poids par rapport au bitume. Les revêtements peuvent être bicouches ou monocouche.

c. Membranes Synthétiques thermoplastiques ou vulcanisées

Les membranes synthétiques doivent être marquées CE conformément à la norme NF EN 13956 (Remolu et Lauby, 2007). Nous distinguons sur le marché trois grands types de membranes synthétiques thermoplastiques : les membranes PVC-P (polychlorure de vinyle plastifié), membranes FPO (polyoléfine flexible), et les membranes synthétiques vulcanisées EPDM¹³ (éthylène-propylène-diène-monomère). Ces membranes sont mises en œuvres en indépendance ou en adhérence ou bien fixées mécaniquement (Cognard, 2005; Remolu et Lauby, 2007). La membrane PVC-P est la membrane la plus utilisée en étanchéité pour les membranes synthétiques (MSI, 2006).

Ce sont des revêtements monocouches, dont l'épaisseur varie entre 1,2 mm sous protection lourde meuble (gravier) et 1,5 mm sous protection lourde dure. Elles sont composées de deux éléments : *liant* et *armatures* (Remolu et Lauby, 2007) (cf. Figure 24) :

- *liant* : mélange de chlorure de polyvinyle, de plastifiant phtalate ou de polyoléfine flexible...
- *armature* : voile de verre, grille de verre, grille de polyester.

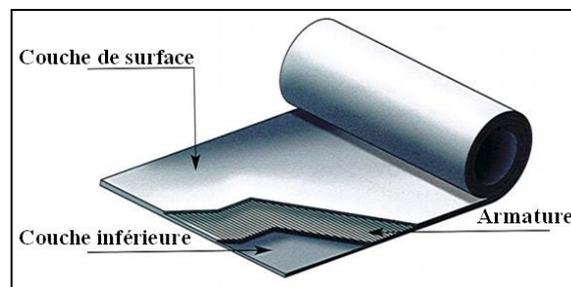


Figure 24 : Composition d'une membrane synthétique (Remolu et Lauby, 2007)

d. Les systèmes d'étanchéité liquide (SEL)

Ce sont des systèmes mono, bi ou tri composants en émulsion ou solution à base de résines polymérisables sur le chantier (époxy, acryliques, polyuréthanes, polyesters) (MSI, 2012).

Plus rare, en mousse de polyuréthane (PUR) qui est projetée et complétée par une enduction de finition armée, cette étanchéité est fournie pour les surfaces de formes complexes ou irrégulières. Pour la même fonction, les étanchéités liquides à base d'époxy, d'acrylure de

¹³Les EPDM sont des élastomères spéciaux, obtenus en copolymérisant dans des proportions variables l'éthylène (le terpolymère contient de 60 à 85 % de motifs éthylène) et le propylène, avec un faible taux de diène non conjugué.

PUR ou de polyester sont appliquées à plusieurs couches et armées de polyester. Mais la mousse présente l'avantage de fournir l'isolation thermique (Bernstein *et al.*, 1997).

e. Durabilité

Le bitume monocouche autoprotégé présente une durée de vie de 10 ans. Quant au bitume élastomère (modifiés SBS ou APP) et les membranes synthétiques leur durée de vie peut dépasser 25 ans (CERTU, 2003).

3.3.2. Couche de protection

Les couches de protection permettent de protéger l'étanchéité des différents paramètres climatiques et des actions mécaniques. Nous distinguons deux types de protection :

- *une couche de protection* ajoutée au dessus de l'étanchéité
- *une protection intégrée* directement dans la couche de surface de l'étanchéité, il s'agit alors d'une étanchéité auto-protégée.

Les étanchéités asphalte sont auto-protégées. En effet, la couche de surface est constituée soit d'asphalte sablé ayant une autoprotection grâce au sable, soit par de l'asphalte gravillonné ayant une autoprotection grâce aux gravillons (Cognard, 2005).

Pour l'étanchéité bitumineuse, nous distinguons (Remolu et Lauby, 2007) :

- *l'autoprotection minérale* par l'ajout de minéraux (ardoise broyée ou autre sorte de granulés minéraux)
- *l'autoprotection métallique* (aluminium d'épaisseur 0,08 mm, cuivre recuit de 0,08 mm, ou acier inoxydable de 0,05 mm).
- la *protection lourde* rapportée dans le cas où les feuilles ne présentent aucune autoprotection. Elle est mise en œuvre immédiatement après la pose de l'étanchéité. Elle peut être de deux types : la protection meuble constituée d'un lit de gravillons de 4 à 6 cm d'épaisseur; la protection dure constituée soit de dalles de béton armé posées sur une couche de 3 cm de gravier, soit de pavés posés sur un lit de sable, soit des dalles en béton ou en bois, posées sur des plots réglables en hauteur (Lafont, 1993).

Les membranes synthétiques sont dépourvues d'une autoprotection. Leur protection est assurée par une protection rapportée meuble ou dure.

3.3.3. Synthèse : Les différents matériaux d'étanchéité des toitures-terrasses

Les différents types de revêtements d'étanchéité, leurs compositions et leurs protections sont résumés dans le [Tableau 4](#).

Tableau 4 : Les différents revêtements d'étanchéité appliqués sur les toitures-terrasses (Nohra, 2010)

| Revêtement | | Type de couche | Composition des couches | Protection |
|---|-----------------|--------------------------------------|--|--|
| Asphalte | | Bicouche Epaisseur : 20 - 25 mm | - asphalte pure étanchéité (5mm) - asphalte sablé (15mm) | Autoprotection minérale (grâce aux sables) |
| | | | - asphalte pure étanchéité - asphalte gravillonné (20mm) | Autoprotection par gravillons |
| | | Monocouche Epaisseur : 20 mm | asphalte gravillonné ⁽¹⁾ | Autoprotection par gravillons |
| Feuille à base de bitume oxydé⁽²⁾ | | Multicouche | Feutres bitumés | - Autoprotection minérale |
| | | | Chapes de bitume armé | - Autoprotection par des feuilles métalliques - Protection rapportée |
| Feuille à base de bitume modifié⁽³⁾ | | Bicouche Epaisseur : 5 mm | Deux feuilles bitumineuses élastomère SBS | - Autoprotection minérale |
| | | | Deux feuilles bitumineuses plastomère APP | - Protection rapportée |
| | | | Une feuille bitumineuse élastomère SBS + feuille bitumineuse élastomérique SBS | - Autoprotection métallique (feuille d'Al, de Cu, ou d'inox) - Protection rapportée |
| | | Monocouche Epaisseur : 4 mm | Une feuille bitumineuse élastomère SBS | - Autoprotection minérale |
| | | | Une feuille bitumineuse plastomère APP | - Protection rapportée |
| Membranes synthétiques | Thermoplastique | Monocouche Epaisseur : 1,2 -1,5mm | PVC-P | - Protection rapportée |
| | | | FPO | |
| | Vulcanisée | Monocouche Epaisseur : 1,2-1,5mm | EPDM | |
| <p>(1): l'asphalte gravillonné utilisé en monocouche n'est applicable que dans le cas d'une isolation inversée.</p> <p>(2): les membranes bitumineuses oxydées ne sont plus utilisées, et elles sont remplacées par les membranes à base de bitume modifié.</p> <p>(3): ce type de revêtement est le plus utilisé, et le plus répandu dans le marché.</p> | | | | |

Le [Tableau 4](#) monte une importante variété des étanchéités des toitures-terrasses que ce soit au niveau du revêtement utilisé ou au niveau de la couche de protection. La question qui se pose comment se manifeste l'utilisation des différents matériaux dans la réalité de la mise en œuvre ? Pour répondre à cette question nous allons étudier le marché des étanchéités terrasses dans la [Section 4](#).

3.4. Dispositifs d'évacuation des eaux pluviales

3.4.1. Descriptif des entrées d'eaux pluviales

Dans une toiture-terrasse, les entrées d'eaux pluviales (EEP) sont généralement constituées de deux parties : la *platine* et le *moignon*, assemblées entre elles de façon étanche (cf. Figure 25). Le moignon peut prendre deux formes : cylindrique ou tronconique. Ces entrées d'eaux pluviales ne comportent pas de manchon isolant thermique.

La distance entre le bord du trou d'évacuation et le bord extrême de la platine ne doit pas être inférieure à 0,12 m. La section des EEP doit être conforme à la norme P40-202, DTU 60.11 (Remolu et Lauby, 2007).

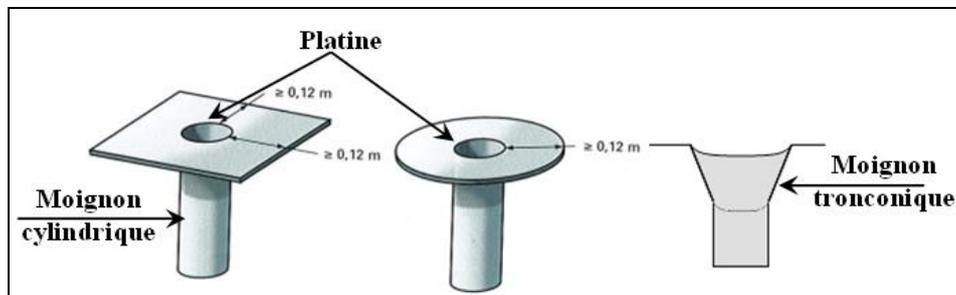


Figure 25 : Système d'entrée d'eau pluviale dans une terrasse (Remolu et Lauby, 2007)

Toute évacuation doit être munie d'un dispositif destiné à arrêter les débris capables de provoquer un engorgement des descentes (cf. Figure 26).

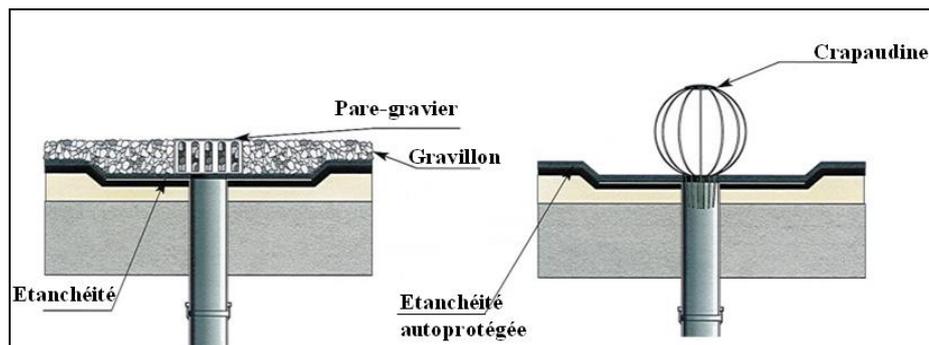


Figure 26 : Entrées d'eaux pluviales. Exemple de crapaudine et de galerie garde-grève (Remolu et Lauby, 2007)

3.4.2. Matériaux des entrées d'eaux pluviales

Les matériaux des entrées d'eau pluviale peuvent être (Remolu et Lauby, 2007) :

- en plomb de 2,5 mm d'épaisseur minimale ;
- en tôle d'acier inoxydable de 1,0 mm d'épaisseur minimale ;

- en cuivre de 0,6 mm d'épaisseur minimale ;
- en aluminium de 1,0 mm d'épaisseur minimale ;
- en matériau adapté (plus particulièrement pour les membranes synthétiques).

3.5. Cas particulier : les toitures-terrasses végétalisées

3.5.1. Typologie des toitures végétalisées

Une *toiture végétalisée* est une toiture-terrasse comportant une couche de substrat convenant à des plantes variées (Roy et Blin-Lacroix, 2002; Paulin, 2003). En effet, ce sont des toitures multicouches dont la finition de surface est constituée par une végétation. Nous retrouvons ainsi les éléments d'une toiture-terrasse : élément porteur, pare-vapeur, isolant thermique et revêtement d'étanchéité. Outre son rôle d'étanchéité classique, ce dernier élément doit aussi résister à la pénétration de racines, et de ce fait peut contenir des adjuvants anti-racines.

Nous distinguons trois types de végétalisation : intensive (on parle alors de toiture jardin), semi-intensive et extensive (Houssin *et al.*, 2012) (cf. Figure 27).

Une couverture végétalisée a une durée de vie estimée de 50 jusqu'à 100 ans (MSI, 2012).

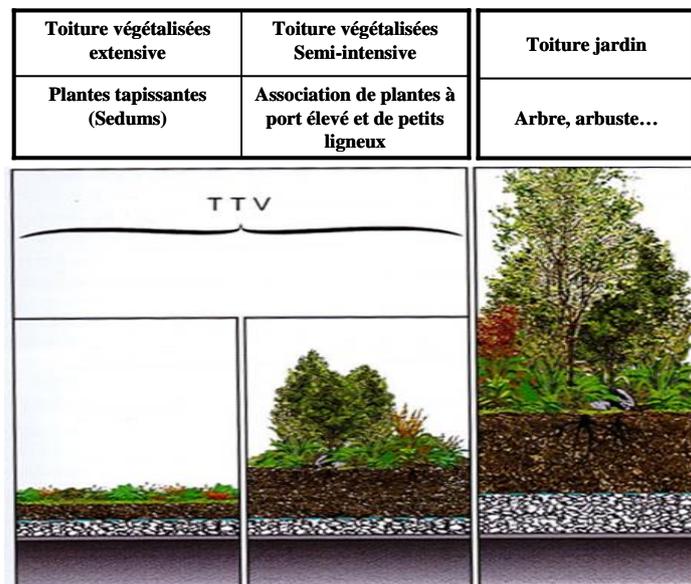


Figure 27 : Cas des toitures végétalisées et des toitures-terrasses jardins (Houssin *et al.*, 2012)

3.5.2. Composition de la toiture végétalisée

La toiture végétalisée se compose, en partie courante, d'éléments superposés en couches de bas en haut selon l'ordre suivant (Houssin *et al.*, 2012) (cf. Figure 28) :

- *Elément porteur pouvant être classé en 4 catégories* : maçonnerie, béton cellulaire, en tôles d'acier nervurées, en bois massif ou panneaux bois.
- *Complexe isolation-étanchéité comportant* : le pare-vapeur, la couche de panneaux, l'isolation thermique, le revêtement d'étanchéité.
- *Complexe de végétalisation comprenant* : une couche drainante, une couche filtrante, une couche de substrat, une couche végétale.

En périphérie de toiture et au droit des points singuliers :

- *La continuité de l'étanchéité est assurée par des traitements spécifiques par* : relevés ou retombées d'étanchéité, joint de dilatation, bandes d'égout, platine métallique, insérée dans l'étanchéité.
- *Le complexe de végétalisation est délimité par* : un dispositif de séparation avec, le cas échéant, une zone stérile.

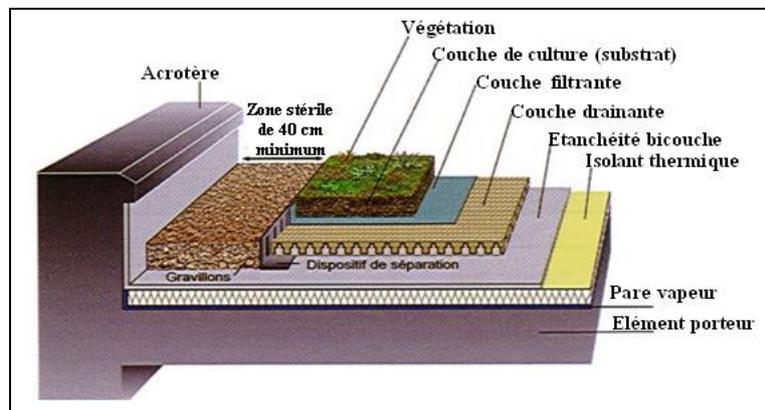


Figure 28 : Exemple sur élément porteur en maçonnerie de pente nulle (Houssin *et al.*, 2012)

Pour conclure, cet état des lieux sur les toitures-terrasses nous a permis d'identifier les matériaux des éléments de toit rentrant en contact avec l'eau de pluie et qui seront une source de contamination des eaux de ruissellement à l'échelle urbaine. Ainsi, cette première étude bibliographique nous permet d'avoir une liste des matériaux des revêtements d'étanchéité et des matériaux des éléments d'évacuation d'eau de pluie utilisées sur les toitures-terrasses et qui sont potentiellement existantes à l'échelle urbaine. La variabilité de l'utilisation de ces matériaux sera traitée dans la section suivante.

4. Répartition des matériaux de toiture en France

La diversité importante des matériaux employés en couverture pose la question de leur répartition en termes de diffusion relative à l'échelle urbaine. En fait, notre objectif de

recherche est de quantifier la répartition réelle des matériaux de toiture à une échelle urbaine donnée. En d'autres termes nous parlons des matériaux du *patrimoine bâti*.

Pour atteindre cet objectif, nous avons besoin des données quantifiables. Les seules données sur la répartition des matériaux de toitures identifiées sont fournies par le marché des matériaux de toiture. Or, ce marché n'est qu'une représentation dans une période spécifique de la distribution des ventes des matériaux de toiture. Ainsi, nous allons exploiter les données du marché pour appréhender indirectement et partiellement la répartition patrimoniale des matériaux de toiture.

Les seules données que nous avons pu avoir concernent exclusivement l'utilisation des matériaux de rampant et ceux des étanchéités terrasses. En effet, aucune donnée d'étude de marché n'a pu être trouvée concernant les éléments singuliers ou même les ouvrages d'évacuation des eaux pluviales. De même pour les variétés de chaque famille de matériaux, les données de marchés sont indisponibles et restent confidentielles chez les producteurs.

Dans cette partie, nous allons présenter l'étude du marché des matériaux de couverture en France. Cette étude nous permet de hiérarchiser les matériaux utilisés sur le marché ainsi que leur évolution (entre 2001 et 2011) sur le territoire français. Toutes les données recueillies dans cette partie sont issues principalement de deux études de marché ([MSI, 2006](#); [MSI, 2012](#)) sur « les matériaux de couverture de toits installés sur des bâtiments neufs ou de l'entretien-rénovation de logements et de bâtiments non résidentiels ou industriel », pendant deux périodes : 2001-2005 (pour celle de 2006) et 2007-2011 (pour l'étude 2012). Toutes les données sont exprimées en m² de toitures mis en œuvre.

Notons que l'étude de marché de couverture en France de 2006 ([MSI, 2006](#)) a étudié trois catégories de produits de toiture :

- Les petits éléments de couverture ;
- Les grands éléments de couverture ;
- L'étanchéité des toitures-terrasses.

L'édition 2012 ([MSI, 2012](#)) étudie les mêmes catégories en rajoutant deux nouvelles catégories :

- Les toitures végétalisées ;
- Les systèmes solaires thermiques et photovoltaïques.

Un aperçu global de l'utilisation des matériaux de couverture montre que l'emploi de ces matériaux dépend de plusieurs facteurs tels que la région (par exemple en Bretagne on utilise majoritairement de l'ardoise tandis que dans le sud « zones rouges » présentent une

préférence pour l'utilisation de tuiles rouges) et le type de bâtiment (collectif, individuel, bâtiment industriel, etc.).

Dans un premier temps, l'étude de marché se focalisera sur les matériaux de couverture utilisés en tant que rampants ; suivi de celle des matériaux des produits d'étanchéité ; et enfin des toitures végétalisées.

4.1. Hiérarchisation du marché des matériaux de rampant

Rappelons que le marché des matériaux de couverture utilisés en tant que rampant est segmenté en deux groupes par rapport à la taille des éléments : les petits éléments de couvertures et les grands éléments.

4.1.1. Aperçu général du marché en France

La vente des matériaux de couverture en France a atteint environ *125 millions de m²* en 2005. Ce chiffre est presque stagnant entre 2001 (129 millions m²) et 2005, après une bonne progression du marché de la couverture entre 1999 et 2000 suite aux travaux de rénovations de toiture dynamisés par les tempêtes de 1999. En 2007, la vente augmente (soit environ 131 millions de m²) puis redéccline fortement en 2009, en raison de la mauvaise conjoncture économique du moment. Durant les années qui suivent, les ventes reprennent tant bien que mal. En 2011, il s'est vendu environ *115 millions de m²* de matériaux de couvertures. C'est surtout le marché des petits éléments de couvertures qui est le plus touché (cf. Figure 29), puisqu'il dépend fortement de l'activité de construction neuve et d'entretien-rénovation de maisons individuelles. Le marché des grands éléments montre une relative constance dans son évolution entre 2007 et 2011.

En France, la vente des petits éléments de couverture domine celle des grands éléments de couverture (cf. Figure 29). Par exemple en 2005, la vente des petits éléments de couverture représente 62,8 % du marché de couverture en France, alors que la vente des grands éléments représente 37,2%.

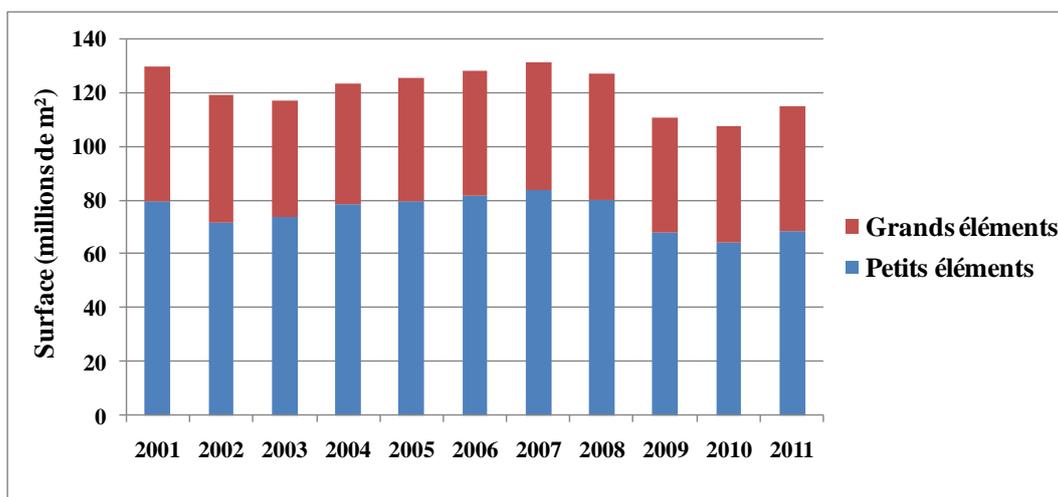


Figure 29 : Marché des surfaces vendues (en millions de m²) des petits et grands éléments de couverture en France entre 2001-2011 (MSI, 2006 ; MSI, 2012)

Ces études de marché distinguent les ventes de matériaux de couverture pour l'usage dans des bâtiments résidentiels¹⁴ ou non résidentiels. La répartition entre ces deux usages montre que les petits éléments sont employés principalement en zone résidentielle, tandis que les grands éléments trouvent leur place sur les autres types de bâtiment (cf. Figure 30).

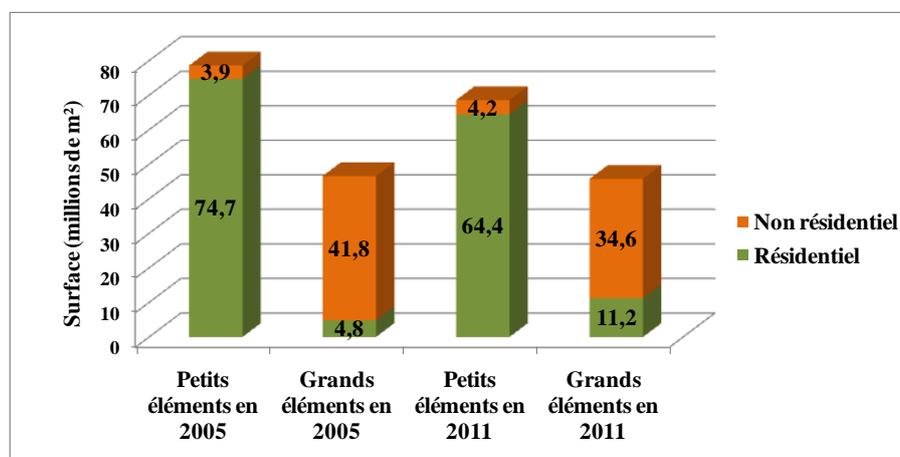


Figure 30 : Marché des petits et grands éléments de couverture en France en 2005 et 2011: répartition du marché et type d'usage (en millions de m²) (MSI, 2006 ; MSI, 2012)

Enfin, en ce qui concerne la répartition selon le type de travaux, pour les matériaux de rampants, les grands éléments de couvertures sont le plus souvent employés dans la construction neuve quelle que soit la période observée; alors que les petits éléments sont

¹⁴ Le secteur résidentiel regroupe les logements individuels, collectifs et en résidence (logement en résidence est une habitation communautaire, dans un bâtiment destiné à héberger une catégorie de personnes (ex : des personnes âgées, des étudiants ou des travailleurs) (MSI, 2006).

autant utilisés en construction neuve qu'en rénovation. Cette différence d'utilisation des matériaux s'explique, en partie, par la différence de durée de vie des matériaux.

4.1.2. Le marché des petits éléments de couverture

Les petits éléments de couverture sont constitués des produits suivants :

- Les tuiles en terre cuite ;
- Les tuiles en béton ;
- Les ardoises naturelles ;
- Les ardoises fibres ciment ;
- Les bardeaux bitumineux ;
- Les tuiles métalliques.

En suivant l'évolution de ce marché en fonction de ces différents types de produits de 2001 à 2011, nous remarquons une répartition presque identique chaque année, en termes de m² de matériaux vendus : environ 70% pour les *tuiles en terre cuite*, entre 10 et 20% pour les *ardoises naturelles*, moins de 10% pour les *tuiles béton* et les *ardoises fibres ciment*, et enfin un pourcentage inférieur à 5 % pour les *bardeaux bitumineux* et les *tuiles métalliques* (cf. Figure 31). Donc, sur onze années d'étude, le marché des petits éléments de matériaux de rampant est *stable*.

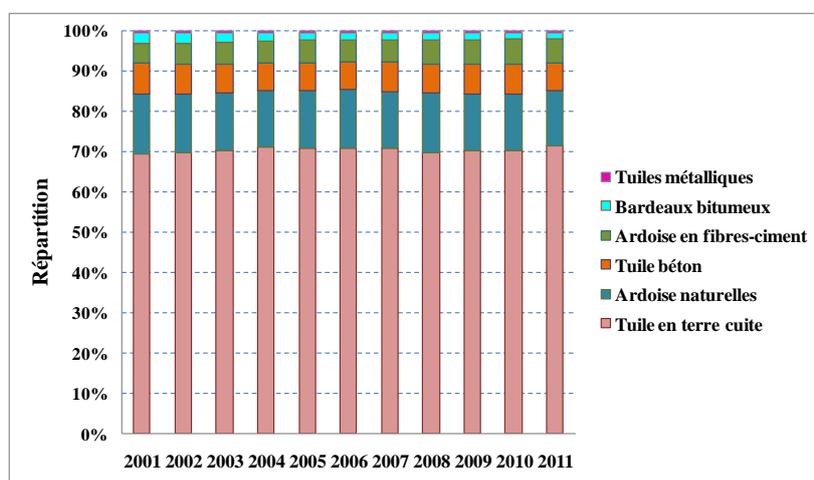


Figure 31 : Evolution du marché des Petits éléments de couverture en France, par type de matériau, 2001-2011 (Trébalage, 2013)

a. La tuile en terre cuite

La tuile en terre cuite est le premier matériau de petits éléments de couverture, elle représente 70,3% du marché total des petits éléments sur les 11 années d'étude. En effet, elle est présente

sur tout le territoire national français, avec une prédominance pour les tuiles à emboîtement à plus de 80%. Cette forte présence de la tuile en terre cuite s'explique tout d'abord par l'ancienneté du matériau qui va de pair avec les habitudes architecturales, datant de l'antiquité romaine. De plus, les caractéristiques intrinsèques de ce type de couverture se sont grandement améliorées avec les progrès techniques et dans toutes les directions, comme l'augmentation de la résistance au gel/dégel par exemple. Les fabrications sont maintenant quasiment toutes industrielles, d'une qualité testée et surveillée, contrôlée et garantie.

Le marché de la tuile est aussi marqué par une grande variété en termes de forme et d'esthétique : c'est pourquoi ce matériau est aussi populaire auprès des particuliers. Les tuiles plates sont fortement présentes dans le bassin Parisien, et en Alsace ; alors que dans le sud ce sont les tuiles en canal qui sont privilégiées.

b. L'ardoise naturelle

L'ardoise naturelle vient en deuxième position avec 14,3% du marché total des petits éléments sur les 11 années d'étude, car elle est facile à mettre en œuvre. Relevant de traditions régionales, comme la tuile en terre cuite ou l'ardoise utilisée dans les zones dites « noires », c'est-à-dire dans les régions du nord-ouest (Bretagne), et ouest avec 44% de part de marché. A l'heure actuelle, hormis quelques productions locales, la majorité des ardoises proviennent des sites de Trélazé, proche d'Angers, et aussi de la Galice, en Espagne.

c. La tuile béton

La tuile béton représente 7,2 % du marché total des petits éléments sur les 11 années d'étude. C'est un matériau similaire à la tuile en terre cuite. En effet, celles-ci présentent ainsi -pour un moindre coût- une esthétique identique, et son caractère économique est beaucoup apprécié dans le cadre de projets de constructions neuves à faible coûts.

Les tuiles béton sont apparues vers les années 1920 et sont largement utilisées dans les années 1950. Elles constituent une alternative économique aux tuiles en terre cuite, avec un coût d'achat 15% à 20% moins élevé. Néanmoins, son utilisation a décru (depuis les années 1950), du fait de sa mauvaise tenue au temps et aux intempéries :

- une décoloration dans le temps sous les effets des UV et des intempéries ;
- une durée de vie moindre ;
- un poids supérieur, qui limite leur pose sur certaines charpentes.

Néanmoins, un effort d'amélioration est perçu chez quelques fabricants de tuiles bétons : une amélioration du processus de fabrication ou encore l'ajout de composés permettant une meilleure résistance et une plus longue durée de vie.

d. L'ardoise en fibres ciment

L'ardoise en fibres ciment est un matériau à controverse, et continue de souffrir un peu de sa mauvaise image auprès du public puisqu'elle était initialement constituée d'amiante avant son interdiction en 1997. Elle représente 5,6 % du marché total des petits éléments sur les 11 années d'étude.

Les ardoises en fibres ciment se distinguent notamment par un coût inférieur à celui des ardoises naturelles. Ce type de couverture séduit plus particulièrement une clientèle recherchant l'esthétique des ardoises traditionnelles sans pour autant disposer du budget nécessaire à un tel investissement.

e. Les bardeaux bitumineux

Les bardeaux bitumineux ne sont que très peu utilisés, ils ne représentent que 1,9 % du marché total des petits éléments sur les 11 années d'étude. Cela s'explique par la manière dont le produit est utilisé : pour la couverture des abris / cabanons de jardin. Son utilisation en toiture d'habitation est limitée aux toitures peu pentues (30° ou moins).

De manière générale et depuis plusieurs années, les ventes de bardeaux bitumeux déclinent progressivement au profit de matériaux jugés plus performants, esthétiques ou encore pérennes, car leur durée de vie (25 ans) est très inférieure à celle des autres petits éléments de couverture. Ainsi, les particuliers investissent de plus en plus dans des chalets en bois ou en plastique (imitation bois) à l'aspect plus traditionnel et « cosy ». Les abris recouverts de bardeaux bitumeux rencontrent ainsi moins de succès.

f. Les tuiles métalliques

Les tuiles métalliques se distinguent des autres segments des petits éléments de couverture par des performances supérieures en matière de résistances aux conditions climatiques difficiles, ce qui leur assure des débouchés croissants dans les zones d'altitude.

Même avec ces atouts, le marché de la tuile métallique est un marché de *niche* (0,7 % du marché total des petits éléments sur les 11 années d'étude) qui se limite aux zones climatiques difficiles telles les montagnes. En dehors de ces zones, les tuiles métalliques sont en effet peu utilisées. Cette faible utilisation relève aussi d'un manque de notoriété auprès des professionnels de la pose de couverture : elles sont en effet jugées moins valorisantes que les tuiles « traditionnelles ».

4.1.3. Le marché des grands éléments de couverture

Les grands éléments de couverture de rampants représentent en 2011 40,1% du marché en France, contre 36,5% en 2005. De plus, c'est dans cette famille qu'il y a beaucoup plus de fluctuations dans la vente de matériaux. Les matériaux ayant le plus de fluctuations sont l'acier et les plaques en fibres ciment (cf. Figure 32).

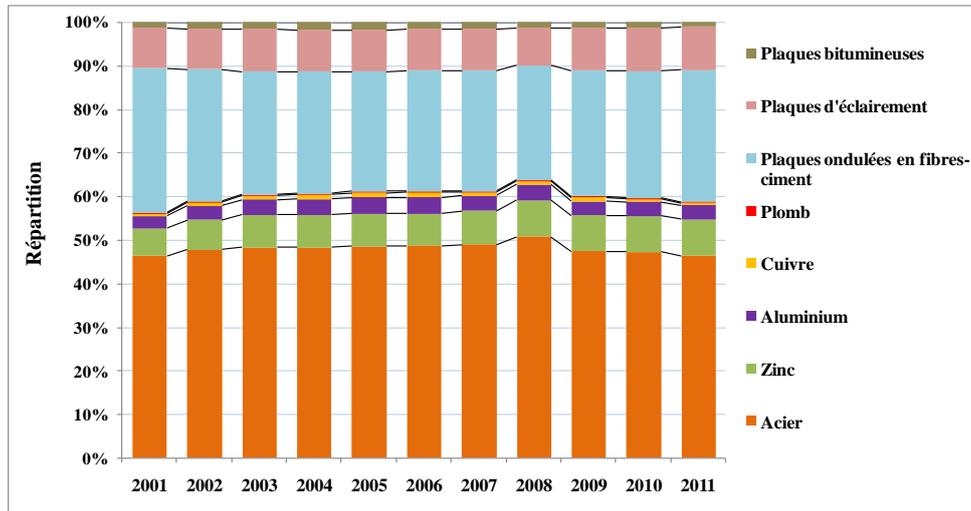


Figure 32 : Evolution du marché des grands éléments de couverture en France, par type de matériau, 2001-2011 (Trébalage, 2013)

Comme pour le marché des petits éléments de couvertures, le marché des grands éléments de couvertures suit une segmentation presque *stable* au niveau des parts de marché au fil des années:

- environ 55% à 60% de *couvertures métalliques*, incluant les couvertures en acier, zinc, aluminium, cuivre et plomb : pic à 62% en 2008;
- de 25 à presque 32% de *plaques ondulées en fibres ciment* : pic le plus bas en 2008 avec 26% ;
- environ 10% de *plaques d'éclairage* (PVC, Polyester et Polycarbonate);
- 1% de *plaques bitumineuses*.

a. Les couvertures métalliques

Cinq grandes familles de matériaux segmentent le marché de la couverture métallique : les aciers, le zinc, l'aluminium, le cuivre et le plomb. Les couvertures métalliques représentent 48% du marché total des petits éléments sur les 11 années d'étude.

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 33, ce sont les *acières* qui dominent ce marché des couvertures métalliques avec environ 80% des parts de marché en 2005 et en 2011. Dans les

aciers sont comptabilisé les couvertures dites sèches, les panneaux sandwichs, et des supports d'étanchéité. Ainsi, une partie de ces matériaux ne rentrent pas en contact avec l'eau ce qui nous donne une vision incomplète de la partie d'acier réellement en contact avec l'eau de pluie. La répartition entre ces différents produits d'acier n'est pas disponible.

Les aciers sont principalement utilisés dans le domaine industriel et agricole. Cette couverture métallique est très populaire auprès du secteur privé du fait de sa qualité intrinsèque (durée de vie, flexibilité architecturale, etc.), des efforts des fabricants de diversifier les aciers qu'ils proposent en termes de coloris, finition, et du type d'acier (acier galvanisé ou inoxydable).

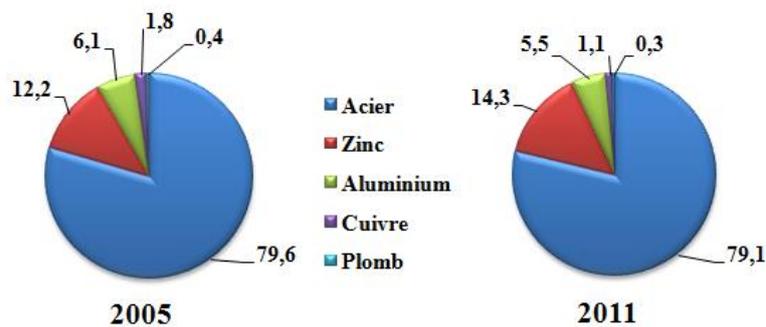


Figure 33 : Marché des couvertures métalliques en 2005 et 2011 (MSI, 2006 ; 2012)

Sa répartition au niveau régional dépend du poids démographique et économique d'une région, avec une forte concentration dans les zones caractérisées par une activité importante sur le plan industriel, tertiaire et commercial. Ainsi, les principales régions utilisatrices de ce type de couverture sont le Rhône-Alpes, l'Île-de-France, le Nord-Pas de Calais et, dans un second temps, les Pays de Loire, la Bretagne et l'Aquitaine.

Le zinc arrive en deuxième position, avec 14% de parts du marché en 2011 (contre 12% en 2005). C'est un matériau qui résiste naturellement à la corrosion grâce à la formation d'une patine naturelle qui freine les échanges avec l'oxygène. Ainsi le zinc est très apprécié pour ses qualités de mise en œuvre et sa durabilité. A l'inverse de l'acier, il est davantage utilisé pour des bâtiments à usage résidentiel. Il est utilisé pour les logements collectifs, notamment en région parisienne. Il est de plus en plus populaire auprès des constructeurs. De plus, avec les évolutions techniques la diversité du produit donne un large choix aux utilisateurs.

L'aluminium vient en troisième position, avec 6% de parts de marché en 2005 et 5,5% en 2011. Les couvertures en aluminium trouvent leur principale application dans le secteur non-résidentiel, notamment pour des bâtiments liés à la culture, aux sports et aux loisirs. L'aluminium est le concurrent direct de l'acier, en raison de son plus faible poids, de sa

longévité supérieure et de sa meilleure isolation acoustique et thermique. Il s'agit de couvertures plus onéreuses que les couvertures en acier qui sont plus rarement utilisées pour les bâtiments industriels.

Enfin, le cuivre et le plomb n'occupent ensemble que 2% (en 2005 et 2011) du marché des couvertures métalliques malgré leur grande résistance au temps et leur malléabilité. La demande de produits de couverture en cuivre dans le secteur résidentiel existe mais reste encore très faible. Ses utilisations en couverture portent principalement sur les bâtiments d'équipements tels que dans les secteurs de l'éducation, de la santé ou de la culture tels que les hôpitaux, les groupes scolaires ou les médiathèques. Le cuivre reste un matériau cher pour être employé massivement en couverture. Avant, il était utilisé en rénovation sur les monuments historiques et quelques bâtiments à usage culturel ; aujourd'hui on hésite encore à l'utiliser du fait de la « cherté » du matériau et du fait qu'il peut être volé sur des chantiers et revendu. Par contre, il est employé surtout en éléments d'évacuation des eaux pluviales (gouttières et descentes). Le marché des couvertures en *plomb* est en recul depuis de nombreuses années. En effet, son prix reste très élevé par rapport au reste des couvertures métalliques. Par ailleurs, il reste peu de main d'œuvre qualifiée pour en assurer à la fois la fabrication et la pose. Les toits intégralement en plomb sont assez rares, ils se limitent aux monuments historiques tels que le Château de Versailles. Toutefois, le plomb est utilisé pour les éléments d'étanchéité des toits (particulièrement sur les raccords sur pénétration de fenêtres de toits ou des cheminées, en rive contre un mur...) du fait de sa très grande malléabilité.

b. Les plaques ondulées en fibres ciment

Le marché des couvertures en fibres ciment vient en deuxième position avec 29% de parts de marché sur les 11 années d'étude pour les grands éléments de couverture. Ce marché a été fortement affecté par le décret n°96-97 du 7 février 1996, interdisant l'utilisation d'amiante dans la couverture. Ainsi, comme les ardoises en fibres ciment, les plaques en fibres ciment souffrent d'une image négative auprès des utilisateurs. Malgré une reprise après 2009 avec le développement d'une nouvelle matière éliminant l'amiante dans les plaques en fibres ciment, l'utilisation de ce matériau en couverture reste limitée. Cette couverture est utilisée surtout sur les bâtiments agricoles. En rénovation elle est remplacée par une sur-toiture en métal, ce qui peut éviter des libérations de poussières.

c. Les plaques d'éclairage

Les plaques d'éclairage viennent en troisième position avec 9,6% de parts de marché. Les plaques d'éclairage sont principalement utilisées dans les bâtiments industriels et agricoles ainsi que les établissements publics. Ce sont surtout les innovations techniques qui relancent les ventes en hausse de ce produit. En effet, les inconvénients du vieillissement (blanchiment, effritement) du produit sont atténués voire effacés, et s'ajoutent à cela de nouvelles qualités (comme transparence accrue, résistance supérieure à celle du polyester, souple, meilleure réaction au feu) qui font que les plaques d'éclairage connaissent une plus grande utilisation. Les plaques d'éclairage sont utilisées au sein des gymnases, des halles d'exposition, des bâtiments de stockage et des serres. Intégrées généralement dans la couverture, les plaques d'éclairage s'utilisent en complément des bacs acier ou des plaques en fibres ciment.

d. Les plaques bitumineuses

Enfin, les plaques bitumineuses ne représentent que 1,5% du marché des grands éléments de couverture sur les onze années d'étude. Elles sont de moins en moins utilisées. En effet, ces matériaux ne sont pas très esthétiques et présentent une faible résistance mécanique et donc une durée de vie très limitée. Elles sont actuellement utilisées plus dans le cadre de rénovation d'anciennes plaques détériorées.

4.1.4. Hiérarchisation du marché des matériaux de rampant en France

Pour conclure, l'évolution du marché des éléments de couverture de rampants (petits et grands éléments confondus) en France, de 2001 à 2011 est presque *stable* (cf. Figure 34).

Ce marché est dominé par la vente de la tuile en terre cuite avec environ 44% de parts de marché. L'acier arrive en deuxième position avec une part moyenne de marché de 18% sur les 11 années d'étude ; viennent ensuite les plaques ondulées en fibres ciment avec 11%, les ardoises naturelles avec 9%, les tuiles béton avec 4,5%, les plaques d'éclairage avec 3,6%, les ardoises en fibres ciment avec 3,5%, le zinc avec 3%, l'aluminium avec 1,3%, les bardeaux bitumineux avec 1,2%, les plaques bitumineuses avec 0,6%, les tuiles métalliques avec 0,4%, le cuivre avec 0,3% et enfin le plomb avec 0,1%.

Les premiers matériaux sont autant des petits éléments de couverture que des grands éléments de couverture. En dernières positions, nous avons les matériaux plutôt impopulaires ou bien des matériaux coûteux.

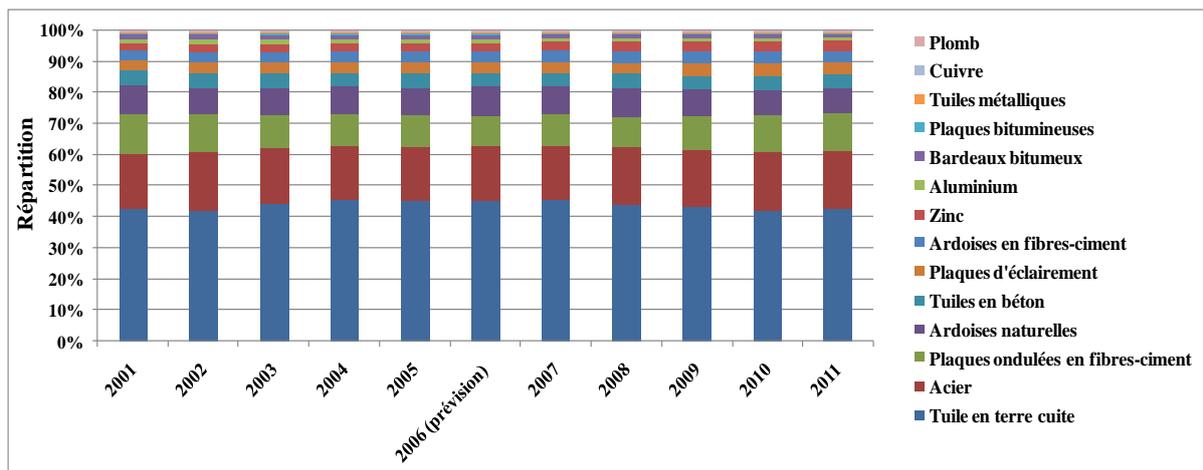


Figure 34 : Evolution des matériaux du rampant en fonction de la surface vendue en France entre 2001 et 2011, en pourcentage (Trébalage, 2013)

Dans le secteur non résidentiel (cf. Figure 35), les grands éléments de couvertures dominent le secteur. En effet, l'acier représente 43% de parts de marché dans ce secteur suivi des plaques ondulées en fibres ciment et les plaques d'éclairage avec 27% et 10% respectivement.

Dans le secteur résidentiel (cf. Figure 35), en comparant trois années (2001,2005 et 2011), nous remarquons bien que les tuiles en terre cuite dominent ce marché avec 66% en moyenne de parts de marché sur les trois années. Ces trois années sont assez similaires : nous retrouvons les mêmes matériaux avec une hiérarchisation presque identique : tuile terre cuite, ardoise, acier, tuile béton et ardoise en fibres ciments. Pour les autres matériaux, les ventes sont inférieures à 3%. Nous remarquons bien que la vente du plomb, des plaques ondulées en fibres ciment, des plaques d'éclairage et des plaques bitumineuses sont très négligeables.

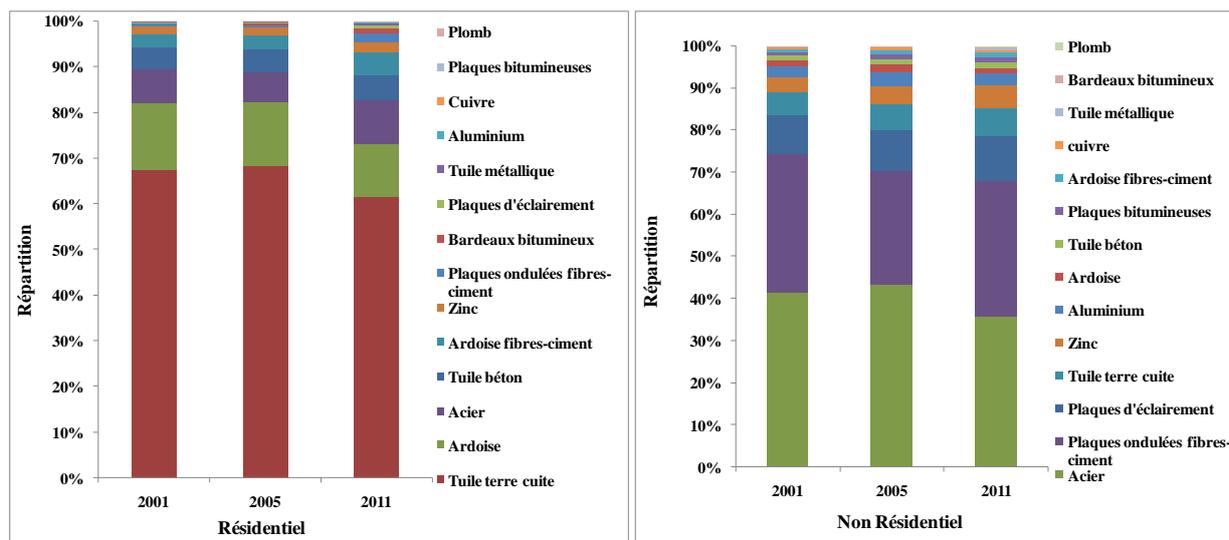


Figure 35 : Evolution des hiérarchisations de matériaux du rampant pour le secteur Résidentiel et non Résidentiel 2001/2005/2011 (Trébalage, 2013)

Pour le secteur non résidentiel, c'est l'acier qui prend la première place, à 40% en moyenne de parts de marché sur les trois années. Comme pour le secteur résidentiel, nous retrouvons la même hiérarchisation de matériaux pour les trois années : acier, plaques ondulées en fibres ciment, plaques d'éclairage, tuiles en terre cuite, zinc, aluminium.

Nous remarquons que même dans le secteur non résidentiel, la tuile en terre cuite, qui est en 4^e position, est utilisée, ce qui prouve son importance. De même que pour le secteur résidentiel, les matériaux très peu utilisés (moins de 1%) sont des matériaux qui sont, soit très coûteux (cas du cuivre par exemple), soit ayant une image négative auprès des opérateurs de construction, ou encore ayant une application marginale en France.

4.1.5. Cas du marché en Ile-de-France

L'étude de marché en Ile-de-France (région de notre thèse) a été effectuée uniquement dans l'édition de MSI de 2006. Cette étude montre que la répartition entre les grands et les petits éléments de couverture est sensiblement la même qu'à l'échelle nationale. En effet, la vente des petits éléments domine celles des grands éléments représentant respectivement environ 72% et 28% de parts de marché en 2005, une même conclusion peut être établie sur les autres années de 2001 à 2004 (cf. Figure 36).

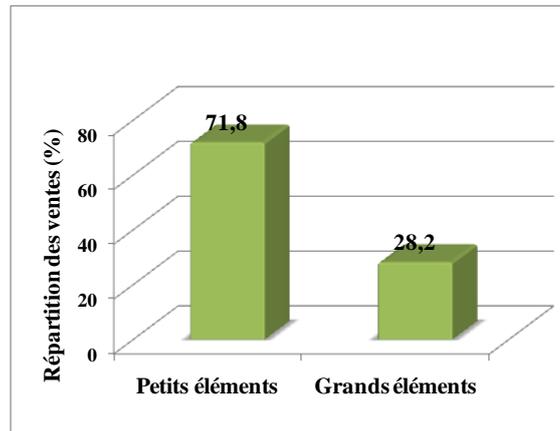


Figure 36 : Marché des petits et grands éléments de couverture en Île-de-France en 2005 (en %) (MSI, 2006)

Le marché des grands éléments de couverture est dominé par la vente des couvertures métalliques qui représentent 75% de parts de marché suivi des plaques d'éclairage pour 15% (cf. Figure 37). Le marché des couvertures métalliques en Ile-de-France suit la même tendance qu'à l'échelle nationale. L'acier représente 61% de parts de marché des couvertures métalliques suivi du zinc avec 29,5% en Ile-de-France, contre 79,6 % pour l'acier et 12,2% pour le zinc à l'échelle nationale. Nous remarquons bien qu'en Ile-de-France, la vente du zinc est plus importante qu'à l'échelle nationale. Ceci s'explique par des facteurs urbanistiques ou encore historiques. En effet, dans la région parisienne, les toitures des bâtiments Haussmanniens sont en zinc.

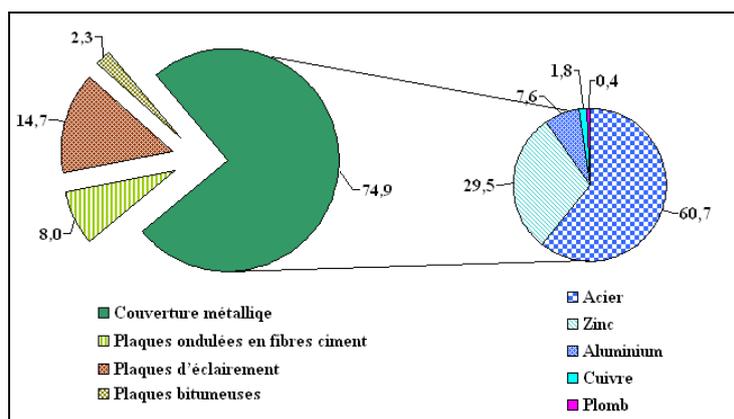


Figure 37 : Marché des grands éléments de couverture en Ile-de-France en 2005 (en %) (MSI, 2006; Robert-Sainte, 2009)

Le marché des petits éléments de couverture est dominé par la vente de la tuile en terre cuite avec 59% de parts de marché contre 70,7% à l'échelle nationale en 2005 (cf. Figure 38). En deuxième position vient la tuile béton avec 16,6% de parts de marché contre 7% à l'échelle

nationale. En Ile-de-France la part de marché des tuiles béton est deux fois plus importante qu'à l'échelle nationale ce qui s'explique par des facteurs économiques et historiques. La proportion de l'ardoise naturelle est presque la même en Ile-de-France et à l'échelle nationale avec respectivement 14,9% et 14,3%.

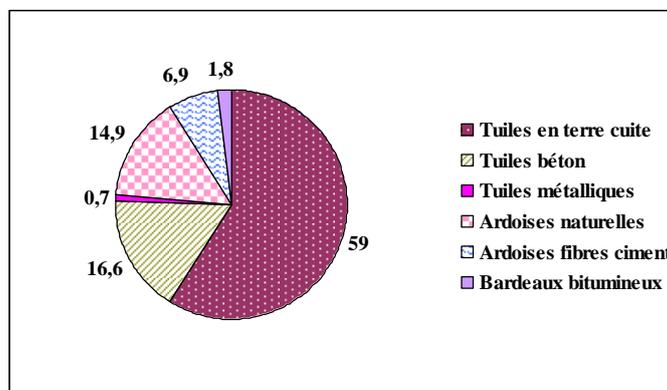


Figure 38 : Marché des petits éléments de couverture en Ile-de-France en 2005 (en %) (MSI, 2006; Robert-Sainte, 2009)

- Hiérarchisation des matériaux de rampant en Ile-de-France en 2005

Pour conclure, le marché des éléments de couverture (grands et petits) (cf. Figure 39) en Ile-de-France est dominé par la vente de la tuile en terre cuite avec 42,4% de parts de marché. En deuxième position vient l'acier avec environ 13%. La tendance de la répartition de ces deux matériaux est la même qu'à l'échelle nationale. A partir de la troisième position les ventes des différents matériaux à l'échelle de l'Ile-de-France changent par rapport à l'échelle nationale. En effet, en troisième position vient la tuile béton avec 12% de parts de marché suivi de l'ardoise naturelle avec environ 11% et ensuite le zinc avec 6,2%.

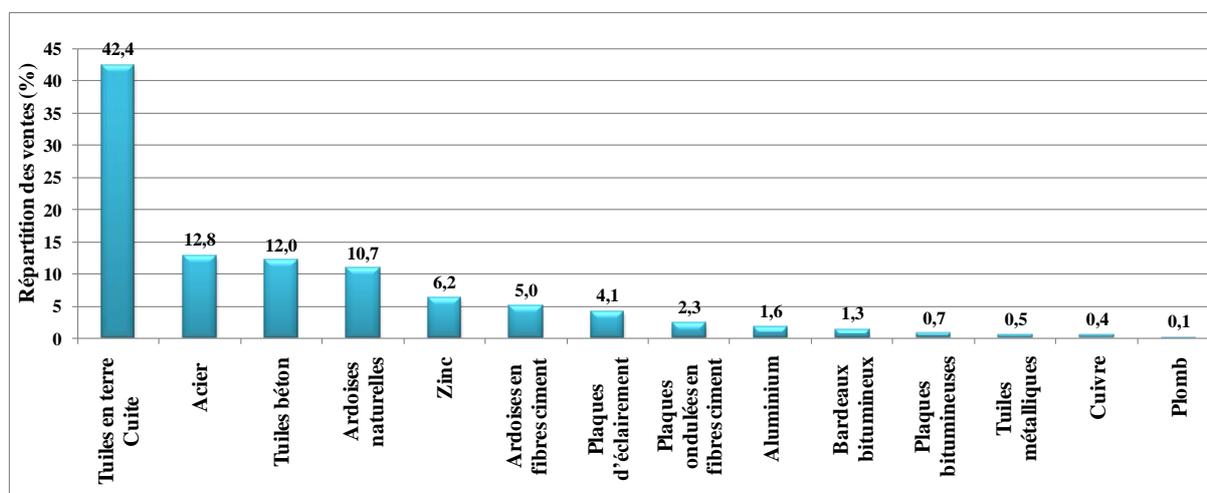


Figure 39 : Hiérarchisation des ventes des matériaux du rampant en Ile-de-France en 2005 (%) (MSI, 2006)

4.2. Hiérarchisation des matériaux d'étanchéité des toitures-terrasses

4.2.1. Aperçu général du marché en France

Le marché de l'étanchéité de toiture-terrasse est très fortement lié à la construction de bâtiments non résidentiels et de logements collectifs. Les toitures-terrasses servent de plus en plus de station technique. Ainsi, les toitures-terrasses nécessitent une étanchéité performante pour accueillir par exemple des stations de téléphone ou de climatisation. La répartition du marché de l'étanchéité de toiture-terrasse selon le secteur utilisateur (cf. Figure 40) révèle une forte utilisation de ces produits dans le secteur non résidentiel à 80% quelles que soient les années. Ce sont surtout les membranes synthétiques qui sont les plus utilisées sur des bâtiments à usage commercial ou encore les bâtiments industriels. Le secteur résidentiel est à plus de 90% représenté par les habitats collectifs.

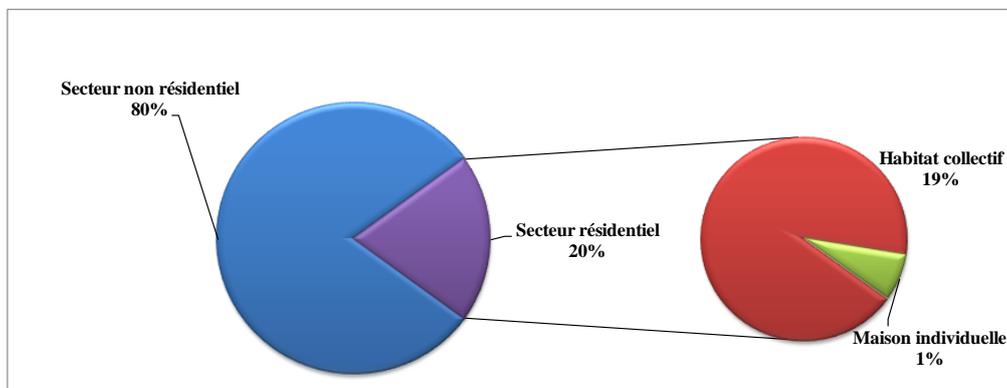


Figure 40 : Marché de l'étanchéité de toiture-terrasse, par secteur d'utilisation en 2011 (MSI, 2012)

En 2011, il s'est vendu 27 millions de m² de produits d'étanchéité de toiture-terrasse, contre 22,4 millions de m² en 2001. Nous constatons, cependant, que ce marché n'est que très peu affecté par la conjoncture de 2009, et reste donc stable et augmente même à partir de 2010 (cf. Figure 41).

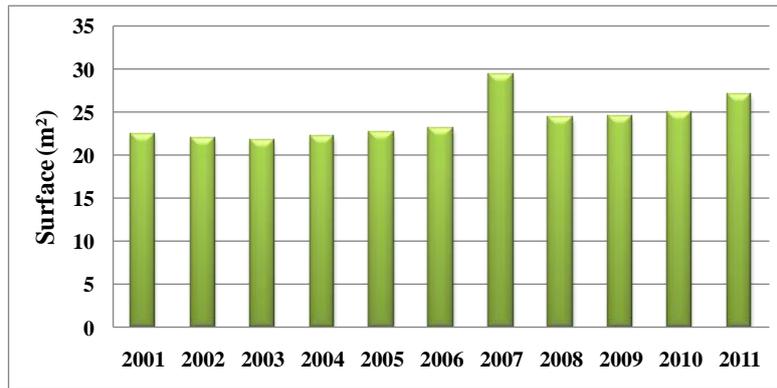


Figure 41 : Evolution du marché des matériaux d'étanchéité-toiture entre 2001 à 2011 (par rapport à la surface vendue (m²)) (MSI, 2006 ; MSI, 2012)

Contrairement aux matériaux de couverture de rampants, les critères de sélection d'une membrane d'étanchéité-toiture dépendent surtout de son coût (à l'achat et à la pose), de la facilité de mise en œuvre, de sa longévité, etc.

Le marché français de l'étanchéité-toiture a été segmenté de la façon suivante :

- les membranes bitumineuses ;
- les membranes synthétiques ;
- l'asphalte ;
- les systèmes d'étanchéité liquide (SEL).

L'évolution du marché des matériaux d'étanchéité est représentée par la Figure 42. Elle montre une *stabilité* sur les 11 années d'étude.

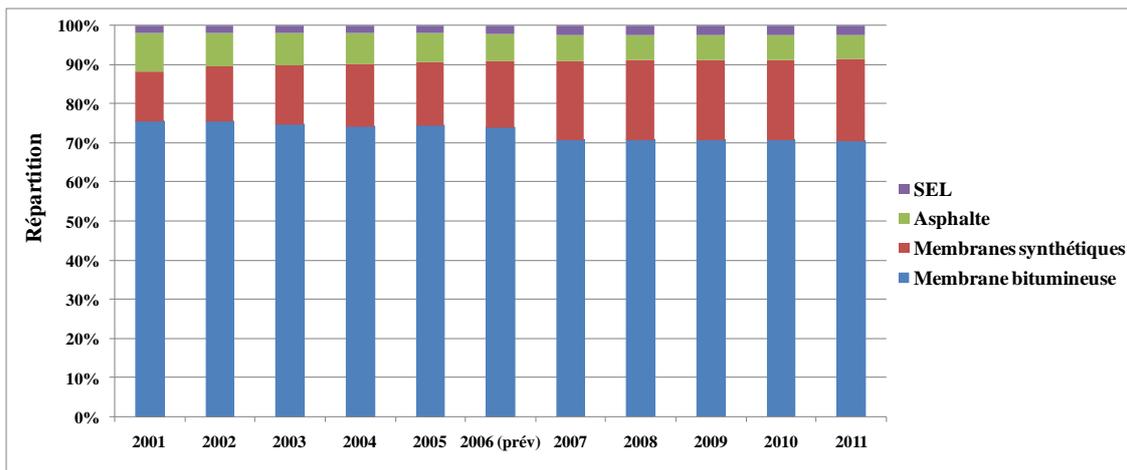


Figure 42 : Marché de l'étanchéité des toitures-terrasses en France, de 2001 à 2011, par type de matériaux (MSI, 2006 ; MSI, 2012) (Trébalage, 2013)

Les *membranes bitumineuses* dominent le marché de l'étanchéité avec 73% de part de marché moyenne sur les 11 années d'étude. Cette première place est due aux habitudes de pose des

professionnels de la toiture qui y ont recours. Nous assistons à une forte demande pour les membranes bitumineuses SBS à 80% et environ 20% pour les membranes APP. En effet, les membranes SBS ont été développées en France alors que les membranes APP sont principalement utilisées dans les autres pays d'Europe comme l'Allemagne ou la Belgique. D'autre part, les membranes SBS offrent une très bonne élasticité alors que les membranes APP sont pliables à froid.

Les membranes bitumineuses sont de plus en plus concurrencées avec les produits synthétiques. En effet, les membranes bitumineuses sont plus contraignantes à poser que les produits synthétiques, souvent plus légers et plus propres. Le bitume est un matériau plus pénible à travailler et n'offre pas le confort d'installation des membranes synthétiques. Par ailleurs, comparées aux membranes synthétiques, les membranes bitumineuses se heurtent au problème du recyclage qui concerne de plus en plus les utilisateurs. Ainsi, elles deviennent « incompatible » avec le concept de bâtiment de haute qualité environnementale (HQE)).

Les *membranes synthétiques* qui concurrencent les membranes bitumineuses commencent à augmenter, à partir des années 2007, avec plus de 20% de parts du marché, car elles bénéficient d'innovations techniques importantes (flexibilité, légèreté, faible épaisseur, coût sur le long terme et à long terme) et d'une bonne communication auprès des acteurs concernés. Les membranes synthétiques bénéficient aussi de qualités environnementales qui séduisent de plus en plus les constructeurs : il existe même un programme de collecte, Roofcollect, des membranes mise en place par l'ESWA (association européenne des producteurs de membranes d'étanchéité synthétiques pour toitures). C'est surtout la membrane synthétique en PVC-P qui est la plus populaire avec plus de 70% des parts du marché des membranes synthétiques. Les autres membranes (TPO (polyoléfine thermoplastique) et EPDM) ne représentant même pas 15%.

La vente des autres types d'étanchéité de toiture-terrasse, même si elle est en augmentation, demeure faible surtout pour les SEL (environ de 2% pour les SEL). Le manque de notoriété des SEL, leur coût, font que leur utilisation est encore restreinte, même si ceux-ci bénéficient de bons atouts, tels que le temps de séchage rapide, pose facile, etc. L'utilisation de l'étanchéité asphalte diminue lentement, mais à long terme ce type de revêtement d'étanchéité ne va plus être appliqué.

4.2.2. Marché en Ile-de-France

Il n'existe pas de spécificités régionales particulières sur le marché de l'étanchéité toiture. Toutefois, ces types de couvertures sont principalement utilisés dans le secteur non-résidentiel

pour les bâtiments industriels, commerciaux, et administratifs et dans le secteur résidentiel, pour les logements collectifs. La demande de produits d'étanchéité-toiture est ainsi plus importante dans les régions où la construction de logements collectifs et de bâtiments non-résidentiels est particulièrement dynamique.

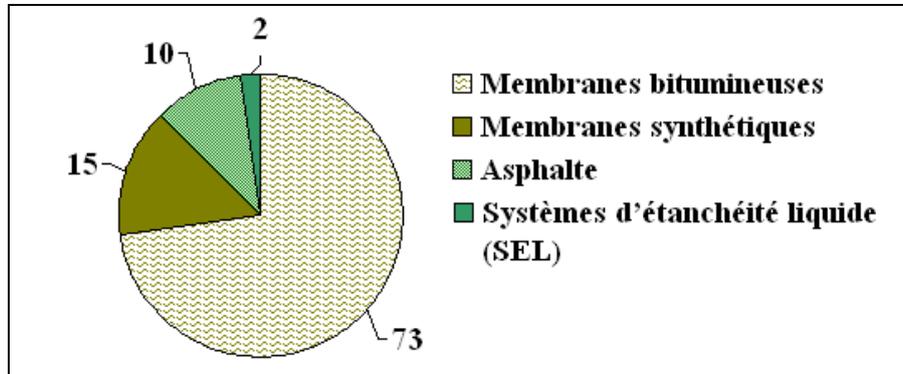


Figure 43 : Marché des produits d'étanchéité-toiture en Ile-de-France, par type de matériau en 2005 (en%) (MSI, 2006)

D'après la [Figure 43](#), le marché en Ile-de-France (IDF) est très proche du marché de l'étanchéité en France en 2005. En effet, les membranes bitumineuses représentent environ 73% de parts de marché à l'échelle de l'Ile-de-France contre 74% à l'échelle nationale. En deuxième position nous trouvons toujours les membranes synthétiques avec une part de marché entre 15% en IDF contre 16% en France. Ensuite l'asphalte représente 10% de parts de marché en IDF contre 8% en France et enfin les SEL représentent 2% du marché au niveau des deux échelles.

4.3. Cas des toitures végétalisées

La toiture végétalisée est un cas à part de la toiture-terrasse. Cette couverture aide à l'isolation thermique et participe à la gestion des eaux pluviales en soulageant un peu les réseaux d'assainissement. Dans l'édition 2006 de l'étude de marché des couvertures de toits en France, cette couverture n'était pas du tout présente. En effet, si on regarde les volumes de ventes des toitures végétalisées, à partir de 2007, son utilisation décolle et continue d'augmenter jusqu'en 2011, avec 1,46 millions de m² vendus (cf. [Figure 44](#)).

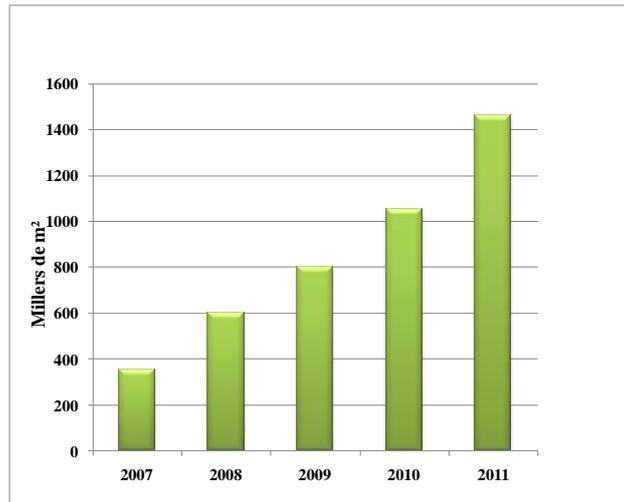


Figure 44 : Evolution du marché de la toiture végétalisée entre 2007 et 2011 (MSI, 2012)

L'expansion de la mise en œuvre des toitures végétalisées s'explique par :

- Une meilleure connaissance par les professionnels des caractéristiques de ce produit, suite au développement des maisons HQE ;
- Démocratisation progressive, avec l'intensification de la concurrence qui conduit à une diminution des coûts ;
- Efforts d'amélioration du produit par les fabricants qui permet une pose plus facile et rapide.

De plus, l'installation d'une toiture végétalisée présente des avantages à l'échelle de la ville et intéresse donc de nombreuses collectivités, puisqu'en absorbant l'eau de pluie, elle réduit la quantité d'eau de ruissellement déversée dans les égouts. C'est pour cela que la région parisienne a commencé à intégrer le concept de végétalisation des toitures dans les documents d'urbanisme. Enfin, de nombreuses études confirment également les avantages des toits qui incitent à les intégrer aux logements afin de réduire les consommations énergétiques (Hongbing *et al.*, 2011).

Le marché des toitures végétalisées est réparti entre trois types de produits : 97% de toiture végétalisée de type extensive (végétalisation légère et demandant peu d'entretien, avec végétation basse), 3% de toiture végétalisée semi-intensive et moins de 1% de toiture végétalisée de type intensive (cf. Figure 45). La forte proportion de la toiture végétalisée extensive est due à son adaptation à tous types de structure du bâtiment, car elle ne conduit à aucun surpoids complémentaire.

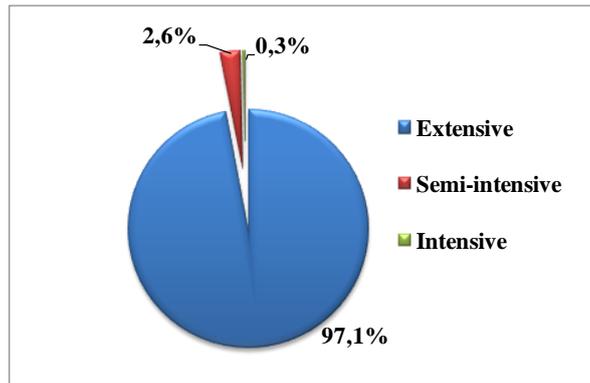


Figure 45 : Marché des toitures végétalisées, par type de matériaux en 2011 (MSI, 2012)

En ce qui concerne son utilisation par secteur, nous remarquons que les $\frac{3}{4}$ du marché sont assurés par des maîtres d'ouvrages publics, à la fois pour les bâtiments administratifs mais également pour l'habitat collectif. Ce type de solution commence aussi à apparaître sur les nouveaux bâtiments classés HQE, surtout dans l'enseignement et la santé.

5. Synthèse

5.1. Variétés des matériaux de toiture et marché

Le [Tableau 5](#) résume la répartition des matériaux de rampant sur les 11 années d'étude (2001-2011). Nous remarquons bien que la donnée par variété de matériau n'est pas toujours disponible.

Tableau 5 : Les matériaux potentiellement existants à l'échelle urbaine : Répartition du marché par famille et par variété des matériaux de rampant sur les 11 années d'étude (2001-2011)

| Famille de matériau | Variété | Marché par variété | Marché par famille de matériau |
|---|--|--------------------|--------------------------------|
| Tuile | Terre cuite engobée Terre cuite émaillée Terre cuite siliconée | 44% | 48,9% |
| | Béton | 4,5% | |
| | Métallique | 0,4% | |
| | Plastique | - | |
| Ardoise | Naturelle | 9% | 12,5% |
| | Fibres ciment | 3,5% | |
| Plomb | Plomb | 0,1% | 0,1% |
| Cuivre | Cu-b (Cu-DHP) | - | 0,3% |
| | Le cuivre allié | - | |
| | Cuivre prépatiné | - | |
| Zinc | Naturel allié (Zn-Cu-Ti-Al) | - | 3% |
| | Prépatiné | - | |
| | Bi-laqué | - | |
| | Coloré en masse | - | |
| | Allié au cadmium | - | |
| Acier | Inoxydable | - | 18% |
| | Galvanisé | - | |
| | Prélaqué | - | |
| Aluminium | Les alliages d'aluminium : - Alliage Cu et Mg - Alliage de silicium affiné au sodium | - | 1,3% |
| | L'aluminium prélaqué | - | |
| Bardeaux bitumeux | Bardeaux bitumeux | 1,2% | 1,2% |
| Plastique | Polyester | - | 3,6% |
| | PVC | - | |
| | Polycarbonate | - | |
| | PMMA | - | |
| Plaques Bitumineuses | Bitume | 0,6% | 0,6% |
| Plaque ondulées en fibres ciment | Fibres ciment | 11% | 11% |

Le [Tableau 6](#) résume la répartition des matériaux d'étanchéité des toitures-terrasses entre 2001 et 2011. Au contraire des matériaux de rampant, l'information sur la répartition des variétés des différentes membranes d'étanchéité est disponible.

Pour les toitures végétalisées nous ne disposons que de la répartition entre toiture intensive, extensive et semi intensive pour 2011 ([cf. Figure 45](#)).

Tableau 6 : Les matériaux potentiellement existants à l'échelle urbaine : Répartition du marché des matériaux d'étanchéité sur les 11 années d'étude (2001-2011)

| Famille de matériau | Variété | Marché par variété | Marché par famille de matériau |
|------------------------------------|---------|--------------------|--------------------------------|
| Membranes bitumineuses | SBS | 58,4% | 73% |
| | APP | 14,6% | |
| Membrane synthétiques | PVC-P | 12,6% | 18% |
| | TPO | 2,7% | |
| | EPDM | 2,7% | |
| Asphalte | - | - | 7% |
| Système d'étanchéité liquide (SEL) | - | - | 2% |

Enfin, la comparaison des ventes des matériaux de rampant et ceux des étanchéités terrasses montre que les matériaux des toitures inclinées dominent le marché des matériaux de toiture (cf. Figure 46). En revanche, à partir de 2007 nous remarquons une augmentation des ventes des membranes d'étanchéités par rapport aux matériaux de rampant. Ainsi, nous passons d'un rapport de vente de membranes d'étanchéité sur les matériaux de rampant de 18% entre 2001 et 2007 à un rapport de 23,5% en 2011 (cf. Figure 47). Ceci montre que les toitures-terrasses prennent de plus en plus de place dans le paysage urbain Français par rapport aux toitures inclinées.

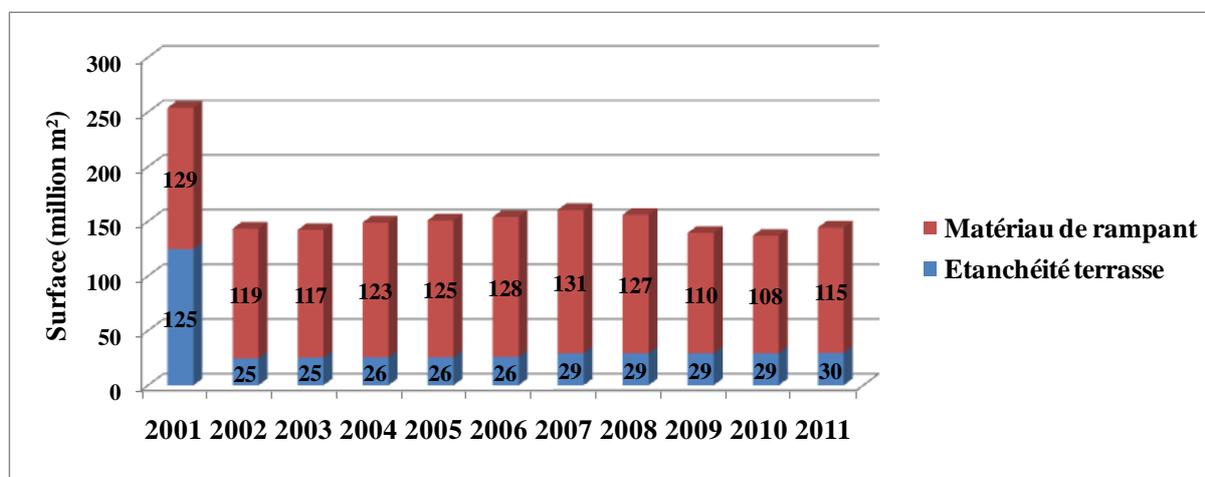


Figure 46 : Marché des surfaces vendues (en millions de m²) des matériaux de rampant et des étanchéités terrasse en France entre 2001-2011 (MSI, 2006 ; MSI, 2012)

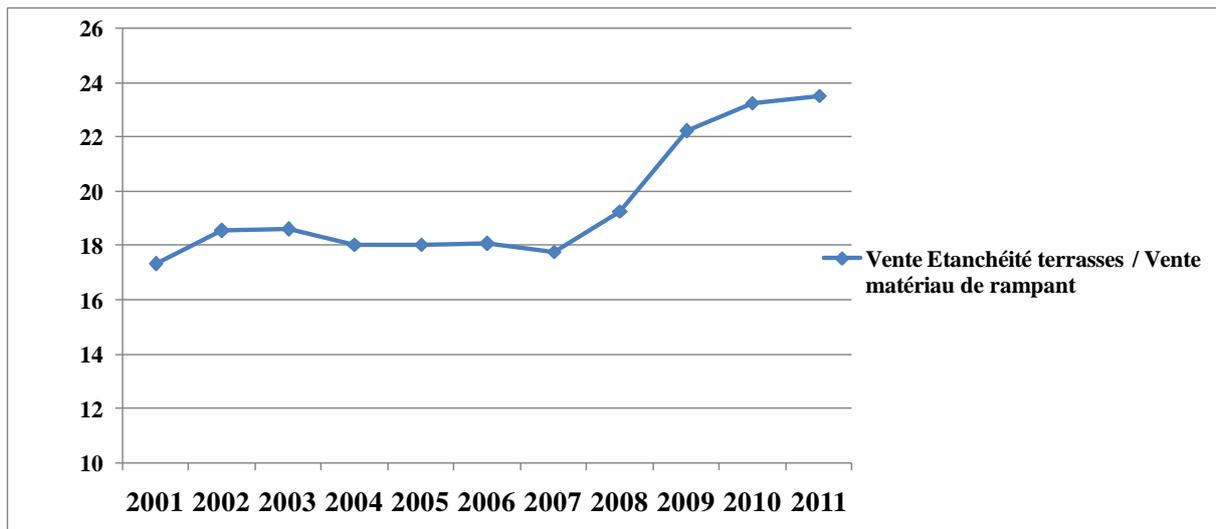


Figure 47 : Marché des surfaces vendues (en millions de m²) des matériaux de rampant et des étanchéités terrasse en France entre 2001-2011 (MSI, 2006 ; MSI, 2012)

5.2. Répartition des matériaux de rampant entre marché et patrimoine

En France, la répartition des ventes des matériaux de rampant et des étanchéités terrasse est stable sur les 11 années d'étude. Cette stabilité donne indirectement une idée sur la répartition patrimoniale des matériaux de toiture que nous pouvons supposer suivre la tendance du marché en particulier pour les matériaux dominants. Mais ceci n'est pas validé car nous avons besoin de données complémentaires en particulier historiques. En effet, les matériaux qui existent aujourd'hui sont apparus à des dates différentes de plus certains matériaux comme l'amiante ont été interdits mais ils existent toujours dans le patrimoine bâti. Donc, nous avons besoin d'une vision historique pour compléter les connaissances acquises à partir de l'étude du marché sur les matériaux. L'étude historique sera dressée dans le [Chapitre 1.2](#).

Chapitre 1.2. Les matériaux de couverture entre l'histoire de l'urbanisation de la ville et l'histoire de la technologie industrielle

En regardant une ville (cf. Figure 48), nous trouvons un paysage spécifique et très diversifié de matériaux de toiture. Cette diversité est marquée par une empreinte historique. Des toitures anciennes en cuivre, des toitures-terrasses nouvelles, des toitures en tuiles, des monuments historiques...



Figure 48 : Paysage de la ville de Paris

L'évolution historique de l'urbanisation de la ville ainsi que le développement rapide de l'industrie et la technologie des matériaux agissent sur l'utilisation, l'apparition, la disparition et l'évolution d'un matériau. Cette évolution se manifeste par l'apparition de nouveaux matériaux, des nouvelles méthodes de fabrication, des améliorations apportées aux propriétés des matériaux, une forte augmentation de l'utilisation de certains matériaux et enfin la concurrence entre matériaux (Sandström, 1994).

Cette évolution historique relie deux choses la *ville* et les *matériaux de construction*. Ce duo est extrêmement dépendant, l'évolution de l'un explique l'autre et inversement.

Dans ce chapitre, nous allons présenter dans un premier temps l'histoire de l'évolution du paysage urbain croisée avec l'histoire de l'architecture. Dans un second temps, nous allons décrire l'évolution historique de chaque matériau et des contraintes réglementaires de l'époque en question lesquelles vont déterminer son usage ou voire même son interdiction. Deux tableaux ont été élaborés, un tableau résumant les grandes périodes d'évolution du paysage urbain français et un tableau chronologique a été conçu pour retracer et repérer les grandes lignes de l'évolution historique des matériaux de toiture. Il s'est avéré que la révolution industrielle a énormément marqué le paysage urbain et révolutionné le domaine de matériaux de toiture.

Une recherche bibliographique¹⁵ a été effectuée pour collecter les informations à partir des ouvrages de discipline chimie et bâtiments au sein des différentes bibliothèques universitaires, et plus spécifiquement celles qui sont liées à notre centre d'intérêt. Une quête de données au CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers) a été effectuée par le moyen de la consultation des guides et traités pratiques des architectes et manuels de couvreurs. Enfin, nous avons élaboré des entretiens avec les experts de la couverture qui ont permis d'approfondir des éléments historiques. La description de ces entretiens est dressée dans le [Chapitre 2.4](#).

Ces nombreuses références présentent des explications sur la mise en œuvre des différentes toitures, l'entretien et les caractéristiques de chaque matériau. Comme décrit dans le [Chapitre 1.1](#), certains matériaux subissent-ils des traitements spécifiques avant la mise en œuvre ou pendant la vie en œuvre ce qui conduit à des nouvelles variétés de matériaux ayant de nouvelles caractéristiques. Ceci entraîne à son tour de nouvelles données sur la contamination de l'eau de ruissellement. Dans ce chapitre, nous allons dater l'apparition des différentes variétés.

1. Histoire de l'urbanisation de la ville

La ville est définie comme un centre, un lieu de concentration non seulement de population, mais de civilisation. Elle forme, dans son ensemble, un organisme artificiel inséré dans

¹⁵ Le travail de repérage et de recherche bibliographique a été effectué dans le cadre d'un stage licence (Foughali, 2013), ce travail a été traité et analysé par nous dans ce chapitre.

l'environnement naturel, et lié à ce dernier par un rapport délicat ; elle respecte les grandes lignes du paysage naturel, qui en beaucoup d'endroits significatifs est laissé intact, elle l'interprète et l'intègre par des productions architecturales (Benevolo, 2004).

La notion de la ville est apparue depuis l'Antiquité. En tant qu'unité organisationnelle d'une civilisation, la ville évolue sensiblement au cours du temps. Avec la révolution industrielle, la ville connaît de grands changements avec la massivation de la population et donc une nécessité de réorganiser l'espace bâti faisant apparaître de nouveaux règlements d'urbanismes et de nouvelles approches d'aménagement.

1.1. La ville ancienne de l'Antiquité à la Renaissance

Dans ce paragraphe nous nous basons sur un travail de thèse sur l'histoire des villes « Lieux et modèles : l'exemple des villes de fondations au XXe siècle » (Le Xuan, 2011) et de l'ouvrage « Histoire des villes » (Benevolo, 2004) utilisé par Le Xuan (2011) et que nous nous procurons pour clarifier quelques idées.

1.1.1. La ville ancienne de l'Antiquité

Le milieu bâti de la société paléolithique est à peine une modification superficielle de l'environnement naturel, immense et hostile, dans lequel l'homme commence à se mouvoir. Le refuge est alors une cavité naturelle ou un abri de peaux posées sur une structure rudimentaire en bois.

L'environnement des sociétés néolithiques a évolué, il n'est plus uniquement un simple abri : il comprend désormais les terrains cultivés, les abris des hommes et des animaux domestiques, les dépôts de nourriture, l'outillage nécessaire à la culture, l'élevage, la défense la décoration et le lieu de culte (Benevolo, 2004). Cette civilisation s'organise dans des villages construits en cercles concentriques avec, au centre, les réserves, puis les huttes encerclées par une palissade protégeant les habitants des prédateurs et des tribus hostiles. Les matériaux utilisés pour ces bâtis sont issus des produits naturels (bois, végétaux et peaux d'animaux...).

Au début du III^e millénaire av. J.-C, les villes subissent des mutations en rassemblant désormais plusieurs dizaines de milliers d'habitants. Elles sont entourées d'un mur et d'un fossé qui les défendent et qui séparent pour la première fois, l'environnement ouvert naturel de l'environnement fermé de la ville. Les temples sont ainsi plus grands et plus élevés que les

simples maisons comprenant des ateliers, des entrepôts et des boutiques où vivent et travaillent différentes catégories de spécialistes (Benevolo, 2004).

Deux modèles de ville anciennes marquent l'histoire de la civilisation : le modèle grec et le modèle romain. La ville grecque est un modèle universel organisé : elle est divisée en trois zones : les zones privées occupées par les maisons d'habitation, les zones sacrées telles les enceintes des temples des dieux et les zones publiques destinées aux réunions politiques, au commerce, au théâtre, aux jeux du stade, etc. (Benevolo, 2004).

Après la ville grecque, la ville romaine marque énormément l'histoire pendant une douzaine de siècles. Ce modèle s'avère plus développé que celui grec. Pour la première fois dans l'histoire humaine, les Romains créent, sur l'ensemble du monde méditerranéen, de nombreuses agglomérations humaines, de colonies civiles et militaires, reliées entre elles et liées à Rome par un réseau complet d'infrastructures de grande qualité (les routes, les ponts, les aqueducs, les lignes fortifiées, etc.) assurant le fonctionnement d'un grand empire, autour de son centre de pouvoir. Les villes romaines regroupent les centres politiques, administratifs et religieux. Dans toutes les villes nous trouvons les mêmes types de bâtiments dont l'aspect ne diffère qu'en fonction des possibilités techniques et financières locales (Le Xuan, 2011).

1.1.2. La ville de la renaissance

En Europe, les villes médiévales se sont organisées autour de la cathédrale ou du château et sont protégées par leurs murs (Le Xuan, 2011). Il faut attendre la fin du Moyen-âge pour retrouver de grands mouvements créateurs (Benevolo, 2004). La Renaissance de l'Europe bouleverse le paysage urbain. Les places royales et les larges avenues deviennent les symboles des nouvelles villes. Il s'agit des villes fortifiées, de la ville princière à la place forte, conçues par les architectes et les ingénieurs militaires. Elles sont de forme strictement géométrique et symétrique avec des murs repoussés aux extrémités du territoire national par le travail de fortification de la frontière. Dans ce cadre apparaissent les villes royales européennes : Versailles, Saint-Pétersbourg, Karlsruhe, Schönbrunn, Caserte, etc. En France, depuis le début du 17^{ème} siècle, le territoire rural autour des villes subit une transformation radicale surtout autour de Paris. De grands travaux urbains sont effectués, surtout l'ouverture de places en formes régulières entourées de lotissements, et édifices royaux réalisés à Paris (Le Xuan, 2011). Ce mouvement persiste jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle. Les matériaux utilisés pendant cette époque sont à base de produits naturels mais plus élaborés. Il s'agit des pierres taillées, des matériaux produits à partir de l'argile (ex : terre cuite)...

1.2. La révolution industrielle et la ville moderne

La révolution industrielle, apparue dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle, provoque un grand bouleversement à tous les niveaux en Angleterre puis dans le monde entier. Elle est considérée parmi les mutations fondamentales de l'histoire humaine (Benevolo, 2004). Cette révolution touche particulièrement le milieu bâti, ainsi l'organisation de la ville et du territoire sont influencés. En effet, les villes connaissent une croissance fulgurante, le nombre d'habitants augmente. En Angleterre ce nombre passe de 7 millions en 1760 à 14 millions en 1860 et de même à Paris ce nombre double entre 1850 et 1970. De plus, la structure de la population change car le nombre de jeunes augmente. Les biens et les services produits par l'agriculture, l'industrie et les activités tertiaires augmentent aussi, grâce au progrès technologique et au développement économique. Ce développement est poussé par la croissance de la population qui réclame des biens et des services plus nombreux. Cette nouvelle population en accroissement a été redistribuée sur le territoire. Les paysans qui étaient propriétaires exploitants deviennent salariés ou bien ouvriers dans l'industrie (Benevolo, 2004). Pour faire face à cette croissance, de nouvelles formes de planification et d'interventions vont apparaître. Un nouveau paysage urbain se dessine, l'apparition de nouveaux bâtiments tels que les usines qui se concentraient autour des villes (AOCDF, 1989). Les moyens de communications se développent : les routes à péage, les canaux navigables, réalisés en Angleterre à partir de 1760, les voies ferrées introduites en 1825 et diffusées rapidement dans plusieurs pays, l'apparition des navires à vapeurs, etc. (Benevolo, 2004).

L'époque industrielle provoque une croissance extrêmement rapide de la ville caractérisée par la formation d'une nouvelle zone autour de la ville appelée *la périphérie*. En effet, le centre de la ville s'est formé au Moyen-âge, il renferme les principaux monuments tels que l'église et le palais qui souvent dominant encore le panorama de la ville. Avec la nouvelle forme de la ville, ce centre ne peut devenir le centre d'une agglomération humaine plus grande. En effet, les rues sont trop étroites pour contenir le trafic en expansion, les maisons sont trop petites et trop compactes pour abriter sans inconvénients une population plus dense (Benevolo, 2004). Par exemple, à Paris, le style Haussmannien, façonne la ville telle que nous la connaissons aujourd'hui. La population ouvrière est refoulée vers les quartiers périphériques. Au centre, s'installe la bourgeoisie avec ses résidences, ses grands magasins et ses édifices publics ; les transports urbains sont développés. À Londres, la City perd 70 % de ses habitants entre 1800 et 1870. Ainsi, les classes possédantes abandonnent peu à peu le centre pour s'installer dans la

périphérie et les pauvres s'entassent dans les vieilles maisons. Les édifices monumentaux de la ville historique sont abandonnés, les zones vertes (ex : les jardins situés derrière les maisons) sont occupées par de nouvelles constructions tels que les hangars industriels (Benevolo, 2004).

Dans la suite nous nous focalisons sur le développement du paysage urbain français à partir de la révolution industrielle.

Le parcours de l'histoire de l'urbanisme de la période allant du milieu du 19^{ème} siècle jusqu'au début du 21^{ème} siècle nous permet de cerner des repères importants voire parfois décisifs dans l'évolution de l'architecture urbaine en particulier pour les toitures.

Ce paragraphe s'est basé sur les ouvrages « Histoire du paysage français » (Pitte, 1984), « La ville et ses territoires » (Roncayolo, 1982) et « La ville d'aujourd'hui » (Roncayolo, 2001). Pour l'histoire de l'architecture nous nous basons sur les ouvrages « L'architecture moderne en France Tome 1 1889-1940 » (Loupiac *et al.*, 1997), « L'architecture moderne en France Tome 2 : Du chaos à la croissance 1940-1966 » (Abram et Monnier, 1999), « L'architecture moderne en France Tome 3 : De la croissance à la compétition 1967-1999 » (Monnier, 2000) et « Architecture en France (1940-2000) : Histoire et théories » (Lucan, 2001).

1.2.1. La révolution industrielle : 1850 -1900

La révolution industrielle a fortement marqué le développement des techniques architecturales. Ces modifications ont été ressenties en premier plan au niveau des bâtiments liés à la production. En effet, au 18^{ème} siècle, aucune distinction n'est faite entre un hôpital, un palais, une caserne et des manufactures. Un grand nombre de villes se sont dotées de ceintures de lotissements. Les premiers lotissements du milieu du 19^{ème} siècle sont l'école, la maison individuelle entourée d'un jardin.

L'architecture de cette époque est basée sur l'utilisation du métal. Ainsi, à partir de 1850 l'utilisation du métal est favorisée dans les nouveaux de bâtiments, notamment les charpentes et les planchers. Le succès du métal (fer et acier) est dû à la facilité et la rapidité de sa mise en œuvre ainsi que le gain d'espaces assurés par les structures métalliques. Néanmoins, l'utilisation du métal est partielle et masquée comme à l'Opéra de Paris (1861-1875) où Charles Garnier dissimule sous les marbres les ossatures métalliques. A partir de 1890, le métal est franchement exprimé dans les usines, certains magasins, certains bâtiments administratifs ou des immeubles industriels.

La fin du 19^{ème} siècle a été marquée par l'invention du béton armé en 1867 utilisé en première fois dans un immeuble à Paris en 1892. Ainsi, l'acier est soumis à la concurrence du béton armé.

1.2.2. Les nouvelles formes de logements : 1900-1920

La loi de Siegfried qui fut promulguée en 1894, a encouragé l'habitation à bon marché (HBM). Il s'agit de nouvelle forme de logements sociaux. Ce texte est amélioré en 1906 et 1908 avec la création de la société de Crédit Immobilier. La loi Bonnefoy du 23 décembre 1912 consiste le véritable point de départ d'une politique du logement moderne. Ainsi, les HBM font leur apparition. Ces hautes constructions de 6 à 8 étages sont réalisées dans toute la France, les plus connues se sont celles localisées à Paris.

La loi du 31 décembre 1913 relative aux monuments historiques et à leurs abords, dote les édifices classés d'une protection absolue et les édifices inscrits à l'inventaire supplémentaire d'une protection plus légère.

1.2.3. La croissance urbaine et l'apparition de la toiture-terrasse : 1920-1940

La croissance urbaine reprend après la première guerre mondiale, plus de deux millions de personnes viennent s'installer en ville. La réorganisation de l'espace bâti se manifeste entre les deux guerres (1920-1939) par une séparation entre les zones industrielles des quartiers d'habitation des ouvriers. Des zones exclusivement industrielles voient le jour à côté du paysage anarchique des banlieues industrielles.

Une loi mise en place le 2 mai 1930¹⁶ permet un classement des sites urbains ou ruraux. Cette initiative introduit en même temps les notions de monuments naturels et de sites protégés.

La période qui suit l'année 1936 comporte la date de l'institution des congés payés généralisés. Ainsi, avec le climat de stabilité de l'après-guerre, les citoyens français prennent l'habitude de partir en vacances ce qui favorise la construction des stations balnéaires de type familial, sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique.

Cette période (1920-1940) est caractérisée par une architecture moderne¹⁷. Dans ce cadre, Le Corbusier revendique une architecture esthétique basé sur la pureté, la simplicité, l'exactitude et la nudité. Il refuse tout ornement et se concentre sur les formes géométriques et sur la

¹⁶ Loi du 2 mai 1930 relative à la protection des monuments naturels et des sites de caractère artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque.

¹⁷ Le mouvement modernisme est un courant principal de l'architecture apparu après la deuxième guerre mondiale en France. Ces trois composantes principales sont le fonctionnalisme, le rationalisme, la puissance de la forme. La puissance de la forme se traduit par la construction des tours de plusieurs étages.

volumétrie. En 1922, le Corbusier, tenant d'un urbanisme fonctionnaliste, met au point son « Projet pour une ville contemporaine de trois millions d'habitants », qu'il applique en 1925 à Paris sous le nom du « Plan voisin », suivi en 1930 du projet « Ville radieuse ». Il exprime pour la première fois ses conceptions. A ce propos la toiture est systématiquement en terrasse dans les nouvelles constructions en particulier dans la banlieue parisienne.

En 1938 cinq tours de 16 étages avec des toitures-terrasses sont construites à Drancy. A cette occasion, le premier gratte-ciel (90 m) construit en France voit le jour à Amiens en 1948.

Cette période est caractérisée par l'utilisation de matériaux métalliques nouveaux de construction (ex : acier) surtout dans les zones industrielles. Ainsi, une architecture usinière plus gaie fait son apparition avec l'utilisation de l'aluminium, de l'acier inoxydable, des peintures de couleurs vives, etc.

1.2.4. La reconstruction et l'instrumentation de l'urbanisme : 1940-1960

Entre 1940 et 1944 débute la première reconstruction des villes suite à la destruction de près de 70 000 bâtiments et l'endommagement de 200 000 bâtiments pendant la guerre. Ainsi, des projets sont lancés partout en France. La loi du 25 février 1943 relative à la protection des abords des monuments historiques, instituant un périmètre de protection d'un rayon de 500 m autour des monuments historiques provoque des profonds changements dans l'histoire de l'urbanisme. A cet effet, aucune transformation ou construction d'immeuble à l'intérieur de ce périmètre ne peut avoir lieu sans autorisation.

La deuxième reconstruction est débutée avec la mise en place d'un appareil d'Etat. Ainsi, en 1945, un événement de portée particulièrement décisive est survenu; il s'agit de la création du Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme (MRU). A partir de 1945, les principes d'urbanisme sont inspirés par Tony Garnier le fondateur de l'urbanisme progressiste¹⁸. Ces principes se basent sur la séparation des fonctions urbaines par un zonage strict : travail, résidence, loisir, commerce. Cette année marque aussi le début des « trente glorieuses ». Les constructions sont en béton armé avec des toitures-terrasses. Le changement ne cesse de s'opérer dans le paysage urbain. Le Corbusier déploie tout de même une certaine activité en construisant dans plusieurs villes des Unités d'Habitation dans le cadre du projet « Ville radieuse ». A titre d'exemple, celle de Marseille voit le jour entre 1947 et 1952.

¹⁸ L'urbanisme progressiste est fondé par Charles Fourier, Robert Owen, puis Le Corbusier. Il se base sur la rationalité de l'usage des sols et des formes urbaines, la séparation des fonctions, l'organisation des trames viaires et des réseaux routiers et de transports collectifs, la standardisation des formes construites, l'importance des espaces verts, de l'air et de la lumière...

Entre la période de la fin de la guerre et 1950, la reconstruction demeure limitée dans ses effets sur le paysage urbain, une reprise lente de la construction a commencé en 1950. A partir de 1960, le rythme de construction s'accélère jusqu'au pic de 1975. Ce bouleversement est dû à 3 grands facteurs déclenchés après la guerre :

- la croissance industrielle et tertiaire et le retour d'un million de Français d'Afrique du Nord ;
- l'évolution économique : durant une vingtaine d'années les pouvoirs publics se sont contentés à satisfaire les besoins quantitatifs en logements. Ceci explique le choix du collectif et ensuite qualitatif qui favorise l'accession à la propriété de maisons individuelles ;
- la notion des monuments historiques se développe en France où une nouvelle doctrine à leur restauration et entretien prend forme en prônant la discrétion des travaux effectués. Ces projets sont ainsi animés par l'esprit de retour aussi proche que possible aux techniques anciennes et surtout l'élimination des parties ou des décors ajoutés à la construction originelle.

Des grandes constructions apparaissent comme celle de Firminy et Berlin en 1957, celle de Nantes de 1952 à 1957 et celle de Briey-en-Foret de 1955 à 1960. Il s'agit d'immenses immeubles-barres de 17 niveaux. La toiture-terrasse est réservée comme espace de jeux pour enfants.

Les plans d'Urbanisme Directeurs (PUD) sont mis au point en 1958. Ils ont la fonction de déterminer les modalités de l'aménagement et de la croissance spatiale des villes.

1.2.5. Le développement de la construction des tours et des règlements d'urbanisme : 1960-1970

C'est principalement à partir de 1960 que l'Etat, à l'aide des municipalités et des promoteurs privés, envisage la construction en hauteur. En effet, durant la période de l'après-guerre, les IGH (immeubles à grande hauteur) se multiplient seulement pendant une quinzaine d'années. A titre d'exemple, un immeuble d'habitation de 22 étages est construit en 1958 dans le 13^{ème} arrondissement de Paris au 33 rue Croulebarbe. Par la suite, la construction d'un certain nombre de gratte-ciels beaucoup plus hauts a pris le relais dans le cadre de la rénovation du quartier Italie. Après ces quelques essais, la construction de tours est adoptée à Paris pour tous les quartiers soumis à la rénovation. Les toitures sont toujours des terrasses. Cette période est caractérisée par la construction des villes de logements dans la banlieue parisienne.

A partir des années 1960 débute une grande époque de rénovation (conservation, restauration, réhabilitations) des quartiers anciens. Ainsi, une politique de conservation des monuments historiques se déploie. A ce propos, le 4 août 1962 apparaît une loi complétant la législation sur la protection du patrimoine historique et esthétique de la France et tendant à faciliter la restauration immobilière. Elle touche certains quartiers qui présentent un caractère historique, esthétique ou de nature à justifier la conservation. Un décret d'application est mis en place l'année suivante pour instituer les « plans Permanents de Sauvegarde et de mise en valeur » qui remplacent dans les périmètres concernés tous les plans d'urbanisme antérieurs.

La délégation à l'Aménagement du Territoire (DATAR) est créée en 1963. Elle a pour objectif de superviser la reconversion des vieilles régions industrielles du Nord et du Nord-est et tente d'instaurer le rééquilibrage de la France vers l'Ouest. De plus, avec l'hyperdensification des centres, une décision est ainsi prise en 1965, visant à créer 9 villes nouvelles. Celles-ci sont appelées à la gestion et fixation de la croissance en perspective. Il s'agit des villes dans la périphérie de Paris : Cergy-Pontoise, Saint-Quentin-en-Yvelines, Evry, Melun-Sénart et Marne-la-vallée les autres sont en province : Le Vaudreuil (entre Paris et Rouen), Villeneuve-d'Ascq (près de Lille), l'Isle-d'Abeau (près de Lyon) et Rives-de-l'Etranger-de-Berre (près de Marseille). Seuls ces neuf centres ont droit à l'appellation de « *ville nouvelle* » et sont gérés par un établissement public.

Le but étant d'éviter la croissance anarchique des grandes agglomérations, les nouveaux habitants sont regroupés dans ces villes. Le plan d'aménagement de ces villes comporte 50% de leur étendue en espaces verts et entourées de zones agricoles protégées il s'agit « *des villes à la campagne* ». L'urbanisme employé est dit « éclaté » c'est-à-dire que ces villes sont constituées de plusieurs petits villages offrant des services élémentaires et d'un centre administratif et commercial.

Le 30 décembre 1967 une nouvelle loi est votée appelée la loi d'Orientation Foncière qui oblige toutes les agglomérations d'au moins 10000 habitants à se doter de deux documents fondamentaux : un Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (SDAU) et un plan d'Occupation des sols (POS). Ces plans définissent la structure relative à chacun des secteurs assurant quatre fonctions clés : habitat, travail, autocréation (durant les heures libres) et circulation. Un coefficient d'Occupation des sols (COS) est également imposé. Il correspond au rapport entre la superficie de la parcelle et celle des planchers en vue d'édification. Le POS fixe aussi une emprise au sol pour chaque zone et une norme de hauteur maximale pour les constructions.

Le PUD à Paris qui date de 1967 a d'importantes conséquences, comme il relève le plafond de hauteur des immeubles à 37 m en particulier dans le secteur de la rénovation.

Au courant de la même année, la procédure des zones à Urbaniser en Priorité (ZUP) connaît un immense succès. Il est utile de noter que la plupart des ZUP s'élèvent dans des quartiers périphériques, et parfois dans des banlieues lointaines et mal desservies. A cet effet, 177 ZUP sont réalisées et des milliers de petites cités d'HLM (habitation à loyer modéré) sont en même temps construites un peu partout sur le même modèle. La majorité des ZUP comptent plus de 3000 logements. Elles constituent donc d'énormes agglomérats urbains.

En 1968, l'Ecole des beaux-arts considérée comme trop académique a été rejetée et des grandes écoles d'architecture ont été créées en 1969 tels que l'école nationale supérieure d'architecture de Paris-Belleville et l'école nationale supérieure d'architecture de Paris-La Villette. Ainsi, un nouveau décret est apparu : le décret n°78-266 du 8 mars 1978 fixant le régime administratif et financier des unités pédagogiques d'architecture.

1.2.6. L'urbanisme contemporain : 1970-1980

L'année 1974 marque la fin des « trente glorieuses ». Les années 1970 sont caractérisées par l'émergence d'une nouvelle génération des architectes qui ont rompu avec l'Ecole des beaux-arts. La nouvelle tendance est orientée vers une architecture et un urbanisme contemporain qui exprime l'augmentation du désir d'autonomie de chaque foyer grâce à des terrasses.

Entre 1964 et 1975, 54 « Secteurs Sauvegardés¹⁹ » sont créés. Parmi les premières villes à se doter du nouvel instrument, figurent Lyon, Chartres, Saumur, Sarlat, Aix-en-Provence, Paris (le Marais), etc. De nouveaux organismes voient le jour, tels que l'Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat (ANAH) fondée en 1971, les offices d'HLM qui commencent à acquérir des immeubles anciens à restaurer à partir de 1972.

Cette période est caractérisée par la multiplication des lotissements encouragée par : l'élévation du niveau de vie, l'abaissement des coûts de construction grâce à l'industrialisation, les facilités de crédit consenties à partir des années 1960. Mais c'est surtout après 1970 qu'il devient possible de jouer sur l'inflation grâce au règlement Chalandon mis en application de 1971 à 1976 et qui rend constructible presque tout le territoire français.

¹⁹ D'après le code d'urbanisme, un secteur sauvegardé est une zone urbaine soumise à des règles particulières en raison de son « caractère historique, esthétique ou de nature à justifier la conservation, la restauration et la mise en valeur de tout ou partie d'un ensemble d'immeubles bâtis ou non ».

Entre 1965 et 1975, une grande concurrence entre les constructeurs a motivé la recherche du plus faible coût, d'où la fabrication au détriment de la qualité des matériaux. Ceci est encouragé en 1969 par le ministre lors du concours de 70000 « chalandonnettes²⁰». Entre 1971 et 1974 plus de 20% des nouveaux bâtiments à usage agricole sont construits dans toute la France avec des matériaux les moins onéreux possibles : parpaings, fibrociment.

En 1976, le rapport Nora²¹ (Rapport sur l'amélioration de l'habitat ancien) préconise la modernisation de l'habitat ancien collectif et sa réintégration dans le marché de l'immobilier. Le fonds d'Aménagement Urbain (FAU), destiné à mener les opérations d'aménagement des centres et quartiers existants est créé en 1976.

En 1976, Valéry Giscard d'Estaing demande l'abandon de la construction des tours et de tous les immeubles d'habitation de hauteur excessive. Le règlement d'urbanisme, limite ainsi les constructions neuves à sept étages. Cette décision peut s'expliquer par l'apparition en 1969 des nouvelles écoles d'architecture qui s'opposent aux constructions des tours. Ce sont ainsi des « nouveaux villages » qui sont construits mêlant maisons individuelles et petits collectifs.

En 1977, la loi sur l'architecture permet de voir la naissance d'organismes départementaux appelés Conseils d'Architecture d'Urbanisme et d'Environnement (CAUE)²². Au cours de la même année, la procédure des Opérations Programmées d'Amélioration de l'Habitat (OPAH) est promulguée. Elle donne aux collectivités locales l'accès à une convention avec l'ANAH. Cette initiative a pour but de restaurer un certain nombre de logements dans un quartier délimité et inciter l'amélioration de la totalité du parc immobilier de la commune.

1.2.7. Mouvement de la valorisation des villes : 1980-Aujourd'hui

Au début des années 1980, l'architecture de la ville était devenue relativement « modeste ». Les tours sont de simples logements autour d'un espace public. Ainsi, l'Etat fait appel à une valorisation des villes nouvelles comme Marne la Vallée et Saint-Quentin en Yvelines. Une incitation des architectes à proposer de nouvelles formes et architectures, en particulier pour les équipements (ex : hôtel de ville, équipement de tourisme) et les bâtiments culturels (ex :

²⁰ Le concours Chalandon est un concours International de la Maison Individuelle lancé par le ministre Albin Chalandon. Il s'agit de la construction de 70 000 pavillons individuels.

²¹ Rapport Nora. Ce rapport critique l'action menée jusqu'alors par les pouvoirs publics. Il propose de donner à l'habitat ancien toute sa place dans la politique du logement et encourage des actions de réhabilitation plus légères. Trois objectifs : préserver le patrimoine, sauver les cœurs de ville, aider les plus défavorisés.

²² Les Conseils d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement ont pour vocation la promotion de la qualité architecturale, urbaine et environnementale, ce qui les conduit à exercer quotidiennement les missions suivantes : informer, sensibiliser, les citoyens, les agents et élus des collectivités territoriales sur l'urbanisme et le développement durable ; conseiller les particuliers désireux de construire ou de rénover, les collectivités locales sur leurs projets d'urbanisme, d'architecture; former les maîtres d'ouvrage publics, les professionnels, architectes, artisans, les enseignants sur les constructions, la réglementation, les économies d'énergie...

centre d'archive, médiathèque), en exploitant divers matériaux comme le béton, le métal, le verre, etc. Les grandes villes de province appellent au monumentalisme ou d'amples remaniements de leurs espaces publics. Ainsi, Nantes se dote de son cours des Otages (aménagée dans les années 1930 et 1940), Marseille de son Hôtel du Département (cf. Figure 49) et Strasbourg de son palais de l'Europe (cf. Figure 50).



Figure 49 : Hôtel du Département à Marseille



Figure 50 : Palais de l'Europe à Strasbourg

A partir des années 1990, le concept de bâtiments de haute qualité environnementale HQE fait son apparition. Il s'agit d'une démarche volontaire proposée aux maîtres d'ouvrages permettant d'évaluer les performances du bâtiment. Ce dernier doit être sain et confortable dont les impacts sur l'environnement sont évalués et maîtrisés sur l'ensemble du cycle de vie (HQE association). Dans ce cadre les architectes mènent de nombreuses recherches pour concevoir des édifices remplissant les critères du « développement durable ». Par exemple, une meilleure isolation thermique des bâtiments est assurée en mettant en œuvre le double vitrage.

Pendant les années 2000, la notion de « paysagiste » fait son apparition, elle relève de la conscience plus aigüe des rapports avec la nature. La nature est ainsi disciplinée, intériorisée, fut toujours plus ou moins intégrée dans la ville sous forme de jardins, parcs, promenades, des fontaines... Les toitures végétalisées sont de plus en plus installées et encouragées.

La nouvelle réglementation thermique RT 2012 est considérée par les experts des matériaux de toitures comme un événement déclencheur de changement dans la construction : matériaux, formes, capacité de production de l'énergie, etc. Ainsi, les acteurs de la construction (les maîtres d'ouvrage, les industriels, les architectes...) vont employer de nouveaux moyens, procédures et technologies pour satisfaire cette réglementation.

1.2.8. Synthèse : les grandes périodes du développement du paysage urbain Français

D'après le [Tableau 7](#), l'évolution du paysage urbain Français est très sensible à partir de la révolution industrielle, à la fin du 19^{ème} siècle, avec l'apparition de nouvelles fonctions de bâtiments tels que la maison individuelle entourée d'un jardin, l'immeuble, l'école, l'usine, etc. A partir des années 1920, une nouvelle organisation des villes apparaît en séparant les zones industrielles de la banlieue. Pendant cette époque les toitures-terrasses font leur apparition encouragées par le Corbusier. Ainsi, les grandes tours de logement, dotées de terrasse, se multiplient au sein des villes de la banlieue. Ce paysage des logements dans des grands immeubles, a pris plus son poids avec la décision de 1965 visant à créer 9 villes nouvelles. Ce paysage continue à se développer jusqu'à la fin des années 1970. A partir des années 1980, un rejet de cette architecture en tours a été affirmé par une nouvelle architecture basée sur la valorisation de la ville avec l'intégration des équipements dans la ville doté de nouvelles formes de bâtiments plus valorisante avec des matériaux esthétiques. Enfin, à partir des années 2000, de nouvelles approches environnementales font leurs apparitions telles que les bâtiments HQE, la notion de ville durable, etc. L'urbanisme de la ville vise, de plus en plus, à préserver et respecter l'environnement.

Tableau 7 : Tableau chronologique de l'évolution du paysage urbain français à partir du 19^{ème} siècle

| La révolution industrielle 1850-1900 | Les nouvelles formes de logements 1900-1920 | L'apparition de la toiture-terrasse et réorganisation des 1920-1940 | L'instrumentation de l'urbanisme 1940-1960 | Le développement de la construction des tours et des règlements d'urbanisme 1960-1980 | Mouvement de la valorisation des villes 1980- Aujourd'hui |
|---|---|--|--|---|--|
| <p>1850 : Utilisation du métal favorisée dans les nouveaux de bâtiments, notamment les charpentes et les planchers.</p> <p>1867 : Invention du béton armée</p> <p>1890 : Le métal est franchement exprimé dans les usines, certains magasins, certains bâtiments administratifs ou des immeubles industriels.</p> <p>1892 : Premier immeuble en béton armé bâti à Paris</p> <p>1894 : Promulgation de la loi de Siegfried et Apparition des habitations à bon marché (HBM)</p> | <p>1912 : Apparition des HBM</p> <p>1913 : une nouvelle loi dote les édifices classés d'une protection absolue et les édifices inscrits à l'inventaire supplémentaire d'une protection plus légère.</p> | <p>1920 -1939 : Nouvelle organisation des Zones exclusivement industrielles à côté des banlieues industrielles.</p> <p>1925 : - Les toitures-terrasses inspirées par le Corbusier font leurs apparitions</p> <p>- Projet du Plan voisin</p> <p>1930 : Une loi mise en place de classement des sites urbains ou ruraux ainsi que des monuments naturels et de sites protégés.</p> <p>1938 : Construction de cinq tours de 16 étages à Drancy.</p> <p>1936 : Institution des congés payés généralisés. Et apparition des stations balnéaires de type familial sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique.</p> <p>1948 : Le premier gratte-ciel (90m) construit en France voit le jour à Amiens.</p> | <p>1940-1944 : La première reconstruction des villes</p> <p>1943 : Une nouvelle loi institue un périmètre de protection d'un rayon de 500m autour des monuments historiques</p> <p>1945 :</p> <p>- La deuxième reconstruction et le début des « trente glorieuses »</p> <p>- Création du Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme.</p> <p>- Les principes d'urbanisme après l'année 1945 sont inspirés par Tony Garnier le fondateur de l'urbanisme progressiste.</p> <p>1952 : Apparition d'immenses immeubles-barres de 17 niveaux. Le toit-terrasse est réservé pour espace aux jeux des enfants.</p> <p>1958 : Mise au point des plans d'Urbanisme Directeurs (PUD)</p> <p>1960 :</p> <p>- Création de l'Institut d'aménagement et d'urbanisme de la Région parisienne (IAURP), qui deviendra l'IAURIF en 1976 et l'IAU IDF en 2009.</p> <p>- Elaboration du PADOG, ou Plan d'Aménagement et D'Organisation Générale de la Région Parisienne, prescrit par le Général de Gaulle.</p> | <p>1962 : Loi du 4 août 1962 complétant la législation sur la protection du patrimoine historique et esthétique de la France et tendant à faciliter la restauration immobilière.</p> <p>1963 :</p> <p>- Un décret d'application est mis en place pour instituer les « plans Permanents de Sauvegarde et de mise en valeur » qui remplacent dans les périmètres concernés tous les plans d'urbanisme antérieurs.</p> <p>- Création de la délégation à l'Aménagement du Territoire (DATAR) pour superviser la reconversion des vieilles régions industrielles du Nord et du Nord-est.</p> <p>1964 : Création des huit métropoles d'équilibre</p> <p>1965 : Elaboration du Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région de Paris (SDAURP) qui prévoit la création de 9 villes nouvelles pour gérer et fixer la croissance.</p> <p>1965-1975 : Une grande concurrence entre les constructeurs a motivé la recherche du plus faible coût, d'où la fabrication au détriment de la qualité des matériaux. Ceci a été encouragé en 1969 par le ministre lors du concours de 70000 « chalandonnettes ».</p> <p>1967 : - Loi d'Orientation Foncière est votée le 30 de décembre 1967 obligeant toutes les agglomérations d'au moins 10000 habitants à se doter de deux documents fondamentaux : un Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (SDAU) et un plan d'Occupation des sols (POS). Un coefficient d'Occupation des sols (COS) est également imposé.</p> <p>- Une procédure des zones à Urbaniser en Priorité (ZUP) connaît un immense succès. 177 ZUP sont réalisées dans des quartiers périphériques, et parfois dans des banlieues lointaines et mal desservies.</p> <p>1968 : rejet de l'Ecole des beaux-arts considérée comme trop académique</p> <p>1969 : création des grandes écoles d'architecture tels que l'école nationale supérieure d'architecture de Paris-Belleville et l'école nationale supérieure d'architecture de Paris-La Villette.</p> <p>1971 : Fondation de l'Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat (ANAH)</p> <p>1972 :</p> <p>- Les offices d'HLM commencent à acquérir des immeubles anciens à restaurer</p> <p>- Démolition des derniers bidonvilles de Nanterre</p> <p>1973 : Inauguration de la tour Montparnasse</p> <p>1974 : fin des « trente glorieuses »</p> <p>1971-1976 : Mise en application du règlement Chalandon qui rend constructible presque tout le territoire français. 1975 : Rapport Nora préconise la modernisation de l'habitat ancien collectif et sa réintégration dans le marché de l'immobilier.</p> <p>1976 :</p> <p>- Approbation du Schéma Directeur de la Région d'Île-de-France (SDRIF)</p> <p>- Création des fonds d'Aménagement Urbain (FAU) chargé de mener les opérations d'aménagement des centres et quartiers existants</p> <p>La loi de 1976 s'est vue complétée par la possibilité de créer des zones d'Environnement protégé (ZEP).</p> <p>- La loi de 1976 relative à la protection de la nature, rend désormais obligatoire la réalisation d'une étude ou d'une notice d'impact pour tout l'ouvrage conséquent, qu'il soit visible ou non dans le paysage.</p> <p>- Valéry Giscard d'Estaing demande l'abandon de la construction des tours et de tous les immeubles d'habitation de hauteur excessive pour lutter contre l'enlaidissement de la France.</p> <p>1977 : - Naissance des organismes départementaux appelés Conseils d'Architecture d'Urbanisme et d'Environnement (CAUE)</p> <p>- Promulgation de la procédure des Opérations programmées d'amélioration de l'habitat (OPAH)</p> <p>- Le POS de Paris est approuvé</p> <p>1978 : apparition du décret n°78-266 du 8 mars fixant le régime administratif et financier des unités pédagogiques d'architecture.</p> <p>1979 : Création de la Fédération nationale des agences d'urbanisme (FNAU)</p> | <p>1980 :</p> <p>- Rejet de l'architecture des villes de logement</p> <p>- Une nouvelle recherche de valorisation des villes par le monumentalismes.</p> <p>1990 : Apparition du concept de bâtiments HQE</p> <p>1994 : Approbation par décret du Schéma Directeur de la Région d'Île-de-France (SDRIF)</p> <p>1996 : Création de l'association HQE</p> <p>2000 : Apparition de la notion de paysagiste une intégration plus marquée de la nature dans la ville</p> <p>2003 : L'Agence nationale pour la rénovation urbaine (ANRU) voit le jour</p> <p>2004 : Mise en place de la certification « NF ouvrages-Démarches HQE » par l'association HQE</p> <p>2012 : Apparition de la RT 2012</p> |

2. Histoire des matériaux de couverture

Jusqu'au milieu du 19^{ème} siècle, la majorité des constructions sont réalisées selon les traditions régionales avec des matériaux disponibles localement (Wignacourt, 2009). Au début du 20^{ème} siècle, la tendance est au matériau universel, capable de couvrir tous les types de toits (ex : la tuile mécanique comme un modèle standard suffisamment efficace, avec un réseau de distribution bien ramifié, pouvait s'approprier une grande partie du marché).

Aujourd'hui, à cause du développement des technologies de construction et de fabrication, les matériaux de couverture industriels se sont énormément diversifiés. Cette variété se retrouve à l'échelle d'une agglomération actuelle où avoisinent une grande quantité de matériaux différents dont l'unité est difficile à retrouver, si ce n'est dans les formes traditionnelles du passé ou dans les couleurs, parfois, grâce aux réglementations pour la protection des sites (AOCDF, 1989).

A l'heure actuelle, au niveau du patrimoine bâti, des couvertures nouvelles sont construites, tandis que d'autres, anciennes, disparaissent ou bien d'autres encore, moins anciennes, sont refaites avec le même matériau ou avec des matériaux de remplacement. Pour comprendre ce paysage évolutif, nous allons étudier l'évolution de chaque matériau au cours du temps (apparition, disparition...). Nous allons commencer par étudier les matériaux de rampant pour les toitures inclinées suivi d'une analyse de l'histoire des matériaux des toitures-terrasses pour finir par les matériaux des autres éléments de toitures (gouttières, noue, descente, etc.). Enfin, un tableau chronologique de l'évolution des matériaux de toiture est dressé.

2.1. Les matériaux de rampants des toitures inclinées

2.1.1. Le chaume

Le chaume est le plus ancien matériau utilisé en toiture (cf. Figure 51). Dans toutes les régions de France, les chaumières sont construites vu qu'à l'origine la paille de seigle ou la paille de blé est facilement accessible (Rodighiero, 1960). L'emploi de la paille de seigle et la paille de blé sont abandonnées au profit du roseau. L'usage du chaume en toiture se voit restreint en milieu campagnard, sous l'effet de l'industrialisation de la tuile et l'ardoise (Rodighiero, 1960). Aujourd'hui, la toiture en chaume n'existe plus dans les villes (entretien avec A. Texier).



Figure 51 : Toiture en chaume

2.1.2. Le bois

L'usage du bois en toiture est aussi ancien que celui du chaume (cf. Figure 52). Ces deux matériaux ont par ailleurs en commun le défaut d'être facilement inflammables. Jusqu'au 13^{ème} siècle l'emploi du bois dans la couverture, comme c'est le cas pour le chaume, ne connaît pas de concurrence autre que celle de la tuile. Mais, comme le bois a alors un coût moindre à celui du chaume et la tuile, il a été privilégié pendant les périodes de misère agricole du 14^{ème} siècle (ce siècle est marqué en France par un refroidissement du climat estimé à 1 °C) (Lebouteux, 2007). Au cours du 19^{ème} siècle, l'utilisation du bois est largement répandue le long de la côte Atlantique. Cependant, c'est principalement dans la montagne et dans les régions à climat rude, que ce type de couverture est très employé.

La mise en œuvre d'une toiture nécessite une main-d'œuvre spécialisée (Govin, 2004). Ceci explique en partie son coût élevé jusqu'au 19^{ème} siècle, et qui reste d'ailleurs très supérieur à celui de la tuile ou de l'ardoise jusqu'aujourd'hui.



Figure 52 : Toiture en bois

La couverture en bois se voit subir des traitements chimiques dans le but de réduire le gonflement du bois et garantir la stabilité des panneaux. Parmi ces composants il existe : l'oxyde de butylène et de propylène, l'anhydride acétique, les formaldéhydes, les acrylonitriles, les époxy (Govin, 2004). Les tuiles de bois peuvent avoir une durée de vie variant de 30 à 120 ans (Viollet-le-Duc, 1856).

Le bois est revêtu par la peinture à base de plomb, ce contact crée un nouveau composé appelé le blanc de céruse (Viollet-le-Duc, 1856). Ce composé provoque le percement du bois,

mais il est également considéré comme un composant polluant et toxique (Viollet-le-Duc, 1856). C'est pourquoi une réglementation s'est déployée en 1993 pour interdire l'utilisation du plomb dans la peinture²³.

2.1.3. L'ardoise

Les premiers usages de *l'ardoise naturelle* en toiture remontent au 12^{ème} siècle (cf. Figure 11). Au 14^{ème} siècle, elle se répand en Ile-de-France. L'emploi de l'ardoise en couverture se développe fortement au cours du 16^{ème} siècle avec une part de marché qui n'a cessé d'augmenter. A partir du 19^{ème} siècle et grâce à la contribution apportée par le développement des moyens de transport et surtout du chemin de fer, l'ardoise devient de plus en plus accessible et remplace progressivement le chaume. Au cours de la période 1815-1914, elle a connu également une remarquable croissance de sa courbe de vente aux dépens de la tuile plate (Bernandi, 2011 ; Magne et Somme, 1954). A la fin du 20^{ème} siècle, les ardoises naturelles ont quasiment laissé la place à celles en fibre-ciment. D'après les experts de la couverture, *l'ardoise en fibres ciment* est apparue sur le marché de couverture à partir des années 1950 (cf. Figure 12). Les fibres en amiante sont remplacés ultérieurement par les fibres organiques suite à l'interdiction de l'amiante en 1997 (Bernstein *et al.*, 1997).

2.1.4. L'amiante-ciment

L'amiante-ciment ou fibrociment est inventé en 1901. C'est le produit à base d'amiante le plus utilisé dans le BTP (Bâtiments et Travaux Publics) à cause de son faible coût de production (5 fois inférieur à celui des fibres minérales artificielles). Il sert principalement pour la fabrication de plaques de papier ou carton employé pour les faux plafonds, plaque d'isolation ou joints d'étanchéité. En couverture, l'amiante a été utilisée, jusqu'à son interdiction, sous forme d'ardoises ou de plaques en fibres ciments (Bernstein *et al.*, 1997).

L'amiante a été fortement utilisée durant la période de reconstruction après la seconde guerre mondiale. En particulier, entre 1973 et 1975 où environ 150.000 tonnes d'amiante par an ont été utilisés en France²⁴. Fin 1996, l'emploi de l'amiante est définitivement interdit par décret à cause de ses effets cancérigènes²⁵. Pourtant, jusqu'aujourd'hui encore, il existe plusieurs

²³ Il s'agit de l'arrêté du 1^{er} février 1993 relatif à l'interdiction de la peinture à la céruse aux non professionnels (propriétaires, locataires).

²⁴ <http://www.exim-expertises.fr/diagnostic-amiante-a4> (consulté le 10/02/2014)

²⁵ Décret n° 96-1133 du 24 décembre 1996 (JO du 26 décembre 1996) modifié par les décrets nos 2001-1316 du 27 décembre 2001 (JO du 29 décembre 2001) et 2002-1528 du 24 décembre 2002 (JO du 28 décembre 2002).

centaines de milliers d'ouvrages à base d'amiante. Ceux-ci représentent des risques de mortalité à des taux très élevés pour les populations qui y sont exposées²⁶.

2.1.5. La tuile

Les premiers usages de la *tuile en terre cuite* remontent loin dans l'histoire, sa fabrication débute vers 2700 avant J-C. Vers le 6^{ème} siècle, la tuile plate fait son apparition grâce au développement des techniques de charpente en bois ce qui entraîne l'innovation des toits plus pentus ([Techniques de l'ingénieur, 2013a](#)). L'essor de l'utilisation de la tuile en terre cuite en ville remonte au 12^{ème} siècle. En effet, les tuiles permettent de construire des toits à fortes pentes répondant aux exigences de l'aménagement des combles des habitations à plusieurs niveaux. A cette époque ce type de construction s'impose par souci de réduire les coûts du foncier dans les zones urbanisées. Entre le 18^{ème} et le 19^{ème} siècle et grâce au développement du transport ferroviaire, l'usage de la tuile en terre cuite s'étend à toute la France ([Techniques de l'ingénieur, 2013a](#)).

Il existe différentes finitions qui peuvent être utilisées pour une tuile en terre cuite : l'engobage, l'émaillage et le siliconage (cf. [Figure 10](#)). L'engobage et l'émaillage sont des techniques millénaires qui revêtent l'avantage d'être non seulement très esthétique, mais en même temps capables de protéger les tuiles de toutes sortes d'agressions ([Techniques de l'ingénieur, 2013a](#)). La technique de siliconage des tuiles apparaît dans les années 1950 : elle permet d'augmenter l'étanchéité de la tuile ([Lyonnet, 2004a](#) ; [Lyonnet, 2004b](#)).

Au début du 20^{ème} siècle, une nouvelle variété de tuile moins chère fait son apparition en Europe pour remplacer les tuiles en terre cuite traditionnelles : la *tuile béton*. Cette invention est née une fois que le ciment de Portland est devenu commercialement disponible²⁷. Précisément en 1919, la tuile béton fait sa première apparition en Angleterre. Plus tard en France, vers 1960, la tuile béton devient la nouvelle référence en matière de couverture moderne ([AOCDF, 1989](#)). Les progrès techniques ont permis l'innovation d'une gamme de coloris variée. Certaines d'entre elles rappellent des teintes naturelles, telles que l'ardoise et la lauze. Il existe différents procédés de coloration de surface qui peuvent varier d'une simple teinture sur toute la surface du matériau, au revêtement de sa surface par une fine couche de ciment coloré ([AOCDF, 1989](#)). Enfin, les tuiles en béton peuvent être également

²⁶ L'inhalation représente la voie principale de contamination par l'amiante, ou les fibres ayant pénétrées les voies respiratoires provoquant ainsi de graves pathologies pulmonaires.

²⁷ Le ciment de Portland breveté en 1824 pour Joseph Aspdin, sa commercialisation devient de plus en plus disponible suite au développement du four rotatif en 1902. Ainsi, les usines du ciment deviennent de plus en plus de performantes et productrices.

catégorisées suivant la variété de leurs formes. Ainsi, elles sont divisées en plusieurs groupes: tuiles rondes, tuiles plates, tuiles pannes ou tuiles à emboîtement (cf. Figure 7) (Ramani et Whittier, 2012).

2.1.6. Le Plomb

L'usage du plomb remonte à l'antiquité. Il est après le fer le métal, le plus employé sur les chantiers médiévaux. L'avantage du plomb est sa grande malléabilité : il se prête à toutes sortes de formes et plus particulièrement aux formes à double courbures tels que les coupôles et les dômes (cf. Figure 53). Il a été très utilisé au moyen-âge surtout pour les couvertures des cathédrales et des palais (Lebouteux, 2000; Lebouteux, 2007).

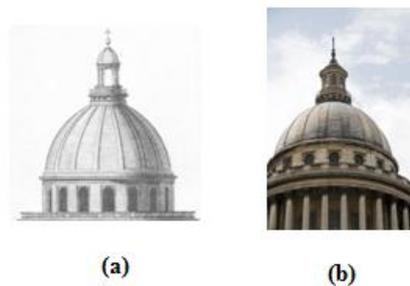


Figure 53 : (a) Plan de la coupole du Panthéon au 17^{ème} siècle; (b) Coupole du Panthéon vue d'aujourd'hui

Le plomb a évolué au cours du temps sous forme de différentes variétés :

- *Le plomb coulé sur le sable* : La première méthode de fabrication du plomb est le coulage sur sable. Cette fabrication avait l'avantage de laisser au métal toute sa pureté. En revanche, l'épaisseur n'était pas parfaitement homogène. Par conséquent, la dilatation agit aussi de façon inégale (Viollet-le-Duc, 1856). Au moyen âge le plomb est employé surtout dans les grandes églises et les résidences royales ou princières. Ainsi, le plomb est considéré comme signe de luxe (Viollet-le-Duc, 1856). En France la renaissance représente l'âge d'or du plomb entre décors et sculptures sur les toitures. Il accompagne ainsi la couverture d'ardoise des édifices importants en faitage, arêtiers, lucarnes, chéneaux... mais à la fin du 19^{ème} siècle, le plomb coulé sur le sable disparaît en France en laissant la place au plomb laminé (Lebouteux, 2007).

- *Le plomb étamé* : Au 18^{ème} siècle une nouvelle technique apparaît : elle consiste à « blanchir le plomb ». Le plomb reçoit un revêtement d'étain dans le but de lui donner un aspect plus esthétique. Ce procédé est répandu pour les éléments en plomb apparents tels que les descentes des eaux pluviales et les décors des toitures jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle. Le plomb

peut être doré ou peint et notamment découpé en toutes sortes de formes, vu qu'il se soude facilement soit sans apport soit par ajout de l'étain (Benoit, 2000).

- *Le plomb laminé* : En 1727, le premier laminoir s'installe à Paris. Le plomb est ainsi fabriqué sous forme de planches régulières s'adaptant bien à la sculpture et la mise en forme des moulures. Malgré l'essor du laminage, le plomb coulé sur sable est employé au début du 19^{ème} siècle pour refaire la couverture du dôme des invalides en 1869 (cf. Figure 54) comme c'est le cas pour la plupart des restaurations de l'époque (Belhoste, 2001).

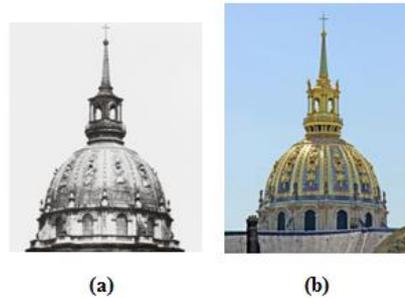


Figure 54 : (a) Dôme des invalides 1851-1870; (b) Dôme des invalides aujourd'hui

Avec la révolution industrielle du 19^{ème} siècle, le progrès de la métallurgie a provoqué l'effacement du plomb laminé devant le cuivre et le zinc. Son utilisation devient limitée à la restauration des monuments historiques avant d'être écarté (Lebouteux, 2000). Aujourd'hui, c'est le plomb laminé qui est utilisé surtout pour les éléments de toiture (faitage, étanchéité fenêtre...).

- *Le plomb pur* : En janvier 1982, une norme française A 55-401 est mise en place imposant au plomb une pureté de 99,9% (Lebouteux, 2007).

- *Le plomb recyclé* : Aujourd'hui, dans une approche environnementale les industries de plomb récupèrent le plomb usagé pour le recycler et le réutiliser de nouveau.

2.1.7. Le cuivre

L'usage du cuivre remonte à l'antiquité depuis les Grecs, les Romains et les Chinois. Utilisé sous forme de tôles, ce métal se trouve à l'état impur. Ainsi, au 16^{ème} siècle des traitements oxydo-réducteurs ont été effectués pour éliminer les impuretés donnant naissance au *cuivre rouge* ou encore contenant 0,1% d'étain (Sn). Ce produit est utilisé jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle (Texier et Costa, 2009). Il est important de noter à ce propos que le terme bronze est employé quand le cuivre est allié avec l'étain. Au Moyen Age, le cuivre disparaît de la construction en France en raison de l'épuisement des minerais très riches en cuivre. De plus,

le plomb étant un métal plus souple, est préféré au cuivre (Lebouteux, 2000). Entre 1600 et 1750, en France les toitures en cuivre refont leur apparition grâce à des accords politiques et commerciaux conclus avec la Suède. En effet, la mine de Stockholm est le principal fournisseur de cuivre pour l'Europe. Ainsi, en 1687, c'est du cuivre de Suède qui est employé pour la couverture de l'aile droite du château de Versailles (Texier et Costa, 2009) (cf. Figure 55).



Figure 55 : Aile du midi château de Versailles

Avec la révolution industrielle, le laminage du cuivre permet son utilisation comme matériau de toiture pour des bâtiments publics et quelques habitations de particuliers. En même temps, il est de plus en plus employé pour des éléments de décorations de toiture comme les statues, les ornements et les accessoires pour les bâtiments civils et religieux. A partir de 1881, le cuivre obtenu est suffisamment pauvre en éléments résiduels pour être considéré comme *pur* (Belhoste, 2001).

Dans les années 1940, les Américains lancent le *cuivre riche en arsenic* (à 0,5 %) pour la toiture et ses éléments. Ce matériau avait été initialement produit en 1920 pour la fabrication de chaudières de locomotives, à cause de sa résistance à la corrosion par les gaz chauds.

Le progrès dans la fabrication du cuivre continue pour aboutir à un cuivre exempt d'oxygène, appelé couramment en France cuivre Cu-b ou Cu-DHP, et qui contient aujourd'hui environ 0,3 ‰ de phosphore résiduel et peu d'impuretés. Le cuivre, de très haute pureté est employé en 1945 pour la couverture de l'église Sainte-Jeanne-de-Chantal, à Paris (cf. Figure 56).



Figure 56 : Église Sainte-Jeanne-de-Chantal (Paris)

L'année 1987 marque le développement d'une grande production du cuivre pour la toiture en France. Cet événement est la conséquence de la fusion de la société industrielle française de métallurgie (Tréfinmétaux) et la société métallurgique italienne KME Group (Texier et Costa, 2009).

Aujourd'hui, la quantité d'impuretés dans le cuivre est limitée (cuivre, cadmium, antimoine, bismuth, argent, étain et zinc). Elle répond à la norme NF EN 504 / 506 (AFNOR, 2007a). Le *cuivre allié* répond à la norme NF EN 1172 (AFNOR, 1996b). L'alliage employé en toiture contient du phosphore et parfois du zinc (Welter, 2007). La diminution de la consommation du cuivre en 2006 est liée à l'augmentation très élevée du coût des métaux (Texier et Costa, 2009).

2.1.8. Le zinc

En 1810, la première feuille de zinc sur un laminoir à acier est fabriquée. Dès l'année suivante, la première couverture en zinc laminé est réalisée pour une église en Belgique (Smits, 1927). Entre 1810 et 1850, le zinc fait son apparition en France sur des bâtiments industriels ou artisanales. En effet, le zinc est considéré comme un matériau non prestigieux par rapport au plomb. Il a subi, ainsi, des traitements pour le noircir et lui donner l'aspect le plus sombre possible afin d'avoir un aspect proche de celui du plomb (Smits, 1927).

En 1837, la société Vieille-Montagne des mines et fonderie de zinc est fondée en France. C'est la plus grande société de production du zinc extrait d'une mine au sud de la France. Cette société partage le marché du zinc avec la société la Compagnie royale asturienne des Mines fondée en 1853 par des Belges (qui avait une mine au nord de la France). Ces deux sociétés finissent par fusionner en 1987 en conservant le nom la Vieille-Montagne. Cette dernière fusionne à son tour avec des groupes belges ce qui donne le groupe Umicore en 2001 (entretien avec M. Bissery, VMZINC).

Le zinc présente plusieurs domaines d'applications telles que les fusibles, l'imprimerie et la production de l'acier galvanisé. Aujourd'hui, le zinc laminé est utilisé dans l'enveloppe du bâtiment mais aussi dans les funéraires en Italie et en Espagne (entretien avec M. Bissery).

L'utilisation du zinc dans le bâtiment se développe très sensiblement au cours de la période 1840-1870 qui correspond à la reconstruction de Paris sous la conduite du Baron Haussmann. A cette époque le zinc couvre 3/5 des nouvelles couvertures parisiennes (Smits, 1927). En effet, le zinc laminé présente de nouvelles caractéristiques correspondant aux attentes des constructeurs de l'époque. Il s'agit d'optimiser au maximum les espaces au sein du bâtiment et notamment les combles en abaissant les pentes des couvertures, les toitures sont ainsi en Mansart (Smits, 1927) (cf. Figure 57). Or, la réalisation des couvertures de faibles pentes avec les matériaux traditionnels (tuile, ardoise) pose des problèmes d'étanchéité. Donc, le zinc laminé s'est trouvé le matériau qui permettait de répondre à ces attentes (entretien avec M. Bissery) :

- il permet la réalisation des couvertures à faibles pentes de 5% ;
- le zinc est léger et permet d'alléger les charpentes donc il est économique ;
- le zinc est durable, facile à utiliser et à transformer.

Cette période est caractérisée par une forte accélération de l'utilisation du zinc laminé. Ainsi, le règlement d'urbanisme de la ville de Paris de 1884²⁸ modifié en 1902²⁹ détermine des gabarits-type pour la construction des immeubles et le développement des charpentes. En effet, les combles deviennent de plus en plus hauts avec un abaissement des pentes. Ceci a été suivi d'une validation des principes des couvertures dites à tasseaux (Smits, 1927) (cf. Figure 58).

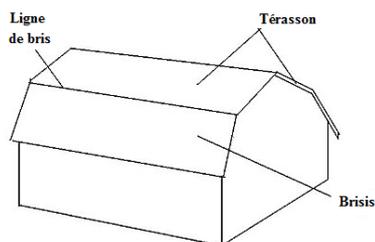


Figure 57 : Toiture en Mansart



Figure 58 : Couverture en zinc à tasseaux

²⁸ Ce règlement résulte d'un décret promulgué le 23 juillet 1884. L'un de ses principaux promoteurs est Jean-Charles Alphand, l'un des anciens collaborateurs d'Haussmann. Il fait suite au décret du 22 juillet 1882.

²⁹ Le règlement de voirie sur les hauteurs et saillies dans la Ville de Paris est promulgué dans un décret du 13 août 1902. Son principal auteur est Louis Bonnier, architecte-voyer de la Ville de Paris.

Au début, la production du zinc est basée sur un processus de raffinage du zinc pur issu des minerais par voie thermique. Les procédés métallurgiques se sont améliorés au fil du temps. D'une manière générale, le zinc laminé est quasiment pur. La pureté dépend de la capacité technologique à raffiner le zinc. Suite au saut technologique, vers la moitié du 20^{ème} siècle, le raffinage du zinc est transformé du thermique à l'électrolytique³⁰. Aujourd'hui, le zinc est raffiné à 99,995% (entretien avec M. Bissery) décrit par la norme NF EN 1179 Septembre 2003.

Le zinc présente l'inconvénient d'être mou. Ainsi, les industriels rajoutent des additifs pour améliorer les propriétés mécaniques du zinc en permettant par exemple une meilleure résistance au fluage. En 1930, le premier alliage zinc/ cadmium a été breveté³¹. Néanmoins, à cause de ses effets toxiques le cadmium est interdit et ainsi la première norme EN 988 qui décrit la composition du zinc est apparue en 1983 sous le nom NF A55-201 (1983-06-01). L'alliage du zinc normalisé contient du cuivre et du titane (Zn-Cu-Ti).

Les industriels du zinc continuent leur recherche de nouveautés dans le domaine du zinc. Ainsi, en 1978 le *zinc prépatiné* est apparu pour la première fois par VMZINC³². Cette patine protectrice grise est un traitement chimique par phosphatation. Sa protection est assurée par un recouvrement sur les deux faces d'une résine organique mince (site VMZINC). Le zinc prépatiné est associé avec les toitures en ardoise et en lauze, il est utilisé notamment pour les accessoires d'évacuation des eaux. En 1990, le *zinc bilaqué* est apparu par une production de VMZINC. En 2005, le premier *zinc coloré en masse* est produit par VMZINC sous la marque PIGMENTO avec 3 teintes : rouge terre, vert lichen, bleu cendre. En 2012 une nouvelle couleur de zinc coloré apparaît brun écorce (site VMZINC).

2.1.9. L'acier

La découverte du matériau de la tôle étamée ou encore *le fer-blanc* remonte loin dans l'histoire. Ainsi, les Athéniens posent de l'étain sur du fer chauffé (Lebouteux, 2007). A partir du milieu du 17^{ème} et jusqu'au 19^{ème} siècle, l'Angleterre devient le leader dans la fabrication du fer-blanc dont l'exportation atteint le monde entier (Mignery, 2000). En 1500, en France la

³⁰ L'électrolyse est une méthode qui permet de réaliser des réactions chimiques grâce à une activation électrique. Il s'agit de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique permettant de séparer les éléments d'un composé chimique.

³¹ http://www.silvaloy.com/fr/cadmium_fr.php

³² Société des Mines et Fonderies de Zinc de la Vieille-Montagne

production du fer-blanc apparaît dans la région Franche-Comté³³. Les toitures en fer-blanc sont une spécificité exclusive de cette région (Froidevaux, 2000). C'est qu'à partir du 18^{ème} siècle et jusqu'au début du 20^{ème} siècle que l'utilisation du fer-blanc se répand en France. Ce matériau a l'avantage d'être solide, incassable, léger et économique (Froidevaux, 2000). Au 19^{ème} siècle, en Savoie, le fer-blanc est utilisé en France en clochers à bulbes. Seulement, il ne résiste pas à l'oxydation, la tôle étamée a besoin donc d'une couche de peinture à l'huile pour être résistante à l'action de l'air (Lebouteux, 2007). Au 19^{ème} et au début du 20^{ème} siècle, le fer-blanc brillant est utilisé comme élément de couverture, alors que le terne est employé dans les gouttières ou les descentes d'eaux pluviales. L'emploi du fer-blanc disparaît au cours du 19^{ème} et il est remplacé ultérieurement par la tôle galvanisée (Mignery, 2000). Pour la restauration des constructions anciennes en fer-blanc, un matériau moderne proche du fer-blanc est produit : de l'acier étamé industriellement (par électrolyse) avec l'étain blanc ou un plomb étain ou encore un cuivre étamé (Pennec, 2000).

Avec la révolution industrielle et précisément en 1865, la production industrielle du fer se développe fortement en Europe. En 1910, la France devient le quatrième pays extracteur (bassin de Lorraine) et producteur de fer au monde (Hartmann, 1914).

L'acier se présente sous forme de différentes variétés :

-L'acier inoxydable

L'année 1913 marque le développement industriel de l'acier inoxydable en France. Cependant, c'est à partir des années 1950 qu'il est employé dans la couverture (Invernizzi, 2000). Différents produits de l'acier inoxydable sont mis sur le marché au fil du temps. En 1936, le premier acier inoxydable duplex apparaît en France pour résister contre la corrosion causée par la présence de chlore. Cependant, cet acier très riche en ferrite, a une résistance à la corrosion faible ce qui conduit en 1968 à l'affinage de l'acier inoxydable en rajoutant de l'azote comme élément d'alliage. C'est la naissance de « l'acier inoxydable duplex de seconde génération » (Stainless and Pittsburgh, 2011).

Les premières méthodes de coloration de l'acier inoxydable sont introduites dans les années 1970, et les éléments ainsi traités se révèlent très durables (Nickel, 2012).

En 1971, le soudage de l'acier inoxydable par un alliage à l'étain plomb (50% à 60% d'étain) devient recommandé (Rodighiero, 1960; Invernizzi, 2000). En 1990, le revêtement en plomb/étain enrichi à 7 % de molybdène est commercialisé (Nickel, 2012). Ensuite, un

³³ La Franche-Comté est une région culturelle, historique et administrative française qui regroupe quatre départements : le Doubs, le Jura, la Haute-Saône et le Territoire de Belfort.

revêtement tout étain est appliqué selon la norme A.36.332 en Août 1994 (Nickel, 2012 ; Invernizzi, 2000). En 1995, les aciers ferrite UGINOX FTE (avec Titane) et austénitique UGINOX AME (avec molybdène) apparaissent.

-L'acier galvanisé

La tôle galvanisée laminée est employée en toiture à partir de 1840. Mais elle se développe au début du 20^{ème} siècle avec la grande production des aciers laminés. En 1853 à Paris, un nouveau système de couverture en tôle ondulée ou nervurée est mis en œuvre. Cette forme permet de garantir simultanément la rigidité et la légèreté de l'acier galvanisé. Dès lors, la tôle ondulée devient le produit le plus employé dans la construction de nos jours et dans le monde entier. Ceci s'explique par ses caractéristiques de légèreté, facilité d'élaboration et de transport, et même par son prix pas cher permettant son usage même dans les bidonvilles (Lamesch, 2004).

Vers la fin du 19^{ème} siècle, la méthode de galvanisation de la tôle par précipitation électrolytique du zinc sur le fer apparaît. Ce procédé permet d'affiner la couche de zinc qui joue un rôle de barrière efficace en excluant l'oxygène et les moisissures³⁴. Les processus de galvanisation évoluent au fil du temps. Ainsi, la galvanisation à chaud et à froid se développe entre les deux guerres mondiales (1920-1939). La galvanisation à chaud est un procédé de recouvrement par immersion dans un bain de zinc fondu ou par électrolyse³⁵. Tandis que la galvanisation à froid (la galvanoplastie) est le dépôt d'un enduit de zinc³⁶. Ces deux méthodes de galvanisation conduisent en 1934 à une production massive de l'acier galvanisé (Lamesch, 2004). A partir des années 1950, un nouveau revêtement métallique innovateur est utilisé. Il s'agit d'un revêtement à base de zinc avec des ajouts de magnésium (Mg) et d'aluminium (Al). Ce nouveau matériau présente une excellente protection anticorrosion, et contribue à la préservation de l'environnement grâce à une épaisseur de couche de zinc réduite (ECCA, 2012). L'aluzinc et le galvan sont produits depuis 1981 par une filiale d'Arcelor.

-Acier laqué

La technique de laquage de l'acier apparaît pendant la deuxième guerre mondiale. En effet, sous l'effet des destructions causées par la première guerre, en 1940 les britanniques s'attachent alors à reconstruire au plus vite les édifices touchés en les recouvrant de tôle

³⁴ <http://www.ssab.com/fr/Brands/Prelaq/Produits1/What-is-Prelaq/Brief-history-of-sheet-steel/>

³⁵ L'électrolyse est effectuée en faisant passer un courant électrique entre deux électrodes dans la solution de sulfate de zinc obtenue à l'issue d'un traitement thermo-chimique.

³⁶ La galvanoplastie est le dépôt d'un enduit métallique sur un objet par l'application d'une charge négative sur celui-ci et en l'immergeant dans une solution contenant un sel du métal à déposer (ici du zinc).

d'acier. Mais, vu qu'il s'agit d'un état de guerre donc par mesure de précaution, ils ont pris l'initiative d'enduire le métal d'un produit bitumeux mat pour éviter qu'il désigne la cible à l'ennemi en réfléchissant la lumière. L'avantage de cette expérience est préservé même après la guerre, car l'on s'est aperçu que le revêtement a protégé efficacement l'acier des effets de la corrosion. Ce qui entraîne par la suite le perfectionnement des systèmes de peinture et l'évolution rapide de l'usage de couverture métallique prélaqué qui s'étend des édifices militaires aux constructions industrielles puis aux bâtiments résidentiels. A partir de 1975, la production de l'acier laqué se lance en France.

2.1.10. L'aluminium

L'alumine est découverte en 1821. En 1825, une première préparation du métal est élaborée en traitant du chlorure d'aluminium avec un mélange de mercure et de potassium, mais cette démarche fondée sur des réactions chimiques complexes est très coûteuse, d'où la rareté du métal (Lebouteux, 2000). En 1831, une réserve d'aluminium est découverte aux beaux-de-Provence induisant l'installation de la première usine en 1859. Ainsi, en 1860, l'aluminium est produit à Paris à partir d'un procédé de réduction du chlorure d'aluminium par le sodium (Lebouteux, 2000). Avec la révolution industrielle, le procédé d'électrolyse de l'alumine est mis au point en 1886 et breveté au nom de Paul Louis Toussaint Héroult (Grinberg, 2009). La création de la Société Electrométallurgique Française en 1887 à Froges (Isère) permet l'industrialisation de l'aluminium (CCSTI, 2006). Aujourd'hui, ce processus d'électrolyse est toujours la seule méthode de production de l'aluminium (Lebouteux, 2000).

L'usage de l'aluminium se développe vraiment à partir de 1900 et particulièrement entre les deux guerres. Il est employé d'abord à l'état pur, pour sa légèreté et son inaltérabilité (Lebouteux, 2000). Pour assurer une résistance mécanique plus grande, différents alliages sont mis au point. Le premier alliage d'aluminium contenant du cuivre et du magnésium est produit en 1908 (ECCA, 2012). Le second alliage d'aluminium avec 13 % de silicium affiné au sodium est élaboré en 1920.

En 1930 débute la production de l'aluminium laminé. Cette production s'accélère pendant la seconde guerre mondiale (ECCA, 2012). A partir de 1940, l'aluminium prélaqué a fait son apparition et a connu vite un grand développement.

2.1.11. Les bardeaux bitumineux

Au cours des années 1920, les bardeaux d'asphalte sous forme de losange apparaissent comme un nouveau matériau (Hauglustaine et Simon, 2003). Ce produit initialement destiné

aux étanchéités des toitures-terrasses trouve sa place en tant que couverture des toitures inclinées. En effet, il s'avère plus économique que les matériaux traditionnels et métalliques. Son utilisation augmente après la guerre et pendant les trente glorieuses (entretien avec M. Boisseau, Syndicat des entreprises de couverture). L'innovation de l'utilisation des bardeaux d'asphalte ne cesse de croître. Entre 1960 et 1970, une armature en feutre cellulosique supplante l'armature en feutre de chiffon. Cette période se caractérise en outre par l'apparition d'un très grand choix de coloris. L'ajout de bandes autocollantes à la surface des bardeaux pendant la fabrication permet de faciliter la mise en œuvre du procédé (CASMA, 2010). Grâce à sa facilité de mise en œuvre, la technologie de production de l'asphalte ne cesse de se développer avec l'amélioration des matières premières. Le feutre organique qui constitue l'armature du bardeau d'asphalte, est actuellement remplacé par une feuille de base en fibre de verre, afin d'éviter les algues et d'augmenter la résistance à la chaleur (CASMA, 2010).

2.1.12. Les plastiques

Le plastique est un matériau récent, essentiellement à base de résines synthétiques, qui n'apparaît en France que depuis la dernière guerre mondiale (Emery et Sentier, 1970).

En 1933, la première production commerciale du PMMA (polyméthacrylate de méthyle) est mise en place : il est utilisé dans plusieurs applications (ex : prothèse dentaire, fibres optiques). A partir des années 1950 l'application du PMMA pour les couvertures apparaît sous forme de lucarnes, dômes de toitures, coupoles...L'année 2011 marque le lancement d'un nouveau produit composé de feuilles acryliques qui peuvent remplacer le verre en ayant l'avantage d'être deux fois plus léger que le verre. Cette performance lui a valu d'être utilisé dans le toit panoramique.

Le PVC est apparu au milieu du 20^{ème} siècle. Il s'agit d'un produit plus léger que les matériaux métalliques. Il est plus facile à mettre en œuvre. Dans l'objectif d'éviter tout effet potentiellement nocif, toute composition chimique du PVC est enregistrée au titre du règlement REACH³⁷ (Registration, Evaluation Authorisation restriction of Chemicals) auprès de l'Agence européenne des produits chimiques. En effet, depuis le 31 décembre 1992, le cadmium est interdit d'usage en tant que « colorant dans certains polymères et peintures et

³⁷ REACH est un règlement européen (règlement n°1907/2006) entré en vigueur en 2007 pour sécuriser la fabrication et l'utilisation des substances chimiques dans l'industrie européenne. Il s'agit de recenser, d'évaluer et de contrôler les substances chimiques fabriquées, importées, mises sur le marché européen. D'ici 2018, plus de 30 000 substances chimiques seront connues et leurs risques potentiels établis ; l'Europe disposera ainsi des moyens juridiques et techniques pour garantir à tous un haut niveau de protection contre les risques liés aux substances chimiques.

comme stabilisant du PVC dans certaines applications ». Pourtant cette interdiction n'a pu être généralisée puisque sa présence était autorisée dans certains PVC rigides, faute de produits de substitution sur le marché³⁸.

A partir de l'année 2001 le cadmium est totalement abandonné. Mais il est important de noter que la plupart des états membres de l'UE qui ont interdit son utilisation dans la fabrication, permettent encore le recyclage de déchets de PVC contenant du cadmium... En France, l'industrie du PVC s'est aussi engagée à rechercher et à développer des stabilisants alternatifs au plomb. Citons à ce propos l'exemple du calcium/zinc qui a été mis en place en fin 2002 pour remplacer le plomb. Depuis plusieurs années, la question du PVC sans plomb fait l'objet de réglementation. Elle s'illustre notamment par la directive européenne qui fixe la date de 2010 pour une réduction de 50 % des stabilisants en plomb et celle de 2015 pour un PVC produit 100% sans plomb³⁹.

2.2. Les matériaux des toitures-terrasses

L'apparition du béton armé marque la construction des bâtiments en facilitant les opérations de coffrage et de coulage. Au début du 20^{ème} siècle la toiture-terrasse révolutionne le domaine de la couverture en se distinguant par son faible coût par rapport une toiture inclinée. En effet, cette dernière fait appel à une technicité très spécifique de mise en œuvre : utilisation de la charpente, nécessité d'éléments de raccord (chéneaux, arêtiers, noues...) etc. (Magne, 1929 ; Hauglustaine et Simon, 2003).

Le début du 20^{ème} siècle connaît une remarquable évolution en matière de revêtement d'étanchéité. Avant cette date, les supports de toiture sont composés de béton ou de planchers en bois. Et grâce aux nouveaux matériaux d'étanchéité, élaborés à partir des sous-produits de la distillation du pétrole, le plancher supérieur devient le support de la couverture. (Hauglustaine et Simon, 2003).

³⁸Le règlement Européen n°494/2011 de la commission du 20 mai 2011 modifie le règlement (CE) n°1907/2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques (REACH) en ajoutant des restrictions (annexe XVII) sur les utilisations du cadmium (JOUE L134/2 du 21 mai 2011). Un rectificatif corrigeant les dates d'applications de ces interdictions a été publié (JOUE L136/105 du 24 mai 2011).

³⁹Selon la directive (67/548/CEE) concernant la classification des substances dangereuses ; « la plupart des composés à base de plomb, dont ceux utilisés dans le PVC, sont classés comme toxiques pour la reproduction, nocifs, dangereux pour l'environnement et présentant un danger cumulé. Les stabilisants à base de plomb et de cadmium ajoutés au PVC restent (probablement) intégrés au PVC durant sa phase d'utilisation, mais une contamination potentielle est possible durant les phases de production et d'élimination

2.2.1. L'étanchéité en asphalte

L'asphalte existe depuis l'Antiquité. En 1820, il est utilisé pour couvrir les trottoirs de Paris. Son utilisation augmente avec le développement du secteur de l'automobile et elle s'étend pour revêtir les toitures-terrasses (Magne, 1929).

Dans les années 1950, l'asphalte connaît un grand succès en devenant le produit favori. Depuis cette époque, l'évolution des étanchéités ne cesse de se déployer afin de produire des matériaux d'étanchéités plus performants et plus durables. Aussi la pose de feutres bitumés remplace l'asphalte vers le milieu du siècle dernier. Par la suite, le travail de bitume à chaud est éliminé et remplacé par des soudures ou de collage, dans le but de réduire le temps de chantier (Magne, 1929).

La réfection de l'étanchéité de la toiture-terrasse apparaît en novembre 2002, elle est soumise à la norme NF P 84-208-1 (DTU 43.5) (CERTU, 2003).

Le 1^{er} décembre 2010, un important changement a lieu dans la production de l'asphalte coulé : le rythme des travaux s'est vu accéléré avec la mise en place de la réglementation REACH qui vise à diminuer la température de fabrication à des températures maximales de 200°C. Cette décision a permis d'offrir un meilleur confort pour les applicateurs et une forte réduction des consommations énergétiques.

Il faut noter que les membranes polymères à base de PVC et les revêtements à base de bitume ou d'asphalte sont totalement incompatibles car les huiles de l'asphalte et le bitume agressent chimiquement le PVC (CERTU, 2003).

2.2.2. L'étanchéité bitumineuse

En France, le bitume est apprécié dès la fin du 18^{ème} siècle pour ses caractéristiques d'étanchéité des fortifications (CERTU, 2003). Au départ, le bitume est coulé sur la toiture, puis l'évolution industrielle permet de prendre en charge la préfabrication de membranes bitumineuses (Hauglustaine et Simon, 2003). En 1840, le goudron de houille⁴⁰ a été employé pour saturer des couches de feutre et produire par la suite des rouleaux de feuilles feutrées. A cette époque, l'étanchéité en feutres des toitures-terrasses est assurée par du *sable* ou du *gravier* (CASMA, 2010). Cette couche permet de protéger l'étanchéité contre l'action des rayons ultraviolets et des variations brusques de température. En revanche, elle présente l'inconvénient de nécessiter un entretien périodique pour se débarrasser des débris de

⁴⁰ La houille est une roche carbonée sédimentaire correspondant à une qualité spécifique de charbon.

végétation (Hauglustaine et Simon, 2003). Avec l'apparition de supports légers, tels les panneaux de fibres végétales, les tôles profilées et les hourdis en béton cellulaire, cette couche protectrice lourde est abandonnée. Mais elle entraîne l'exposition des feutres bitumés aux rigueurs climatiques et les rend plus vulnérables. Pour remédier au problème de la sensibilité des membranes à l'eau, les armatures en feutre sont progressivement remplacées par des voiles de verre. Cette substitution confère aux membranes une résistance supérieure au vieillissement, les rendant également plus souples mais moins résistantes à la traction et aux déchirures (Hauglustaine et Simon, 2003). En 1903, une nouvelle technique de pose des feuilles feutrées est mise en place : elle est basée sur le découpage manuel sous formes de bardeaux individuels. Cette période est marquée aussi par l'emploi d'un nouveau matériau de surfacage : les granules ardoisés concassés. Le processus de fabrication est amélioré en 1915 par l'introduction du découpage à l'emporte-pièce des rouleaux en continu. L'enduit d'asphalte comporte deux couches ; une sous-couche étanche plus riche en bitume (mastic d'asphalte) et une couche supérieure en asphalte fondu (Henn, 1966).

Jusqu'aux années 1980 les étanchéités sont en *bitume oxydé*. A partir de cette décennie, le bitume oxydé est remplacé par le *bitume modifié* qui présente une meilleure qualité élastique dans le temps (CERTU, 2003). En France, le bitume modifié le plus utilisé est un bitume amélioré par l'adjonction d'un polymère SBS ou APP (plus fragile par temps froid que le SBS) (Bernstein 1997). En 1985, le dioxyde de titane est rajouté dans la composition des membranes bitumineuses afin de minimiser leur entretien. Néanmoins, cette substance est classée depuis l'an 2006 par la commission européenne comme potentiellement cancérigène pour l'homme (Honneret et Mater, 2012).

2.2.3. Les toitures-terrasses végétalisées

La toiture végétalisée est apparue au 20^{ème} siècle. L'invention du béton armé est sans doute un facteur déclencheur, cette couverture est en voie de devenir la solution qui préserve le rapport entre la ville et la nature (Techniques de l'ingénieur, 2014). A partir des années 1970, cette technique est améliorée avec l'arrivée des membranes d'étanchéité légères et résistantes à la pénétration racinaire ainsi qu'à la présence d'un mélange terreux allégé.

Au milieu des années 1980, l'Allemagne innove une alternative dite « végétalisation extensive » de faible épaisseur, légère et économique à poser. Cette innovation est à l'origine d'un important développement dans ce pays au milieu des années 1990. Elle représentait déjà près de 15 % des toitures-terrasses nouvellement créées (Techniques de l'ingénieur, 2014).

En France la toiture végétalisée n'a pas connu autant succès qu'en Allemagne. La raison est liée au fait que le premier lancement de ce type de couverture a présenté des défauts entraînant ainsi le freinage de la diffusion. En termes plus précis, le bitume était trop rigide ce qui a provoqué une fissuration de l'étanchéité d'une part, et l'absence de la couche de drainage d'autre part. Tout ceci a conduit au bouchage des descentes pluviales. Actuellement ces problèmes sont résolus par l'utilisation d'un bitume élastomère plus souple et l'ajout d'additifs chimiques antiracinaires et par la mise en place de la couche de drainage ([Techniques de l'ingénieur, 2014](#)). Malgré cela, et jusqu'en 2006 en comparant avec l'Allemagne, ce type de toiture est resté peu développé en France.

Aujourd'hui, certaines municipalités françaises envisagent de rendre obligatoire l'emploi de toitures végétalisées. Des PLU (Plans Locaux d'Urbanisme) pourraient comptabiliser les toitures végétalisées à l'égal d'un espace vert. De plus, le règlement énergétique RT 2012 renforce le choix de la végétalisation, à condition d'une meilleure quantification climatique et thermique ([Techniques de l'ingénieur, 2014](#)).

2.3. Les matériaux des autres éléments de la toiture

Dans le [Chapitre 1.1](#), nous avons montré que les matériaux utilisés en rampant ne sont pas nécessairement employés pour les autres éléments de toitures (ex : gouttière, noue, descente...). Ainsi, l'objectif de ce paragraphe est de décrire l'emploi au cours du temps des matériaux dans les différents éléments de toiture. Nous optons pour une présentation par matériau puisqu'un seul matériau peut être utilisé pour plusieurs éléments de toiture.

Notons que, particulièrement, les descentes sont apparues en France au début du 19^{ème} siècle. En effet, le 24 décembre 1823 à Paris représente un événement à effet décisif sur l'évolution de l'architecture en France. Vu les grands dangers menaçant d'épidémie à cause de l'insalubrité des rues, une ordonnance a été publiée pour supprimer les gouttières saillantes (gargouilles, canons) ([cf. Figure 59](#)) et rendre ainsi les tuyaux de descente obligatoires. Ces gouttières ne peuvent alors n'être qu'en cuivre, zinc, ou tôle étamé et les tuyaux de descente qu'en plomb, fonte, cuivre, zinc ou tôle étamée.

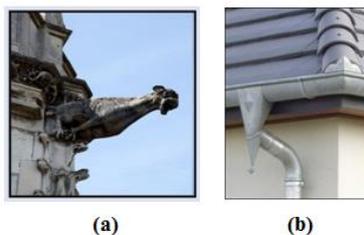


Figure 59 : (a) Gouttière saillante en forme de Gargouille ; (b) Tuyaux de descente

2.3.1. Le Plomb

Le plomb est le premier matériau métallique employé dans les différents éléments de toiture. En France la renaissance représentait l'âge d'or du plomb entre décors et sculptures sur les toitures. Jusqu'au 18^{ème} siècle, il accompagne ainsi la couverture d'ardoise des édifices importants en faitage, arêtières, lucarnes, chéneaux, terrassons, membrons, arêtières, noues, etc. (Lebouteux, 2007).

2.3.2. Le cuivre

Ce métal est aussi utilisé pour les accessoires : tuyaux de descente, gouttières, chéneaux, noues, bandes de rive, solin, couverture de mansardes, avant-toit, entablement, marquises, loggia, etc. Le 19^{ème} siècle voit apparaître l'usage du cuivre comme matériau des éléments de décorations pour la toiture comme des statues en tôle de cuivre pour les bâtiments civils et religieux. En 1889, l'usage du cuivre évolue dans les ornements et les accessoires (Rodighiero, 1960). A partir de 1940, le cuivre à 0,5% d'arsenic est imposé pour la plomberie (gouttière et descente) (Belhoste, 2001).

2.3.3. Le zinc

A partir du 19^{ème} siècle, le zinc est le matériau principal des éléments d'étanchéité (faitage, noue, arêtières, rive...) et des accessoires (noquets...) de toitures (Moralès, 2005). Il est notamment utilisé pour les gouttières des toits de Paris depuis le baron Haussmann. Le décret du 25 juillet 1862 du préfet de police de Paris rend le zinc obligatoire pour réaliser les gouttières (Smits, 1927).

Entre 1889 et 1899, un procédé du plombage⁴¹ a été mis en place pour donner aux ornements en zinc l'aspect du plomb (Baltus, 2000). Parmi les grandes applications du plombage sont les ornements du dôme du Petit Palais à Paris (Smits, 1927).

Le zinc prépatiné, apparu en 1978, est associé avec les toitures en ardoise et en lauze, il est utilisé notamment pour les accessoires d'évacuations d'eaux de pluie (gouttière, noue, descente) (site VMZINC).

2.3.4. L'acier

Au 19^{ème} et au début du 20^{ème} siècle, le fer-blanc terne est utilisé dans les éléments de toiture tels que la gouttière, la descente, les arêtiers, les faitières, les clochers, les épis de faitage (poinçon), etc. (Mignery, 2000). Le fer-blanc disparaît au cours du 19^{ème} siècle.

L'acier inoxydable est exécuté dans les mansardes, solins et dans les gouttières et chéneaux (Rodighiero, 1960).

L'acier prélaqué, découvert au milieu du 20^{ème} siècle peut être utilisé dans les accessoires de la toiture : pièces de finition, étanchéité, gouttières, faitières, cavaliers, crochets, etc. (ECCA, 2012).

2.3.5. Le PVC

D'après M. Fabien Perez (société Nicoll), les gouttières en PVC apparissent vers les années 1980. Il s'agit d'un produit plus léger que les matériaux métalliques. Il est plus facile de mettre en œuvre car l'assemblage se fait par collage et ne nécessite pas l'intervention de plusieurs personnes comme pour les matériaux métalliques. Le PVC est d'abord employé en plomberie dans les canalisations d'évacuation de l'eau à l'intérieur du bâtiment. Vu ses avantages (souplesse et prix faible), le PVC a été proposé, en 1980, sur le marché des évacuations des eaux de pluie (gouttière et descente) des toitures. Ainsi, un savoir-faire a été développé pour adapter une gouttière en PVC. En effet, à part les contraintes techniques, il y a aussi la contrainte esthétique. La gouttière est un élément apparent dans une toiture. Nous trouvons des gouttières pendantes fixées sur des crochets qui ne prennent pas leurs appuis sur le toit mais sur le portant. Il y a aussi une diversité au sein même des gouttières pendantes. Ceci a influencé l'apparition du PVC en gouttière. Il a fallu du temps pour pouvoir s'adapter au marché de gouttières dominé par le zinc.

⁴¹ Le plombage est un procédé permettant de donner aux ornements en zinc l'aspect du plomb. Cette application consistait à les couvrir d'une ou plusieurs couches de graphite mélangé à de l'acide acétique (600g de poudre/1L de vinaigre). Ce qui représente un enduit inaltérable (Smits, 1927).

2.3.6. L'aluminium

Les gouttières en aluminium existent depuis l'apparition de l'aluminium, mais leur utilisation est très limitée. En effet, d'après M. Boisseau la soudure d'une gouttière en aluminium est très complexe du fait que l'aluminium présente un très grand coefficient de dilatation.

Les gouttières en aluminium ont connu une innovation vers les années 2000 permettant leurs utilisations massives en toiture. Il s'agit d'un système de fabrication en continu. L'originalité de ce concept réside dans le principe technique de fabrication de la gouttière en aluminium laqué. Fabriquée en continu directement sur le chantier, la gouttière en aluminium laqué est coupée à la longueur de la construction, sans raccord ni soudure (entretiens avec les experts de la couverture).

2.3.7. La terre cuite

Les éléments singuliers de la toiture en tuiles en terre cuite peuvent également être en terre cuite. Il s'agit d'un matériau très ancien. Il existe aussi le type de noquets en terre cuite. Ce sont des accessoires qui forment un angle et dont la partie haute est plus large que celle du bas. Ils sont employés à la place des demi-tuiles de rives, en mettant en place un noquet tous les deux rangs (Lyonnet, 2004a).

2.4. Tableau chronologique de l'évolution des matériaux de toiture

Cet aperçu sur l'évolution des matériaux de toiture est résumé dans le [Tableau 8](#). Y sont consignées les dates qui ont marqué le changement d'un matériau de toiture : apparition, disparition, changement de composition ou d'usage, etc. Nous remarquons que la révolution industrielle est l'événement marquant l'histoire des matériaux de toiture en termes d'innovation et de progrès techniques. C'est à partir de cette époque que le patrimoine bâti présente une diversité importante des matériaux de toiture existants jusqu'à aujourd'hui. Certes, certains matériaux ont disparu du marché comme le fer-blanc et l'amiante mais au niveau des constructions existantes il est fort probable de trouver ces produits encore installés. L'apparition du béton armé a également marqué le domaine du bâtiment en faisant apparaître la toiture-terrasse au début du 20^{ème} siècle.

Actuellement, aucun travail sur l'histoire des matériaux de couverture à partir du 1900 et jusqu'à aujourd'hui n'a été effectué (entretien avec Mme Annick Texier, Laboratoire de

Recherche des Monuments Historiques)⁴². Cette période se caractérise par beaucoup d'innovation de matériaux : certains connus comme le zinc, imposé à Paris et étendu dans les villes de la banlieue de Paris

Pour conclure, notre travail est considéré comme une première image de l'histoire des matériaux de toiture qu'il conviendrait d'approfondir dans le cadre d'autres travaux spécifiquement dédié à cette question.

⁴² Mme Annick Texier est responsable du pôle métal dans le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques. Elle est spécialisée dans l'étude des couvertures métalliques (plomb, cuivre, zinc...) très anciennes datant du moyen âge et du 19^{ème} siècle. Selon elle, l'information sur les matériaux pour la période depuis 1900 n'est pas facile à obtenir car les études de marché sur les matériaux de construction ne sont apparues que récemment vers les années 1990. Ainsi, on connaît mieux ce qui s'est passé entre le Moyen âge et le 19^{ème} siècle que entre le 19^{ème} siècle et aujourd'hui au niveau des documentations. En fait, le patrimoine après le 19^{ème} siècle est considéré comme inintéressant. En effet, durant ce siècle, plusieurs matériaux ont été utilisés, des matériaux traditionnels (la tuile, ardoise, chaume, métal...), des matériaux nouveaux (bardeaux, fibres ciment...), nouveaux mode de mise en œuvre, etc. Ainsi, une synthèse complète de l'histoire nécessite une thèse. Quelques pistes d'approfondissement ont été proposées en se basant sur les méthodes employées au LRMH :

- Dépouillement des bases de données (des journaux ou des presses spécialisées) fournies dans les expositions universelles comme BATIMAT
- Dépouillement des magazines spécialisés depuis leurs apparitions comme « travaux publics » et qui sont disponibles dans les centres de documentation, bibliothèque CNAM...Et il faut éplucher toutes les revues à raison d'une revue par mois pour plusieurs années.
- Les tableaux de peintres qui peignent des villes : l'analyse des tableaux de peintres qui peignent des villes pour estimer les matériaux de toitures employés. L'information à partir des tableaux sera recoupée avec d'autres pour tracer la vraie image des toitures.

Tableau 8 : Tableau chronologique de l'évolution des matériaux de toiture

| | 1800-1850 | 1850-1900 | 1900-1920 | 1920-1940 | 1940-1960 | 1960-1980 | 1980-2000 | 2000-... | |
|-----------------------------|---|---|--|-----------|---|---|---|--|--|
| Chaume | 1800-1900 : Utilisation de la couverture en chaume | | 1900 : Limitation de la couverture en chaume en compagnes | | | | | | |
| Bois | 1800-1850 : Utilisation de la couverture en bois | 1850 : Les couvertures en tuile en terre cuite et en ardoise remplacent celles en bois | 1900 : Limitation de l'utilisation d'une couverture en bois en ville à cause de son cout très élevé | | | | 1993 : Interdiction totale de l'utilisation de la creuse (carbonates de plomb) dans la peinture du bois | | |
| Ardoise naturelle | 1800-1850 : Utilisation de l'ardoise dans les constructions prestigieuses | 1850 : Développement de l'utilisation de l'ardoise grâce à la révolution des moyens de transport | L'ardoise est toujours employée en couverture. | | | | | | |
| Amiante ciment | | 1860-1945 : La grande phase industrielle de l'amiante ciment | | | 1950 : Apparition des ardoises en fibres ciments sur le marché de couverture | 1973 -1975 : Utilisation d'environ 150000 de tonnes d'amiante par ans en France 1978 : Limitation de l'usage de l'amiante en France à cause de ses effets cancérogènes | 1997 : Interdiction de l'emploi de l'amiante et obligation du remplacement de l'amiante avec des fibres organiques ou minérales. | | |
| Tuile en terre cuite | 1800-1900 : L'industrialisation de la tuile en terre cuite. -Le développement de l'ardoise a mis fin à la tuile bourgeoise (tuile canal) 1841 : Fabrication de la tuile à emboitement (tuile mécanique) ce qui a permis de couvrir la France rapidement avec ces tuileries industrielles 1850 : Le début d'emploi des nouvelles techniques d'émaillage et d'engobage) | | La tuile en terre cuite est toujours employée en couverture | | | | | | |
| Tuile béton | | | 1919 : Apparition de la tuile béton en Angleterre | | | 1960 : La tuile béton devient la nouvelle référence en matière de couverture moderne | La tuile béton est toujours employée en couverture | | |
| Plomb | 1800 : Utilisation du plomb coulé sur sable pour la restauration 1823 : Suppression des gouttières saillantes et rendre ainsi les tuyaux de descente obligatoires le plomb est parmi les matériaux employés pour les tuyaux de descente. | 1869 : La couverture du dôme des invalides est en plomb laminé 1850 : Limitation de l'utilisation du plomb laminé pour les monuments historiques 1890 : Disparition du plomb coulé sur sable en France | Limitation de l'utilisation du plomb laminé pour les petits éléments de toitures (ex : étanchéité) | | | | | 1982 : Normalisation du plomb (A 55-401) exigeant une pureté de 99,9% | Limitation de l'utilisation du plomb laminé pour les petits éléments de toitures (ex : étanchéité) |

| | 1800-1850 | 1850-1900 | 1900-1920 | 1920-1940 | 1940-1960 | 1960-1980 | 1980-2000 | 2000-... |
|------------------|--|---|---|--|--|--|---|---|
| Cuivre | 1800-1850 : Apparition du cuivre laminé en France. | 1881 : Production du cuivre <i>pur</i> 1889 : Evolution de l'usage du cuivre dans les ornements et les accessoires | | 1920 : - Apparition du cuivre riche en arsenic - Le cuivre à 0,5% d'arsenic est imposé pour la plomberie (gouttière et descente) | 1940 : lancement d'un cuivre à 0,5% d'arsenic pour la toiture | | 1987 : Développement de la production du cuivre pour la toiture 1996 : Normalisation du cuivre naturel NF EN 1172. | 2006 : une diminution de la consommation du cuivre à cause de l'augmentation très élevée du cout des métaux 2007 : Normalisation du cuivre allié NF EN 504 / 506 ; Limitation de la quantité d'impuretés dans le cuivre (cuivre, cadmium, bismuth, argent, étain et zinc). |
| Zinc | 1800 : - Apparition des toitures en zinc naturel - A partir du 19 ^{ème} siècle, le zinc est le matériau principal des éléments d'étanchéité (faitage, noue, arêtières, rive...) et des accessoires (noquets...) de toitures 1810 : Apparition du zinc laminé 1810-1850 : Apparition des toitures le zinc en France sur des bâtiments industriels ou artisanales 1820 – 1830 : Forte croissance de l'utilisation du zinc grâce à la grande quantité du zinc importée en France 1837 : Création de la société Vieille-Montagne des mines et fonderie de zinc et début du développement du zinc laminé en France | 1853 : Création de la société Compagnie royale asturienne des Mines 1840-1870 : Reconstruction de Paris sous la conduite du Baron Haussmann avec utilisation massive des toitures en zinc (3/5 des nouvelles couvertures) 1862 : Le décret du 25 juillet du préfet de police de Paris impose le zinc pour réaliser les gouttières. 1889-1899 : Mise en place procédé du plombage du zinc | 1902 : Le règlement d'urbanisme de la ville de Paris de 1884 modifié en 1902 détermine des gabarits-type pour la construction des immeubles et le développement des charpentes | 1930 : Brevet du premier alliage du zinc au cadmium | | 1978 : - Apparition du zinc prépatiné - Utilisation du zinc prépatiné pour les éléments (gouttière, noue...) des toitures en ardoise et en lauze 1983 : - Interdiction du cadmium - Apparition de la première norme NF A55-201 (1983-06-01) de composition du zinc (Zn-Cu-Ti) 1987 : Fusion des sociétés Vieille-Montagne des mines et fonderie de zinc et Compagnie royale asturienne des Mines en conservant le nom la Vieille-Montagne | 1990 : Lancement du zinc bilaqué par VMZINC. | 2003 : Nouvelle norme NF EN 1179 (septembre 2003) imposant un alliage zinc-titane de degré de pureté élevé de 99,995% du zinc 2005 : Première production du zinc coloré en masse |
| Fer blanc | 1800-1900 : - Utilisation du fer blanc brillant sur le rampant - Utilisation du fer blanc terne pour les gouttières, les descentes, les arêtières, les faitières, etc. 1800 : Addition d'une peinture à l'huile pour résister à l'oxydation. | | | | 1954 : Disparition du fer blanc et son remplacement par l'acier galvanisé | | | |

| | 1800-1850 | 1850-1900 | 1900-1920 | 1920-1940 | 1940-1960 | 1960-1980 | 1980-2000 | 2000-... |
|-------------------------|--|---|--|---|---|---|--|--|
| Acier galvanisé | 1840 : Le début d'utilisation de l'acier galvanisé en toiture. | 1853 : Un nouveau système de couverture en tôle ondulée ou nervurées est mis en œuvre à Paris, la couverture en tôle ondulée | 1900 : Apparition de la méthode de galvanisation de la tôle par précipitation électrolytique du zinc sur le fer 1920 : nouveaux procédés continus, le laminage continu à chaud et à froid | 1934 : Production massive de l'acier | 1950 : Apparition du revêtement métallique zamak (Zn+Al+Mg) 1958 : Adaptation du concept de la galvanisation sur bobine. | | 1981 : Apparition de l'aluzinc (Zn+Al+Si) et du galvan : (Zn+Al) | |
| Acier inoxydable | | | 1913 : Début du développement industriel de l'acier inoxydable | 1936 : Apparition de l'acier inoxydable duplex de première génération (ajout de Ni) | 1950 : Apparition de l'acier inoxydable en couverture | 1968 : Apparition de l'acier inoxydable seconde génération (alliage de N) 1970 : Apparition de l'acier inoxydable laqué 1971 : Le soudage de l'acier ferritique par un alliage à l'étain plomb | 1990 : Enrichissement du revêtement en plomb/étain par le molybdène 1994 : Application du revêtement tout étain selon la norme A.36.332 1995 : L'apparition d'aciers ferrite UGINOX FTE (avec Titane) et austénitique UGINOX AME (avec molybdène) | 2000 : Apparition de l'Acier inoxydable hyperduplex |
| Acier laqué | | | | | 1940 : Apparition de l'acier prélaqué | 1975 : Lancement de la production de l'acier prélaqué en France | | |
| Aluminium | 1821 : Découverte de l'alumine 1825 : Première préparation du métal aluminium 1831 : Découverte d'une réserve d'aluminium aux beaux-de-Provence | 1860 : Première production de l'aluminium à Paris 1886 : Brevet du procédé d'électrolyse de l'alumine au nom de Paul Louis Toussaint Héroult 1887 : Industrialisation de l'aluminium suite à la création de la Société Electrométallurgique Française à Froges | 1900 : Développement de l'usage de l'aluminium à Paris 1908 : Premier alliage d'aluminium contenant du cuivre et du magnésium | 1920 : Second alliage d'aluminium avec 13 % de silicium affiné au sodium 1930 : Production des tôles laminées d'aluminium 1939-1945 : La Seconde Guerre mondiale accélère la croissance de l'aluminium 1940 : Apparition de l'aluminium prélaqué | | | | 2000 : Développement de l'utilisation de la gouttière en aluminium suite à une innovation dans la pose : il s'agit d'un système de fabrication en continu |

| | 1800-1850 | 1850-1900 | 1900-1920 | 1920-1940 | 1940-1960 | 1960-1980 | 1980-2000 | 2000-... |
|----------------------------|--|-----------|---|---|---|---|---|--|
| Bitume | <p>1800-1980 : Utilisation du revêtement multicouche en bitume oxydé</p> <p>1840 : L'étanchéité en feutres des toitures-terrasses est assurée par du sable ou du gravier</p> | | <p>1903 : Apparition d'une nouvelle technique de pose basée sur le découpage manuel sous formes de bardeaux individuels</p> <p>1915 : Introduction du découpage à l'emporte-pièce des rouleaux en continu</p> | <p>1920 : Apparition des bardeaux d'asphalte sous forme de losange</p> | <p>1950-1980 : Utilisation massive des bardeaux bitumineux comme couverture des toitures inclinées</p> | <p>1960- 1970 : -Utilisation de l'armature en feutre cellulosique</p> <p>- Apparition des bardeaux colorés</p> <p>1960 : Ajout des bandes autocollantes à la surface des bardeaux pendant la fabrication pour faciliter la mise en œuvre</p> | <p>1980 : Remplacement du bitume oxydé par le bitume modifié par les polymères (<i>SBS, APP</i>)</p> <p>1985 : Introduction du dioxyde de titane (Ti O2) dans le bitume</p> | <p>2006 : Classement du Ti O2 comme une substance cancérigène</p> |
| PVC | | | <p>1900 : Découverte du PVC</p> | | | | <p>1980 : Apparition des gouttières en PVC</p> <p>1992 : Interdiction du cadmium comme plastifiant dans le PVC</p> | <p>2002 : Remplacement des stabilisants en plomb par le calcium/zinc</p> <p>2010 : Réduction de 50 % des stabilisants en plomb fixée par directive européenne</p> <p>2015 : Réduction de 100 % des stabilisants en plomb fixée par directive européenne</p> |
| PMMA | | | | <p>1933 : Première production commerciale du PMMA</p> | <p>1950 : Application du PMMA pour les couvertures sous forme de lucarnes, dômes de toitures, coupoles</p> | | | <p>2011 : Intégration de feuilles acryliques et utilisation du PMMA est dans le toit panoramique</p> |
| Asphalte | <p>1820 : L'asphalte est utilisé pour couvrir les trottoirs de Paris</p> | | | | <p>1950 : Développement de l'utilisation de l'étanchéité en asphalte</p> | | | <p>2002 : Apparition de la norme NF P 84-208-1 (DTU 43.5) pour la réfection de l'étanchéité de la toiture-terrasse</p> <p>2010 : Réduction des consommations énergétiques liées à la production de l'asphalte suite à la réglementation REACH</p> |
| Toiture végétalisée | | | <p>1900 : Apparition de la toiture végétalisée</p> | | | <p>1970 : Amélioration de ces toitures en intégrant les membranes d'étanchéité et résistantes à la pénétration racinaire avec la présence d'un mélange terreux allégé.</p> <p>1980 : Apparition de la « végétalisation extensive » en Allemagne</p> | | <p>2006 : Accélération du développement des toitures végétalisées en France</p> <p>2012 : La RT 2012, renforce le choix de la végétalisation</p> |

3. Synthèse

L'étude historique des matériaux de toiture et de l'évolution de l'urbanisation de la ville montrent que la révolution industrielle constitue pour les deux l'événement marquant majeur. C'est à partir de cette époque que le patrimoine des toitures commence à se construire au fil du temps jusqu'à aujourd'hui.

Ce travail ambitieux sur l'histoire des matériaux de toiture nous aidera en le croisant avec l'histoire du paysage urbain dans le développement de la méthode d'évaluation des flux de contaminants issus des toitures à l'échelle urbaine. Il s'agit de créer une sorte de filtre historique pour mieux identifier les matériaux de toiture. Par exemple, pour une zone urbaine construite avant les années 1950, l'ardoise en fibre ciment et le zinc prépatiné n'existent pas en toiture. De plus, ce travail permet d'avoir une idée sur les compositions historiques des matériaux. En fait, si une toiture en ardoise en fibres ciment en a été construite avant 1996 elle aura une forte probabilité de contenir de l'amiante.

Néanmoins, d'après notre enquête au sein des experts des matériaux de toiture, il y a un décalage entre l'apparition d'un matériau et sa réelle mise en œuvre sur les toitures. Par exemple, le zinc est apparu en 1810 mais il est vraiment utilisé en toiture à la fin du 19^{ème} siècle. A cette époque, le zinc est utilisé sur les immeubles et il est cher pour être utilisé par les particuliers. Les toitures des pavillons du zinc sont très limitées.

Pour développer notre méthode nous serons amenés à exploiter ce tableau historique en le croisant avec les résultats de notre enquête qui a permis de mieux appréhender l'utilisation de matériaux de toiture à l'échelle urbaine à différents niveaux (historique, réglementaire...) (cf. [Chapitre 2.4](#)).

Chapitre 1.3. Caractérisation des émissions de contaminants par les matériaux de toiture anciens et nouveaux

D'après la Fondation de l'Eau Potable Sûre (Safe Drinking Water Foundation) un *contaminant* est défini comme « une substance qui se retrouve dans l'eau et qui peut avoir des risques sur la santé ». Dans notre travail, un contaminant est une substance émise par les matériaux dans l'eau de ruissellement de toiture. L'évaluation de la toxicité de ces contaminants n'est pas l'objectif de notre recherche.

La contribution des matériaux du bâtiment, en particulier les toitures, à la contamination des eaux pluviales n'a été prise en compte qu'assez récemment depuis les années 1990, et l'état des connaissances sur ce sujet reste à ce jour très parcellaire. Les premiers travaux se sont focalisés sur l'étude des émissions des toitures réelles (avec tous leurs accessoires) en analysant l'eau collectée en aval de la toiture (Quek et Förster, 1993 ; Gromaire *et al.*, 1999). Ensuite, les travaux se sont orientés vers l'étude de l'émission d'un matériau particulier. Dans ce cas, la plupart des travaux se sont focalisés sur les émissions de métaux (Bertling *et al.*, 2006; Odnevall Wallinder *et al.*, 1998). Quelques études se sont intéressées à l'émission des hydrocarbures et le lessivage des pesticides. Au cours des dernières années, en lien avec la directive biocide (DE, 98/8/CE), des travaux de recherche se sont focalisés sur le lessivage de molécules biocides issues des bois de construction, des revêtements de façades et des pratiques d'entretien des toitures (Kleijer, 2008 ; Burkhardt *et al.*, 2007; Jungnickel *et al.*, 2008 ; Van de Voorde *et al.*, 2012).

Pour mieux cerner la contamination des eaux de ruissellement par les matériaux de toiture, nous avons procédé en trois étapes. La première étape consiste à identifier *les contaminants potentiellement émis par les matériaux de toiture* à partir de l'étude des matériaux (composition, traitement subi...). La deuxième étape consiste à effectuer un état des lieux des molécules effectivement émises par les matériaux de toiture étudiés dans la littérature ou par les fabricants. Enfin, un état des lieux des flux d'émissions unitaires annuels des contaminants émis par les matériaux de toiture est dressé à la fin du chapitre.

1. Sources de contaminants en temps de pluie à l'échelle urbaine

L'eau de pluie qui circule dans une ville, arrive dans le milieu récepteur (sol, milieu aquatique) chargée de contaminants qui peuvent être des métaux toxiques ou des micropolluants organiques. Nous pouvons trouver aussi des microorganismes pathogènes qui ne feront pas l'objet de notre étude.

Les contaminants circulent dans l'environnement entre trois grands compartiments : l'atmosphère, le sol et l'eau. Ils passent de l'un à l'autre par différents processus : lessivage, diffusion, convection, dissolution, vaporisation, adsorption, désorption. Ces processus sont influencés par les caractéristiques chimiques du contaminant (Zgheib, 2009).

Dans une ville, les sources de ces contaminants sont diverses. Plusieurs études et programmes de recherche se sont focalisés sur la détermination des sources de contaminations des eaux pluviales ruisselées dans le milieu urbain. Nous pouvons définir deux catégories de sources : le lessivage de l'atmosphère et le lessivage des surfaces urbaines.

1.1. Lessivage de l'atmosphère

L'atmosphère renferme de nombreuses particules, résultant de processus naturels (érosion éolienne...), et anthropiques (rejets industriels, trafic automobile, incinérateurs d'ordure, chauffage domestique). Ces particules atmosphériques véhiculent de nombreux composés minéraux (ainsi que des composés organiques). Elles présentent des propriétés physico-chimiques différentes en fonction de leur origine : les particules anthropiques, principalement issues des phénomènes de combustion sont généralement inférieures à $2\mu\text{m}$ et ont une bonne solubilité tandis que les particules naturelles liées à l'érosion des sols sont supérieures à $2\mu\text{m}$ et sont davantage réfractaires (Garnaud *et al.*, 2001; Azimi, 2004). Ces différences sont également à l'origine de processus de dépôts spécifiques. En fait, ces particules atmosphériques peuvent se déposer sur les surfaces par temps sec ou être incorporés dans les gouttes de la pluie (Mottier et Boller, 1992). Il existe donc deux modes de dépôt : des dépôts secs et des dépôts humides (Azimi, 2004). Ces émissions de contaminants vers l'atmosphère puis leur déposition sur les surfaces imperméables s'effectuent par temps sec. Parmi les contaminants présents dans l'atmosphère, nous trouvons les éléments métalliques (Garnaud *et al.*, 1999), les pesticides (Scheyer *et al.*, 2007) et les hydrocarbures (Azimi, 2005).

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons à étudier uniquement les contaminants émis par les matériaux de toitures.

1.2. Lessivage des surfaces urbaines imperméables

L'eau entre en contact avec les surfaces urbaines, elle les lessive et entraîne une partie des contaminants accumulés par temps sec. Leur nature dépendra de l'occupation du sol et des activités liées au bassin versant considéré (résidentiel, commercial, industriel, urbain dense, pavillonnaire, circulation des automobiles...). Les surfaces urbaines les plus étudiées sont les chaussées et les toitures. Quelques travaux s'intéressent aux émissions par les façades des bâtiments : en effet, la peinture et les crépis sur les façades émettent des biocides ([Schoknecht et al., 2009](#); [Wittmer et al., 2011](#)).

La contamination des eaux de ruissellement des chaussées est due principalement au trafic automobile ([Lamprea, 2009](#)). Les émissions automobiles sont dues à l'abrasion des pneumatiques au contact de la chaussée, à l'abrasion des garnitures de freins, à la corrosion de la carrosserie et autres pièces métalliques, aux émissions de gaz d'échappement, à la combustion des carburants, aux fuites de fluides (entre autres : carburant, huile moteur, liquide de freinage) et à la dégradation des pots catalytiques (considérés comme la principale source d'émission de platine, palladium et rhodium) ([Lamprea, 2009](#)).

Les eaux de ruissellement des chaussées présentent de fortes concentrations en HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) ([Rocher, 2005](#)) et en pesticides. La présence des HAP est due principalement aux dépôts générés par le trafic routier provenant de la combustion des carburants ou de fuites d'huiles. Les pesticides proviennent de l'application des herbicides sur les routes.

L'apport en métaux lourds (Zn, Cu, Pb, Cd) dans le ruissellement des chaussées est important. Il provient de l'abrasion de freins des automobiles, des carburants, matériaux des véhicules, etc. ([Davis et al., 2001](#); [Xanthopoulos et al., 1993](#) ; [Lamprea, 2009](#)).

2. Contamination des eaux de ruissellement des toitures

La toiture est considérée comme une source de contamination des eaux de ruissellement ([Clark et al., 2008a](#)). Cette contamination est générée soit par les matériaux de construction du toit ([Eruola et al., 2010](#)), soit par des apports extérieurs. Le toit peut être considéré comme

un collecteur de contaminants issus de l'atmosphère ou provenant des interventions humaines d'épandage de produits de nettoyage, d'entretien ou de peinture pour toiture (ex : émission de plomb par la peinture (Davis et Burns, 1999)).

L'objectif de ce paragraphe est d'identifier les différentes sources de contamination des eaux de ruissellement de toiture. Trois sources sont identifiées : les retombées atmosphériques, les matériaux de toiture et les traitements de toiture durant leur vie en œuvre.

2.1. Contaminants issus des apports atmosphériques

Dans cette configuration, le contaminant est un dépôt involontaire sur le toit issu de l'atmosphère. Comme décrit dans le [Paragraphe 1.1](#), l'atmosphère renferme de nombreuses particules, parmi ces particules nous pouvons trouver des métaux lourds, les HAP (Hydrocarbures aromatiques polycycliques), les PCB (polychlorobiphényles), les dioxines, le furane⁴³ et ses dérivés et les pesticides. Ces contaminants ont été les plus couramment mesurés. De nombreuses études ont évalué les concentrations et les flux de micropolluants dans les retombées atmosphériques totales (Garnaud *et al.*, 2001; Wong *et al.*, 2003; Azimi *et al.*, 2005).

Ces contaminants qui se retrouvent sur une toiture peuvent s'incorporer dans le processus d'émission de contaminant. En effet, lors du lessivage de la toiture en temps de pluie, en plus des contaminants issus du matériau de toit, les molécules déposées sur le toit pendant la durée de temps sec précédent seront aussi lessivées. Ce constat a été confirmé par plusieurs études menées sur la caractérisation des émissions dans le ruissellement des toitures. Ainsi, des travaux effectués en Suisse montrent que les matériaux en plastique, les tuiles et les toitures-terrasses en gravier sont une source d'émission des contaminants métalliques en particulier le cuivre, le zinc, le plomb et le cadmium mais aussi des HAP et des halogènes organiques (Boller, 1997; Clark *et al.*, 2008a). Ces toitures ne contiennent pas dans leurs compositions des métaux lourds et les HAP. L'émission de ces contaminants est due forcément aux retombées atmosphériques par temps sec.

Les pesticides épandus sur les surfaces urbaines imperméables sont lessivés par temps de pluie. En particulier, les pesticides et les HAP (les molécules mesurées sont le fluoranthène, pyrène) ont été détectés dans le ruissellement des toitures de tuile en terre cuite, en ardoise en fibres amiante, en zinc et une toiture-terrasse en bitume (Tobiszewski *et al.*, 2010). La

⁴³ Furane : un composé chimique de formule brute C₄H₄O.

concentration des pesticides dans le ruissellement des ardoises en amiante est élevée en raison du phénomène de sorption⁴⁴. Les retombées atmosphériques sont à l'origine de ces contaminants. De plus, deux molécules de polychlorobiphényles (PCB 52 et PCB 180) ont été émises dans le ruissellement des tuiles en terre cuite ayant comme sources principales les dépositions atmosphériques.

Enfin, les toitures végétalisées relarguent des contaminants métalliques (Mendez *et al.*, 2011). L'émission de métaux est due principalement aux retombées atmosphériques qui sont retenues dans les toitures et aussi à l'âge de la toiture ainsi que la qualité du substrat (Alsupa *et al.*, 2011).

De nouveaux travaux se sont focalisés sur l'étude des retombées atmosphériques. Une thèse (Roupsard, 2013) a montré à partir du calcul des vitesses de dépôt sur différentes surfaces (verre, bitume, herbe, ardoise...) que ces dépôts dépendent énormément de la nature de la surface. Une autre thèse (Percot, 2012) a montré que les flux mensuels atmosphériques de dépôt sec des métaux sont extrêmement variables d'un mois à l'autre et dépendent fortement de la nature des surfaces de dépôt. Les mesures des émissions des métaux lourds ont été effectuées pour plusieurs matériaux. Les résultats obtenus dans cette thèse montrent que pour l'ensemble des métaux étudiés, l'herbe représente la surface pour laquelle les flux de métaux sont les plus importants. Pour le zinc, le flux peut atteindre jusqu'à $258 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mois}^{-1}$. Le bitume représente la deuxième surface urbaine pour laquelle le flux de dépôt sec est le plus important, avec parfois des flux supérieurs (au mois de janvier 2011) à ceux obtenus sur l'herbe. Les flux sont de 120, 44 et $33 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mois}^{-1}$ pour le zinc, le cuivre et le plomb, respectivement. Les toitures en zinc et en ardoise sont les surfaces qui représentent des puits atmosphériques moindres avec des flux allant au maximum de 41 à $58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mois}^{-1}$ pour le zinc, et au minimum de 2 à $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mois}^{-1}$ pour le plomb. Les flux sur les tuiles restent légèrement inférieurs à ceux observés sur les toitures en ardoise et en zinc ($16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mois}^{-1}$ pour le cuivre). Les surfaces verticales présentent des flux beaucoup moins importants avec par exemple pour l'enduit de façade $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mois}^{-1}$ pour le zinc en septembre 2010. De même sur le verre, surface lisse, le flux de zinc n'est que de $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mois}^{-1}$ en janvier 2011 (Percot, 2012). Ainsi, la nature du matériau en particulier la rugosité de sa surface joue un rôle très important dans l'accrochage des particules atmosphériques (Percot, 2012).

⁴⁴ Sorption : c'est un processus permettant la fixation des particules sur une autre substance ou surface comme la fixation des pesticides sur les matériaux de toitures.

2.2. Contaminants issus des matériaux de toiture

Dans le [Chapitre 1.1](#) nous avons effectué un état des lieux des matériaux de toiture. Ce travail a montré une diversité importante des matériaux de couverture classés en familles de matériaux. Chaque famille présente différentes variétés de matériaux, il suffit que le matériau principal subisse un ajout d'une molécule ou reçoive un traitement de surface durant sa fabrication pour que ses propriétés changent et donc une nouvelle variété est obtenue. Ces opérations sont effectuées dans le but de remplir une fonction particulière de la toiture. Dans ce paragraphe nous allons présenter les contaminants potentiellement émis par les matériaux. Il s'agit d'identifier la nature de l'apport du contaminant dans le matériau. Nous avons identifié deux modes d'apport : des contaminants qui sont des composants principaux ou secondaires ou encore des adjuvants dans la masse du matériau et des contaminants appartenant au revêtement de surface du matériau.

2.2.1. Stratégie de recherche

Pour identifier les contaminants potentiellement émis par les différents matériaux, nous avons effectué une recherche bibliographique sur la composition des matériaux, les adjuvants qui peuvent être rajoutés ainsi que les traitements de surface. Cette recherche a été basée sur la consultation de différents types de documents.

a. Les publications des Techniques de l'ingénieur

Ces ouvrages décrivent les procédés de fabrication d'un matériau donné, sa composition ainsi que les traitements de surface qu'il a subis. C'est le cas de la terre cuite et de la tuile béton par exemple. De plus, nous trouvons des descriptions des adjuvants utilisés par les industriels et intégrés dans la composition de certains matériaux.

b. Les normes

Les *normes de fabrication/procédés* de certains matériaux donnent la composition basique (en pourcentage massique) d'un matériau de toiture. Il s'agit des normes concernant les couvertures métalliques, les tuiles etc. La liste des normes consultées est présentée dans le [Tableau 9](#).

Tableau 9 : Normes de composition des matériaux de couverture

| Famille de matériaux | Variété | Norme de composition |
|-------------------------------------|---|--|
| Tuile | Terre Cuite | NF-EN 1304 |
| | Béton | NF EN 490 |
| Ardoise | Schiste | NF EN 12326 |
| | Fibrociment | NF EN 12467 |
| Bardeaux bitumineux | Bardeaux bitumineux | NF EN 544 |
| Plaque | Bitumineuse | EN 532 |
| | Fibrociment | NF EN 12467 |
| Plaque d'éclairiment | PVC | NF EN 1007- NF EN 1008- NF EN 1009 |
| | Polyester | NF EN 1010- NF EN 1011- NF EN 1012- NF EN 1013 |
| | Polycarbonate | NF EN 16153- NF EN 16153- NF EN 16153 |
| Acier | - Prélaqué - Inoxydable - Inoxydable duplex - Galvanisé - Aluzinc | NF EN 508 / 505 |
| Zinc | - Pré-patiné - Zinc-Titane - Zinc-Cuivre-Titane - 3e génération | NF EN 501 / 506 |
| Aluminium | - Naturel - Prélaqué | NF EN 508 / 507 |
| Cuivre | - Cu-DHP - Pré-Oxydé - Pré-Patiné - Alliage Bronze - Alliage "Or" | NF EN 504 / 506 |
| Plomb | - Alliage historique - Plissé laminé - Bi-laqué - Laminé | NF EN 12588 |
| Revêtement d'étanchéité bitumineuse | - SBS - APP - Autres polymères | NF EN 13859 |
| Revêtement d'étanchéité synthétique | - PVC-P - FPO/TPO | NF EN 13956 |
| | EPDM | NF EN 13956 |
| | CSPE | NF EN 13956 |
| Evacuation d'eaux pluviales | PVC | NF EN 607 |

c. Les sites des associations ou d'organisation mondiale ou française de référence des matériaux

Il s'agit par exemple, du Centre d' Information du Cuivre, Laiton et Alliages (CICLA) pour le cuivre ; la Fédération Française des tuiles et des briques (FFTB) pour les tuiles en terre cuite ; l'Association Ouvrière des Compagnons du Devoir du Tour De France (Aocdtf), etc.

d. Les documents techniques

Nous trouvons tout d'abord, les Avis techniques qui s'intéressent aux matériaux non figurant dans les DTU (cf. Chapitre 1.1).

Les fiches DEP (Déclaration Environnementale de Produit) fournissent des informations quantitatives sur le cycle de vie et liste aussi les impacts environnementaux du produit. Ce dernier document contient une section sur la fabrication et les « ingrédients » d'un matériau. Néanmoins, ce type de documents n'est pas toujours disponible pour tous les matériaux. En effet, il n'est pas obligatoire et sa production est faite volontairement par les fabricants.

e. Les brochures des fabricants

Nous avons aussi consulté les brochures des matériaux pour différents fabricants. Ces documents, nous les avons collectés soit dans les sites des fabricants soit lors du salon BATIMAT⁴⁵ 2011.

2.2.2. Contaminants présents dans la masse du matériau : composants principaux, secondaires ou additifs

Les matériaux métalliques (ex : zinc, cuivre, plomb) sont basés sur des alliages spécifiques de différents éléments sous différentes proportions. Les matériaux métalliques en contact avec l'eau relarguent des molécules métalliques. Les matériaux en zinc sont des alliages composés principalement du zinc et du titane, du cuivre et de l'aluminium comme composants secondaires (Rheinzink, 2005 ; Rheinzink, 2012 ; Vmzinc, 2010a ; Vmzinc, 2010b ; NF EN 501 / 506). Le zinc ancien contenait du cadmium⁴⁶. Les aciers sont composés principalement de fer et de carbone associés à d'autres molécules tels que Cr, Si, Mn, Al, Ti, Ni, S, P, N et Mo (Arval, 2009 ; Stainless et Pittsburgh, 2011; UGINE, 2002; Arcelor, 2002). Les différentes variétés d'aluminiums comportent comme éléments d'alliage Cu, Mn et Si (NF EN 508 / 507). Enfin, pour les cuivres, nous distinguons les alliages : Cuivre/étain,

⁴⁵ BATIMAT est un salon professionnel international consacré à la construction et au bâtiment.

⁴⁶ http://www.silvaloy.com/fr/cadmium_fr.php (consulté le 16/02/2014).

Cuivre/Bronze, Cuivre/Alumine, Cuivre/Zinc, Alliage "Or" (Cu, Al, Zinc, Etain) (CICLA, 2013 ;Guéguen, 1992; Vargel, 2010).

D'autres matériaux comme les membranes bitumineuses contiennent dans leurs compositions comme contaminants les HAP (Bowen et de Groot, 2000).

Enfin, d'autres molécules peuvent être présentes dans la composition du matériau rajoutées de manière involontaire lors du processus de fabrication. Il s'agit des impuretés tels les oxydes dans l'aluminium. Nous trouvons encore les additifs rajoutés tels les oxydes de fer et les additifs acryliques utilisés comme des colorants / pigments pour les tuiles en terre cuite et les tuiles béton (Monier, 2010a; Monier, 2010b ; Michele, 2007 ; Kornnman, 2009 ; Bresson, 2006). Nous trouvons aussi des pigments rajoutés pour la coloration en masse des matériaux en zinc (Vmzinc, 2010b).

2.2.3. Contaminants présents dans la masse du matériau : les adjuvants

La description des adjuvants est basée sur le travail de Y. Nohra (2010) et les ouvrages des Techniques de l'ingénieur (Carette, 1993 ; Verrier, 1992 ; Girois, 2013; Girois; 2004).

Les adjuvants sont des substances mélangées aux polymères, utilisés en faible concentration. Ils peuvent être organiques, organométalliques et même parfois minéraux comme les carbonates d'aluminium ou de magnésium qui sont des stabilisants thermiques du PVC, ou les noirs du carbone qui sont des antioxydants des polyoléfinés (Carette, 1993).

Ces molécules sont très spécifiques, elles sont rajoutées aux polymères pour assurer certaines fonctions telles que la flexibilité, la durabilité, la stabilité chimique et physique contre les paramètres climatiques et le ralentissement de la combustion. Nous trouvons également des biocides qui sont intégrés dans les membranes d'étanchéité destinées aux toitures végétalisées, utilisés comme anti-racine, c'est-à-dire pour empêcher la détérioration du revêtement par les racines de la végétation (Nohra, 2010). Différentes catégories d'adjuvants existent et elles sont fondées sur leur effet principal : plastifiants, stabilisants, les retardateurs de flammes lubrifiants, colorants, agents antichocs, biocides, etc (Carette 1993).

a. Les plastifiants

Un plastifiant est un adjuvant qui augmente la souplesse d'un polymère. La définition d'un plastifiant suivant la norme ISO 472 (1988) est :

« *Plastifiant* : substance volatile faible ou négligeable, incorporé à un plastique, destinée à abaisser son intervalle de ramollissement, faciliter sa mise en œuvre et augmenter sa flexibilité ou son extensibilité. »

Les plastifiants sont surtout utilisés dans les PVC (polychlorure de vinyle plastifié) ainsi nous les trouvons dans les membranes d'étanchéité en PVC.

Nous pouvons diviser les familles des plastifiants en deux groupes suivant leurs fréquences d'utilisation : les phtalates et les autres plastifiants (Nohra, 2010).

- *Les phtalates*

Les phtalates (esters phtaliques) sont principalement utilisés comme plastifiant pour le PVC. Ils sont les plastifiants les plus répandus dans le marché (75% du marché) (Nohra, 2010). Nous les trouvons dans les plaques d'éclairage en PVC et celles en Polyester (Girois, 2013 ; Onduline, 2002). Les cinq molécules des phtalates les plus utilisés dans le PVC sont BBP (Butylbenzyle), DnOP (di-n-octyle), DINP (di-isononyle), DIDP (di-isodécyle) et DEHP(di-(2-éthylhexyle) (Nohra, 2010 ; Verrier, 1992).

- *Autres Plastifiants*

Les autres plastifiants présents sur le marché constituent 25 % des plastifiants appliqués dans l'industrie, matériaux de construction... Il s'agit des époxydes et des phosphates des molécules utilisées dans les polymères entrant dans la constitution des éléments des toitures classiques et végétalisées (Nohra, 2010).

Les *époxydes* sont principalement utilisés dans les systèmes de stabilisation thermique des mélanges de PVC plastifiés. Les dérivés époxydes appliqués sont : l'huile de soja époxydée, les époxy-stéarates d'octyle (les plus appliqués) et les époxy-tallates d'octyle (Nohra, 2010 ; Verrier, 1992).

Les *phosphates* sont généralement appliqués comme retardateur de flamme. Les orthophosphates d'alkyle et/ou d'aryle ont été utilisés par le passé dans la formulation du PVC, mais de nos jours les phosphates de diphényl-octyle ou de diphényl-isodécyle sont préférés car ils confèrent de bonnes performances à froid (Nohra, 2010 ; Verrier, 1992).

Nous trouvons aussi des plastifiants primaires appliqués dans le PVC comme le copolymère d'éthylène et de propylène. Ce sont des produits très chers et peu utilisés (Verrier, 1992).

Enfin, nous avons les plastifiants secondaires ou extendeurs qui sont couplés à un plastifiant primaire (cité au-dessus). Par exemple, les *Chloroparaffines*, utilisés notamment dans le PVC, sont couplés généralement au DIDP (Verrier, 1992).

b. Les stabilisants

Les stabilisants sont des adjuvants permettant aux polymères de résister à différents types de dégradations, comme la dégradation par oxydation par l'oxygène de l'air, la thermo-

dégradation, la photo-dégradation causée par certaines substances dans le polymère qui sont photosensibles et l'hydrolyse des polymères causées spécifiquement par les espèces polaires dans les polymères (Nohra, 2010).

Un stabilisant doit être compatible avec le polymère auquel il va être ajouté et avec d'autres adjuvants présents ou associés pendant la fabrication du polymère (Girois, 2013; Girois, 2004).

- *Les Stabilisants thermiques*

Les stabilisants thermiques les plus utilisés dans les polymères sont les *antioxydants phénoliques* qui permettent d'empêcher la dégradation par oxydation. Parmi les antioxydants appliqués dans les membranes synthétiques en polyoléfines (FPO), nous distinguons le metilox, l'hydroxytoluène butylé (BHT) et le 2,6-Di-*tert.*-butylphenol et l'Irganox. Une autre catégorie des stabilisants thermiques est les *amines aromatiques*, mais leur utilisation est néanmoins limitée à cause de leur tendance à produire des sous-produits fortement colorés (Girois, 2013 ; Nohra, 2010).

- *Les Stabilisants photochimiques*

Ce sont des stabilisants UV (ultraviolet) qui permettent de protéger les polymères contre la dégradation photochimique causée par les rayons UV. Nous trouvons les *absorbants UV* (intégrés dans les PVC et polyoléfines) tels que les hydroxybenzophénones, le 2-hydroxy-4-(octyloxy)benzophénone et les benzotriazoles (tels que le 2,4-ditert-butyl-6-(5-chlorobenzotriazol-2-yl)phenol). Un autre absorbant intégré dans la couche de drainage des toitures végétalisées est ultraviolet UV-1164 qui appartient à la famille des triazines (Girois, 2013). Enfin, les HALS (Hindered Amine Light Stabiliser), en particulier le Bis(2,2,6,6-tetraméthyl-4-piperidyl)sebacate, sont utilisés dans les polyoléfines et les élastomères des revêtements d'étanchéité (Girois, 2013).

- *Autres stabilisants du PVC*

Les autres stabilisants sont à *base de plomb*. Pour réduire les émissions de plomb dans l'environnement, le comité de Vinyle 2010 exige l'élimination complète de l'utilisation de ces stabilisants en 2015. En particulier, les stabilisants en plomb ont été éliminés des tuyaux d'évacuation d'eau en Europe en 2006. En revanche, pour les membranes PVC-P ils n'ont pas complètement disparus (Nohra, 2010).

D'après M. Perez (responsable « norme » de la société Nicoll), à partir des années 2000, il y avait une diminution de l'utilisation du plomb. Aujourd'hui, les fabricants se sont engagés à ne plus utiliser de plomb dans le PVC. Le plomb a été remplacé à 95 % soit par :

- un stabilisant à base de l'étain qui sera lui aussi interdit à court terme et qui ne représente pas une grande part du marché ;
- par du sulfate de baryum.

- *Les Biocides*

Les biocides sont employés dans les polymères pour empêcher l'attaque des microorganismes ou le développement des algues, mousses, etc.

Les *organoétains* sont utilisés dans le PVC (Girois, 2004). Pour les membranes bitumineuses le Preventol B2 est utilisé comme un agent anti-racine (polyglycolester du mécoprop) qui par hydrolyse libère le mécoprop (CERTU, 2003 ; Adivet *et al.*, 2003 ; Bucheli *et al.*, 1998). En Suisse, le Preventol B2 n'est plus appliqué dans les membranes bitumineuses et il est remplacé par le Preventol B5 (octylester du mécoprop) et l'Herbitect (éthylhexylester du mécoprop) qui ont une faible affinité face à l'hydrolyse et ainsi une faible libération du mécoprop dans l'eau (Burkhardt *et al.*, 2007).

Notons que le mécoprop est une substance qui est soumise à une révision par le Conseil de la directive cadre sur l'eau afin d'être considérée comme une substance prioritaire dangereuse dans l'eau (Nohra, 2010).

c. *Les retardateurs de flammes*

Les retardateurs de flammes sont des produits chimiques utilisés pour améliorer le comportement au feu des matériaux combustibles (EFRA, 2004). Les principaux types de retardateurs de flammes sont des composés contenant des halogènes (brome et chlore), du phosphore, de l'azote, des minéraux (composés d'aluminium et de magnésium) et d'autres types comme les borates, l'oxyde d'antimoine Sb_2O_3 (Brossas, 1999; EFRA 2004), ou des chloroparaffines (Nohra, 2010).

Les retardateurs de flammes halogénés (bromés) sont aussi utilisés dans les revêtements bitumineux d'étanchéité des toitures. Les principales catégories utilisées sont les polybromodiphényles (PBB), les polybromodiphényléthers (PBDE), les tetrabromobisphénols A (TBBPA) et les hexabromocyclododécane (HBCD). Notons que les PBDE tels que les pentabromodiphényléthers (PEBDE), les octabromodiphényléthers (OCBDE) et les décabromodiphényléthers (DEBDE) sont considérés, par la DCE, comme des substances

polluantes prioritaires de l'eau, en particulier le DEBDE est classé comme la substance la plus dangereuse pour l'écosystème aquatique. Récemment, en 2011, l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a conclu que le Bisphenol A (appartenant aux TBBPA) provoque « des effets avérés chez l'animal (effets sur la reproduction, sur la glande mammaire, sur le métabolisme, le cerveau et le comportement) et d'effets suspectés chez l'Homme (effets sur la reproduction, sur le métabolisme et pathologies cardiovasculaires) ».

2.2.4. Contaminants présents dans le revêtement du matériau

Le revêtement d'un matériau peut être mis en place durant le procédé de fabrication. Nous distinguons les traitements de surface tels l'engobage ou le siliconage des tuiles en terre cuite (Lyonnet, 2004a; Lyonnet, 2004b; Techniques de l'ingénieur, 2013a; Techniques de l'ingénieur, 2013b), le prépatinage du zinc (Vmzinc, 2010b ; Rheinzink, 2012), la galvanisation de l'acier (Lamesch, 2004). Nous trouvons aussi les peintures à base d'acrylique, les couches de finition rapportées sur les tuiles en béton par exemple (Bresson, 2006 ; Monier, 2010b) ou encore des laquages appliqués sur quelques matériaux métalliques (acier, aluminium, zinc, plomb...) (Invernizzi, 2000). De nouveaux traitements de surface font leur apparition, comme le revêtement « autonettoyant », empêchant l'accrochage de particules sur le matériau. Les revêtements organiques sont employés sur les aciers tels que la résine polyester thermodurcissable, la résine thermoplastique fluorée à base de PVDF (Polyvinylidene fluoride), la résine thermoplastique à base de chlorure de polyvinyle sans phtalates et la résine thermoplastique fluorée (Arval, 2009).

Le revêtement est considéré comme un potentiel émetteur de contaminant via l'apport de nouvelles molécules. Il peut être aussi à l'origine d'une limitation d'émission de contaminants. Par exemple, l'acier brut reçoit par traitement de surface une couche de zinc donnant lieu à un nouveau matériau qui est l'acier galvanisé (Racek, 2007) qui devient émetteur de zinc (Robert-Sainte *et al*, 2009). L'acier revêtu émet moins de contaminants métalliques. A cause du prépatinage, le zinc prépatiné devient moins émetteur de zinc (Vmzinc, 2010b).

Les revêtements sont très variables et ils dépendent énormément du fabricant. Leur composition est parfois explicite mais la plupart du temps nous ne pouvons pas savoir exactement ce qui a été réellement utilisé dans le revêtement. Ceci s'explique par la confidentialité recherchée par les industriels pour protéger leurs recettes de fabrication. Donc, une grande diversité de molécules peut être rajoutée lors de l'application des revêtements.

2.2.5. Contaminants issus des pratiques d'entretien des toitures

Les pratiques d'entretien des toitures représentent une source de contamination des eaux de ruissellement des toitures. Les différents produits utilisés sont (Van de Voorde, 2012) :

- les produits de nettoyage simple (utilisés pour le dégraisage grossier des toitures) ;
- les produits anti-mousses : qui auront une action biocide d'élimination des mousses et lichens incrustés ;
- les imperméabilisants : utilisés sur les matériaux de toiture poreux tels que les tuiles afin de protéger contre l'humidité, la pluie, et le gel en réduisant leur porosité et en augmentant leur résistance au mouillage (ex : les hydrofuges) ;
- les peintures : elles permettent d'une part un embellissement de la toiture, ainsi qu'une imperméabilisation du support. Dans le cadre de la thèse d'Antoine Van de Voorde (2012), un état des lieux des molécules présentes dans les produits d'entretien des toitures a été effectué.

Les produits de dégraisage ne sont pas classés comme dangereux pour l'homme ni pour les milieux aquatiques d'après les fiches de déclaration sanitaire (FDS). Néanmoins certains peuvent être corrosifs (pH 12) du fait de la présence d'hypochlorite de sodium (eau de Javel). Les anti-mousses sont majoritairement des solutions aqueuses de benzalkonium. Dans quatre des dix neuf produits listés par A. Van de Voorde, une autre molécule biocide est utilisée, seule ou en complément des ammoniums quaternaires. Il s'agit de l'isothiazolinone, et de la terbutryne. D'après les FDS, le chlorure de benzalkonium est une molécule dangereuse pour l'environnement aquatique (poissons, algues,...). D'autre part, les imperméabilisants à base de solvants sont systématiquement indiqués comme dangereux pour l'environnement aquatique ce qui n'est pas le cas des imperméabilisants aqueux. Enfin, les peintures se présentent sous forme de solutions aqueuses ou de peintures acryliques. Certaines peintures comportent une action biocide avec dans un cas l'utilisation de terbutryne, un herbicide de la famille de l'atrazine (les triazines), mais aussi de zinc pyrithione (Van de Voorde, 2012).

2.2.6. Connaissance limitée sur les contaminants

Ce travail sur la composition des matériaux, leurs revêtements ainsi que les produits d'entretiens des toitures, montre un grand nombre de molécules susceptibles d'être émises lors de la pluie. Néanmoins, cette liste de contaminants potentiellement émis reste limitée, l'information n'est pas toujours claire sur ce qui est réellement utilisé. De plus, l'accès à l'information est très difficile. Même si certains produits sont normalisés la composition réelle

reste une boîte noire. En effet, lors des procédés de fabrication plusieurs impuretés peuvent s'intégrer dans le processus. En outre, les adjuvants qui peuvent être rajoutés ne sont pas toujours déclarés. Nous avons tenté lors du salon BATIMAT d'avoir des informations sur les compositions des produits mis sur le marché mais nous nous sommes heurtés à la réalité de la confidentialité des fabricants.

2.3. Contaminants effectivement émis par les matériaux de toiture

Dans ce paragraphe, nous allons identifier les contaminants réellement émis par les matériaux de toiture. Dans notre recherche nous nous sommes basés sur un ensemble de sources d'informations sur la contamination par les matériaux de toiture.

2.3.1. Stratégie de recherche

a. La base de données INIES

La base de données INIES⁴⁷ regroupe les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) des produits de construction. Ce sont des données déclarées par les fabricants ou les syndicats professionnels. Ces déclarations sont consultables gratuitement et sont publiques, et développées sur la base du volontariat des industriels. A l'heure actuelle, cette base comporte 859 FDES couvrant plus de 9691 produits du marché. Néanmoins, pour les matériaux de la toiture (couverture et évacuations des eaux pluviales) nous ne trouvons que 27 fiches. Ces FDES sont consultables à partir :

- du nom du produit ou de sa description ;
- du nom de l'organisme responsable de la fiche ou fabricants concernés par la fiche;
- d'une nomenclature fonctionnelle des produits de construction.

L'information relative à la contamination de l'eau est décrite dans la rubrique « informations utiles à l'évaluation des risques sanitaires de l'eau ».

Le [Tableau 10](#) résume les différentes informations recueillies dans la base INIES. Nous remarquons que l'information sur la contamination de l'eau par les matériaux de toiture est très pauvre. Nous ne disposons que de deux données quantitatives : flux de cuivre par les matériaux de cuivre et concentration du zinc émis par le zinc.

⁴⁷ La base de données INIES est la base nationale française de référence sur les impacts environnementaux et sanitaires des produits, équipements et services pour l'évaluation de la performance des ouvrages.

Tableau 10: Récapitulatif des informations recueillies dans les FDES

| Matériaux | Emissivité dans l'eau de ruissellement | Données existantes en Concentration ou flux |
|---|---|--|
| Acier simple | - | - |
| Acier inoxydable austénitique | « Non altérations des eaux de ruissellement » : apte à l'usage non domestique | - |
| Cuivre et alliages | oui | 1,3 g/m ² /an de cuivre dissous |
| Zinc | oui Utilisation de l'eau récupérée pour usages domestique | < 5 mg/L de zinc |
| Ardoises naturelles | - | - |
| Tuile béton | - | - |
| Ardoises fibrociment | - | - |
| Tuile en terre cuite | Utilisation de l'eau récupérée pour usages domestique | - |
| Étanchéité Asphalte | - | - |
| Membrane étanchéité synthétique en général | Utilisation de l'eau récupérée pour usages domestique - | - |
| Panneau drainant pour toiture végétalisée | - | - |

(-) Données inexistantes.

b. Les Déclarations Environnementales de Produits (DEP)

Outre la composition d'un produit, les DEP peuvent nous renseigner sur la qualité sanitaire de l'eau ou encore l'analyse de cycle de vie du produit. Toutefois, cette partie n'est pas toujours obligatoire. Aujourd'hui, les DEP prennent de plus en plus d'importance dans le secteur du bâtiment, favorisées par le souci des producteurs d'afficher des produits respectueux de l'environnement. Il faut noter que les DEP sont beaucoup plus nombreuses et précises que les FDES, et sont strictement encadrées et structurées, par le programme ISO 14025. Par contre, elles sont produites par plusieurs organismes et donc une accessibilité plus restreinte. Elles peuvent être téléchargées à partir des sites comme celui de *l'Institute Construction and Environment e.V.*, ou encore l'AIMCC (Association des Industries de Produits de Construction) ; même parfois à la demande auprès de l'entreprise détenteur du produit (téléchargement sur le site, etc.).

Le [Tableau 11](#) résume les différentes informations recueillies dans DEP. Nous remarquons que les données sur les émissions des produits dans l'eau sont très limitées. Les leaders de production des feuilles en zinc Vmzinc et Rheinzink ont fournis des données de flux d'émissions du contaminant zinc par leurs produits.

Tableau 11: Récapitulatif des informations recueillies dans les DEP

| Matériaux | Emissivité dans l'eau (Concentration ou flux) | Référence DEP |
|----------------------------------|--|--|
| Ardoise naturelle | - | (Rathscheck, 2010) |
| Ardoises fibrociment | - | (Berhad, 2012 ; Cembrit, 2012 ; Eternit, 2013) |
| Tuile en terre cuite | - | (Michele, 2007) (Monier, 2010a) |
| Tuile béton | - | (Monier, 2010b) |
| Cuivre et alliages | - | (KME, 2012 a, b) |
| Plomb | - | (Stolberg, 2011) |
| Aluminium | - | (IFBS, 2013) |
| Zinc naturel | 4,59 g/m ² /an | (Rheinzink, 2005) |
| | 2,3 g/m ² /an | (Vmzinc, 2010a) |
| Zinc prépatiné | 2-3 g/m ² /an | (Rheinzink, 2012) |
| Anthra-Zinc | 1,3 g/m ² /an | (Vmzinc, 2010b) |
| Quartz-Zinc | 0,8 g/m ² /an | |
| Plaque bitumineuse | - | (Onduline, 2013) |
| Membrane d'étanchéité élastomère | - | (POLYFIN AG, 2013) |

(-) Données inexistantes.

c. La littérature scientifique

Certains matériaux ont fait l'objet d'une étude expérimentale spécifique pour évaluer leur émissivité dans les eaux de ruissellement des toitures. Les résultats de ces travaux sont généralement publiés dans des revues scientifiques. Il s'agit donc d'identifier ces travaux.

Ainsi, des travaux élaborés sur des toitures réelles exposées aux conditions atmosphériques du site d'étude, l'émission est alors évaluée à partir de l'analyse des eaux de ruissellement en aval des toitures. Dans certains cas, l'évaluation des émissions soustrait les retombées atmosphériques. L'émission d'une toiture réelle a pour origine les matériaux des différents éléments de toit, ainsi une toiture en ardoise ou en tuile fait intervenir des éléments métalliques tels que les crochets, les gouttières, etc. (Lamprea, 2009).

D'autres recherches sur la qualité des eaux de ruissellement de toiture s'orientent vers les études en conditions contrôlées (Cone-Schiopu, 2007), c'est à dire à partir de toitures expérimentales disposées soit en laboratoire soit exposées en conditions atmosphériques réelles (Robert-Sainte *et al*, 2009). Ces études sont réalisées dans le but de déterminer plus exactement les apports en polluants des différents types de matériaux de couverture de toit et de ses accessoires (rampant, gouttière, crochets...), ainsi que d'évaluer l'influence de différents paramètres sur l'émission tels que : l'orientation de la toiture, l'inclinaison, l'âge, la rugosité...

2.3.2. Emission des contaminants métalliques

Dans la littérature, la plupart des travaux sur les émissions par les matériaux de toiture se sont focalisés sur les émissions de métaux (Bertling *et al.*, 2006; Förster, 1996; Gromaire-Mertz *et al.*, 1999; Odnevall Wallinder *et al.*, 1998; Quek et Förster, 1993, Robert-Sainte *et al.*, 2009).

En particulier, l'émission par les matériaux de toitures métalliques (zinc, cuivre, acier galvanisé...) a fait l'objet de premières études qui se sont élargies au fil du temps vers les matériaux non métalliques tels que les tuiles, les bardeaux, etc.

a. Émission de métaux par les matériaux métalliques

Les toitures métalliques présentent une source importante d'émission de métaux par temps de pluie. Il s'agit du lessivage des produits de corrosion formés sur la surface du matériau métallique. Cette source représente une contribution majeure à la contamination métallique des eaux pluviales, comme cela été montré pour l'agglomération parisienne (Gromaire *et al.*, 2001; Thévenot *et al.*, 2007). En effet, d'après les travaux de Gromaire-Mertz (1998) sur 11 toitures du bassin versant du Marais (Paris-France), les apports des toitures aux flux totaux des métaux dans les eaux de ruissellement du bassin versant ont été estimés à 64% pour le cuivre et à plus de 85% pour le cadmium, le plomb et le zinc.

Les contaminants métalliques les plus couramment mesurés dans les échantillons d'eaux de ruissellement de toiture sont le zinc, le cuivre, le plomb, le cadmium, le nickel et le chrome (Faller et Reiss, 2005; Lamprea, 2009; Leuenberger-Minger *et al.*, 2002; Odnevall Wallinder *et al.*, 2002; Robert Sainte *et al.*, 2009).

Nous remarquons que les travaux dans la littérature se focalisent souvent sur l'étude de l'émission d'un contaminant donné à partir de différents matériaux. Par exemple, les travaux effectués en Suède (Oodnevall Wallinder *et al.*, 1998; He *et al.*, 2001a; Karlen *et al.*, 2001; Odnevall Wallinder *et al.*, 2001; Bertling *et al.*, 2006) ou encore en Angleterre (Belghazi *et al.*, 2002) se sont focalisés uniquement sur l'évaluation de l'émission du zinc par différents matériaux de zinc (zinc naturel, zinc ancien, zinc prépatiné) et d'acier (acier galvanisé, acier galvanisé prépeint) dans des sites qui diffèrent par leur atmosphère (urbaine, industrielle...). Le but de ces travaux était d'évaluer les différents paramètres influençant l'émission du zinc. Ce constat est le même pour le contaminant cuivre émis par les matériaux en cuivre (Oodnevall Wallinder *et al.*, 2000; Odnevall Wallinder et Leygraf, 2001), ou le plomb émis par les matériaux en plomb (Faller et Reiss, 2005).

Ces travaux se sont focalisés sur l'émission uniquement par des feuilles métalliques qui sont utilisées sur le rampant et à l'émission d'un seul contaminant correspondant au composant

majeur. Nous pouvons expliquer ce manque de données par le fait que la prise en compte des matériaux de toitures comme sources de contaminations des eaux de ruissellement est nouvelle. Les chercheurs se sont focalisés dans une première approche à caractériser et quantifier les émissions de contaminants en étudiant les différents processus qui engendrent cette émission.

L'évaluation des émissions a été effectuée dans des conditions atmosphériques réelles : des petites plaques métalliques ont été exposées (0,3 m² pour les études en Suède et 0,5 m² en France) sur des bancs d'essai et les eaux de pluies ruisselées sur ces plaques ont été collectées. L'apport atmosphérique en contaminants, mesuré sur un banc d'essai témoin en plexiglass, a été déduit pour obtenir les émissions réelles par les matériaux métalliques. Ainsi, la comparaison des émissions du zinc par différents matériaux montre que le flux du zinc diminue quand le matériau est revêtu, ceci est validé dans les deux pays la France ([Robert Sainte et al., 2009](#)) et le Suède ([Odnevall Wallinder et al., 1998](#); [He et al., 2001a](#); [Karlen et al., 2001](#); [Odnevall Wallinder et al., 2001](#)) (cf. Figure 60). Ainsi, le traitement de prépatinage (la phosphatation chimique) subi par le zinc et donnant lieu à l'anthra-zinc permet de réduire les émissions de zinc d'environ 41% en France et de 55% en Suède. Cet écart se limite néanmoins à environ 30% après 5 années d'exposition à cause de l'altération de la couche de prépatinage ([Bertling et al., 2006](#)). La peinture appliquée sur l'acier galvanisé permet elle aussi de réduire le flux d'émission du zinc de 99% en France et de 97% en Suède. Ce phénomène a été montré aussi dans les travaux effectués en Nouvelle Zélande ([Kingette Mitchell Ltd. et Diffuse Sources Ltd., 2003](#)). Notons aussi, que dans les deux sites d'étude le zinc ancien est le matériau le plus émetteur de zinc. La comparaison des émissions de zinc par les différents matériaux montre une variabilité qui s'explique par des conditions d'expositions différentes.

Des travaux plus récents ([Clark et al., 2008a](#); [Lamprea, 2009](#); [Robert-Sainte et al., 2009](#)) se sont intéressés à étudier l'émission de plusieurs contaminants (Zn, Pb, Fe, Cu...) à partir de différents matériaux de toitures.

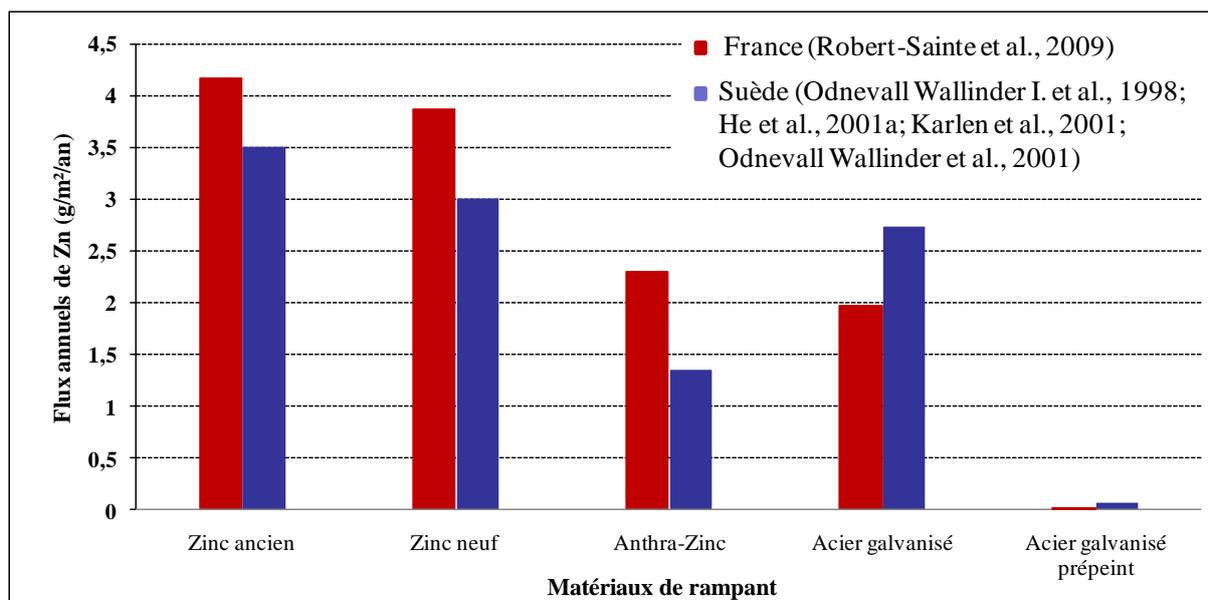


Figure 60 : Flux annuels d'émission du zinc par différents matériaux de rampant

De plus, les travaux de [Robert-Sainte \(2009\)](#) se sont intéressés aux émissions de métaux par les rampants métalliques mais également par les petits éléments de toit tels que les gouttières et les crochets de fixation des ardoises, souvent constitués de métaux (ex : zinc, cuivre, acier galvanisé). Cette étude a montré que les émissions de contaminants sont différentes en fonction du type d'usage du matériau. Ainsi, la concentration moyenne (sur 13 mois d'exposition) du zinc dans les eaux de ruissellement du rampant en zinc neuf ($4240 \mu\text{g.L}^{-1}$) est supérieure à celle mesurée pour la gouttière en zinc neuf ($734 \mu\text{g.L}^{-1}$). Notons que ces valeurs ont été mesurées pour des matériaux exposés dans des conditions réelles et après déduction des apports atmosphériques. Dans le cadre d'étude de lixiviation du zinc dans des conditions contrôlées, [Schiopu et al. \(2007\)](#) ont montré qu'une gouttière en zinc est une source d'émission de zinc et de cuivre qui entrent dans la composition du matériau zinc. Une autre étude a évalué l'émission du plomb par les rives en plomb contre mur d'une toiture réelle ([Wilson, 2003](#)).

Certaines études ([He et al., 2001a](#); [Clark et al., 2008b](#); [Robert-Sainte et al., 2009](#)) ont montré que l'émission de métaux lourds par les toitures peut être observée même après plusieurs années (30 ans, 60 ans, 100 ans...) de mise en œuvre. Ainsi, les matériaux anciens émettent plus de contaminants que ceux neufs. Par exemple le flux d'émission du cuivre par le matériau cuivre ancien (40 ans) est de $2,1 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ contre $1,3 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour le cuivre neuf ([He et al., 2001a](#)).

b. Émission de métaux par les matériaux non métalliques

Les travaux sur l'évaluation des émissions métalliques par les matériaux de toiture se sont élargis aux toitures non métalliques.

Les tests de lixiviation en laboratoire des bardeaux bitumineux ont montré que ces derniers émettent du Pb, Cu, Zn, Fe (Clark *et al.*, 2008a; Clark *et al.*, 2008b). Ainsi, les bardeaux bitumineux contiennent dans leur composition des métaux lourds comme composants secondaires. Les concentrations moyennes mesurées sont 0,66 mg/kg de Cu, 0,34 mg/kg de Pb, 1,22 mg/kg de Zn et 46,7 mg/kg de Fe.

Les matériaux en plastique peuvent émettre des métaux lourds tels que le plomb intégré dans la composition du matériau comme stabilisant (Boller, 1997; Persson et Kucera, 2001).

Une étude (Lamprea, 2009) effectuée sur des toitures réelles en ardoise, tuile, et terrasse en bitume montre une importante émission de métaux lourds en particulier le zinc, le plomb et le cadmium (cf. Tableau 12). En comparant les flux annuels en plomb et en zinc entre les différents toits, nous observons que les variations sont dues au type de couverture et des accessoires présents dans chaque toiture. Si nous prenons le cas de l'ardoise, nous avons un flux annuels de zinc important de l'ordre de 1626 mg/m²/an. Les origines du contaminant zinc sont les crochets et clous de fixation des éléments en ardoise qui sont métalliques (zinc, acier inoxydables...) ainsi que les descentes en zinc. Pour les toitures en tuiles et en bitume reliées à des gouttières en PVC, les émissions en plomb sont de 7 à 10 fois plus importantes que celles mesurées pour les toits en ardoise. Les flux de cadmium sont faibles par rapport aux autres contaminants. L'origine du cadmium s'explique par sa présence probable dans les gouttières en zinc ancienne. En effet, d'après le Chapitre 1.2, le zinc ancien contenait du cadmium dans sa composition.

Tableau 12: Flux annuels du Zn, Pb et Cd émis par des toitures réelles (Lamprea, 2009)

| Flux (mg.m².an⁻¹) | Zn | Cu | Pb | Cd | Ni | Cr |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Toiture réelle | | | | | | |
| Ardoise | 1626 | 3,61 | 11,43 | 0,8 | 4,55 | 2,53 |
| Tuile | 659,8 | 4 | 67,51 | 0,5 | 1,29 | 2,27 |
| Terrasse en bitume | 244,9 | 5,39 | 94,84 | 0,5 | 1,7 | 2,8 |

Une deuxième étude a été menée en Pologne sur quatre types de toitures réelles : en tuile terre cuite, en ardoise en fibres amiante, en zinc et une toiture-terrasse en bitume. Les résultats de cette étude (Tobiszewski *et al.*, 2010) montrent que ces toitures émettent du zinc, plomb,

cadmium et cuivre en différentes concentrations (cf. Tableau 13). L'émission du zinc par les toitures en zinc est deux fois supérieur à celle par les autres toitures. Le cuivre a été émis par les tuiles en terre cuite et terrasse en bitume et n'a pas été détecté dans le ruissellement des ardoise en fibres amiantes. La source du cuivre peut s'expliquer par la présence des éléments singuliers (ex : gouttière) métalliques sur les toitures en tuile, alors que pour les terrasses en bitume elles peuvent contenir des métaux dans leur composition.

Tableau 13: Gamme des concentrations de différents contaminants dans les eaux de ruissellement de différentes toitures (Tobiszewski *et al.*, 2010)

| Concentrations ($\mu\text{g.L}^{-1}$) Toiture réelle | Zn | Pb | Cu | Cd |
|---|----------|---------|----------|---------|
| Zinc | 5 - 9600 | 1-7 | 10 - 600 | 0,1 - 4 |
| Tuile en terre cuite | 5 - 800 | 1 - 40 | 10 - 600 | 0,1-3,7 |
| Ardoise en fibres amiante | 5 - 4200 | 1 - 2,3 | - | 0,1-1,3 |
| Terrasse en bitume | 5 - 4900 | 1-88 | 10 - 300 | 0,1-1,9 |

Enfin, des travaux effectués sur les toitures végétalisées ont montré des émissions de certains contaminants métalliques (Schwager *et al.*, 2013 ; Seidl *et al.*, 2013).

Des tests en laboratoire ont été effectués sur les végétaux (ex : sedum) ayant poussé sur différents types de substrat (intensif, semi-intensif, extensif et fibre de coco) (Schwager *et al.*, 2013). Des teneurs en éléments traces métalliques ont été détectées dans les végétaux qui dépendent de la nature du substrat, plus particulièrement sensible dans la partie racinaire. Ainsi, les teneurs en As, Cu, Cd, Pb, Cr et Ni sont supérieures pour la majorité des végétaux ayant poussé dans le substrat semi intensif et les teneurs en Zn dans le substrat fibre de coco. Par exemple, la teneur en As pour une végétation *sedum album* au niveau des racines est de : 2,65 $\mu\text{g/g}$ pour un substrat extensif, 0,4 $\mu\text{g/g}$ pour un substrat en fibre coco et 1,6 $\mu\text{g/g}$ pour un substrat semi-intensif.

Le ruissellement de deux toitures végétalisées pilotes avec différentes épaisseurs de substrats (6 cm et 16 cm) a été étudié au cours d'une demi-année et a été comparé au ruissellement d'un toit plat de référence (Seidl *et al.*, 2013). Cette étude a montré que les toitures végétalisées sont considérées comme une source de polluants principalement pour le carbone et le phosphore et présentent une forte rétention des métaux lourds, en particulier Zn et Cu. Ce résultat est plus prononcé pour la toiture avec un substrat épais. La rétention du cuivre est plus importante que celle du nickel. Les concentrations de métaux lourds mesurées pour les

différentes toitures sont faibles : elles varient entre 24 µg/L et 49 µg/L pour le zinc et entre 14µg/L et 42 µg/L pour le cuivre (cf. Figure 61).

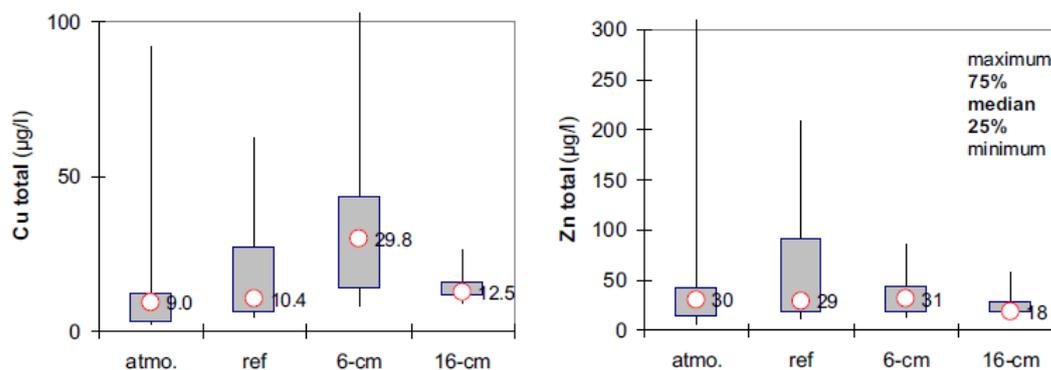


Figure 61 : Les distributions de concentration du Zn et Cu des eaux de ruissellement en fonction du type de couverture de toit. La médiane est marquée d'un point rouge (Seidl *et al.*, 2013).

c. Émission de métaux par les peintures

Les métaux peuvent être utilisés dans les peintures comme un agent biocide. Des études ont montré que ces métaux sont lessivés par temps de pluie c'est le cas du plomb émis par certaines peintures (Davis et Burns, 1999). Actuellement, les peintures en plomb sont interdites mais il existe encore des surfaces de peinture contenant du plomb qui continuent aujourd'hui à en émettre. D'autres molécules comme les nanoparticules d'argent (un agent anti bactérien) (Kaegi *et al.*, 2010) ou de titane (un pigment blanc) (Kaegi *et al.*, 2008) et les organoétains (Levet *et al.*, 2008) peuvent être émises par les peintures.

Des limites de présence des métaux dans les peintures ont de ce fait été imposées en Nouvelle Zélande (Kingette Mitchell Ltd. et Diffuse Sources Ltd., 2003) car la peinture est beaucoup appliquée sur l'acier galvanisé permettant de réduire son émission.

2.3.3. Émission des contaminants non métalliques

Les molécules qui ont fait l'objet d'étude sont les HAP, les pesticides, les biocides, les alkylphénols, le Bisphénol-A, les PCB et les phtalates.

a. Les HAP

Les toitures représentent une source non négligeable d'émission de contaminants organiques en particulier les HAP. Les revêtements d'étanchéités bitumineux ainsi que l'asphalte (Legret *et al.*, 2005) dans les toitures-terrasses sont un mélange d'hydrocarbures aromatiques, aliphatiques ou naphéniques, de masses molaires élevées, ayant comme provenance la distillation du pétrole. Ces HAP sont lessivés (Bowen et De Groot, 2000) par temps de pluie.

En particulier, le naphthalène et le phénanthrène sont les deux HAP majoritaires émis par les matériaux bitumineux et l'asphalte (Bowen et De Groot, 2000; Brandt et De Groot, 2001; Kriech *et al.*, 2002). Des tests de lixiviation ont été effectués dans des conditions de laboratoire ont montré que les concentrations mesurées pour différentes molécules de HAP varient entre 0,03 ng.L⁻¹ et 52 ng.L⁻¹ pour le bitume et entre 0,09 ng.L⁻¹ et 33 ng.L⁻¹ pour l'asphalte (Bowene et De Groot, 2000). Le naphthalène, le phénanthrène, le fluoranthène et l'acénaphène sont les HAP majoritaires détectés lors des mesures.

Dans les travaux de K. Lamprea (2009) le ruissellement des toitures réelles en zinc, en ardoise, terrasse bitume et les tuiles présente une contamination par les HAP. Le naphthalène (Np), le fluoranthène (Flu), le pyrène (Py) et le benzo(3,4)(b)fluoranthène (B[b]Fl) sont les HAP majoritaires dans le ruissellement des eaux de toitures. Les concentrations mesurées sont très faibles, les plus importantes sont détectées pour les terrasses en bitumes. Ainsi, sur 6 campagnes de mesure, les concentrations des 15 molécules HAP varient entre 50 ng.L⁻¹ et 76 ng.L⁻¹.

Pour résumer les mesures d'émission des HAP par les toitures en bitumes (toitures réelles et tests en laboratoire) sont très faibles et ne dépassent pas 76 ng.L⁻¹.

b. Les pesticides

Les pesticides épandus sur les surfaces urbaines imperméables sont lessivés par temps de pluie. En particulier, les pesticides (terbutylazine, bromophos, atrazine, simazine, malathion) ont été détectés dans le ruissellement des toitures en tuile terre cuite, en ardoise en fibres d'amiante, en zinc et une toiture-terrasse en bitume (Tobiszewski *et al.*, 2010). La plus forte concentration a été évaluée pour les tuiles en terre cuite ce qui peut s'expliquer par un potentiel ajout de pesticides dans les tuiles pour lutter contre les moisissures. Ces concentrations varient entre 0,01 µg.L⁻¹ et 2,72 µg.L⁻¹ pour des toitures réelles.

c. Les biocides

La Directive Biocide (DE, 98/8/CE) définit les produits biocides comme « les substances actives destinées à détruire, repousser ou rendre inoffensifs les organismes nuisibles, à en prévenir l'action ou à les combattre de toute autre manière, par une action chimique ou biologique ». Ces substances sont considérées comme dangereuses et ainsi toute utilisation d'une molécule biocide dans la composition d'un produit doit faire l'objet d'une autorisation de mise sur le marché très encadrée. Dans ce cadre, d'importants travaux ont été menés pour étudier les émissions de micropolluants organiques, en particulier les biocides, par les toitures.

L'émission des biocides peut avoir pour origine la composition du matériau en lui-même, comme dans l'exemple des émissions de mécoprop par hydrolyse d'un adjuvant anti-racinaire (Préventol B2) inclus dans membranes d'étanchéité (surtout bitumineuse) des toitures végétalisées (Bucheli *et al.*, 1998). Une étude plus récente (Burkhardt *et al.*, 2007) montre que la nouvelle technologie des membranes Herbitect® (HE; ethylhexylester de mecoprop) permet de relarguer moins de biocide par rapport aux précédentes génération Preventol®B2 (B2; polyglycolester de mecoprop). Ainsi, les tests en laboratoire ont montré que la membrane HE émettait 1,1 mg/m² de mécoprop contre 12,4 mg/m² par la membrane B2 après 11 arrosages (cf. Figure 62). Ceci s'explique par le fait que l'ethylhexylester de mécoprop dans la membrane HE est moins sensible à l'hydrolyse que le polyéthylène glycolester présent dans la membrane B2. Ainsi, l'émission du mécoprop dépend de la nature du matériau.

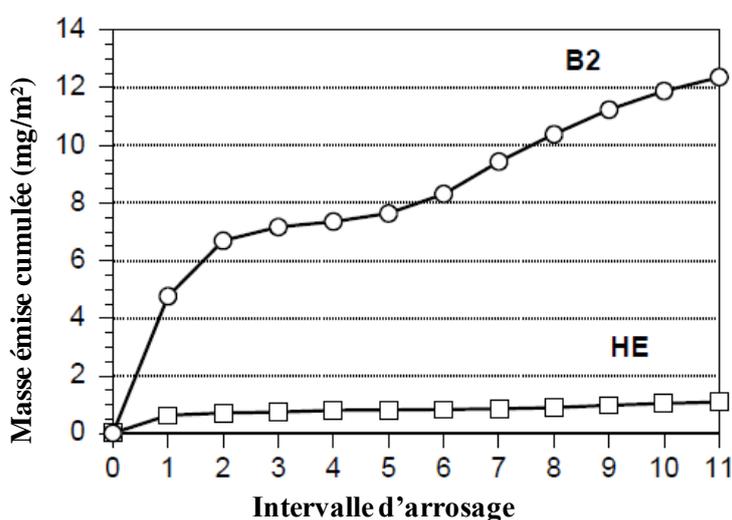


Figure 62 : Masses de mécoprop émises par les deux membranes B2 et HE cumulées sur 11 événements d'arrosage effectués en laboratoire (Burkhardt *et al.*, 2007)

L'émission de biocides a également été mise en évidence par des peintures et des crépis qui sont appliqués sur les surfaces des matériaux durant leurs vies en œuvre pour améliorer leurs caractéristiques ou leurs résistances au vieillissement (Burkhardt *et al.*, 2007; Jungnickel *et al.*, 2008; Schoknecht *et al.*, 2009). Les composés principaux recherchés sont le diuron et l'isothiazolinone, mais également la terbutrine et la carbendazime.

Le processus d'émission des biocides montre une décroissance rapide de leurs concentrations au début du lessivage qui se ralentira ensuite mais continue à diminuer au cours du temps. Il s'agit d'une émission en décroissance exponentielle (cf. Figure 63) jusqu'à épuisement du

stock de biocides dans les crépis et aussi dans les peintures (Jungnickel *et al.*, 2008; Wittmer *et al.*, 2011).

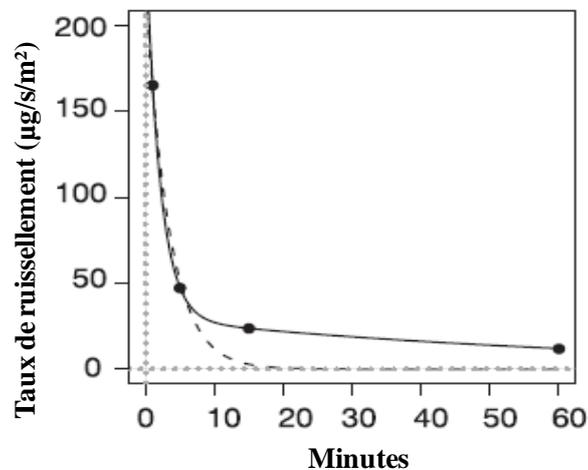


Figure 63 : Evolution du taux de ruissellement du biocide diuron pour le premier événement (Wittmer *et al.*, 2011)

Une nouvelle étude (Styszko *et al.*, 2013) menée sur l'émission de différentes molécules de biocides par les crépis (l'un à base de silicone et l'autre à base d'acrylique) montre que le diuron et l'isoproturon sont les molécules les plus rapidement libérées dans l'eau que les iodocard et DCOIT.

Le bois, un matériau durable, est de plus en plus utilisé dans les façades et la construction des bâtiments notamment dans les éco-quartiers. Pour accroître sa durabilité et assurer sa protection contre les attaques des organismes nuisibles, le bois est protégé par des produits chimiques. De ce fait, différentes molécules de biocides (tebuconazole, monoethanolamine, benzalkonium chloride) sont émises lors du lessivage des surfaces en bois (Lupsia *et al.*, 2013 ; Tiruta-Barna et Schiopu, 2011; Schoknecht *et al.*, 2003; Miyauchi *et al.*, 2005; Miyauchi et Mori, 2008). Une étude menée en Suisse a permis de dresser une liste de 18 molécules de biocides prioritaires à surveiller (Kleijer, 2008). Cette liste a été déterminée en fonction de l'utilisation des biocides dans les produits du traitement du bois, leur devenir lors du lessivage par la pluie et de leur écotoxicité.

Enfin, la thèse de A. Van de Voorde (2012) a mis en évidence l'émission de biocides dans les eaux de ruissellement des toitures traitées par les produits de démoussage des tuiles. Il s'agit du lessivage du benzalkonium un biocide toxique. L'étude a montré qu'après le traitement de la toiture par le benzalkonium, l'eau de pluie ruisselée est fortement contaminée (27mg/L)

(Van de Voorde *et al.*, 2012). Cette contamination diminue rapidement avec la pluie mais la concentration reste élevée même après 280 mm de pluie cumulée par rapport à EC50⁴⁸.

d. Emission d'autres molécules

De rares études se sont intéressées à rechercher l'émissions de certaines molécules organiques tel que les alkylphénols, les PCB et les phtalates à partir des matériaux de toiture. Les travaux sur de telles molécules restent limités dans la littérature. L'émission des phtalates (DEHP) par les matériaux de toiture a été mise en évidence pour certains matériaux de toitures. Il s'agit du plastique laqué et du PVC (Björklund *et al.*, 2008). L'origine de ces molécules est leur présence dans la composition des matériaux plastiques comme des agents plastifiants. Les revêtements d'étanchéité synthétiques utilisés dans les toitures-terrasses émettent aussi des phtalates tels que DEHP, DINP et DIDP.

Les alkylphénols peuvent être émis par le béton (Togero, 2006). Enfin, une étude a été menée pour identifier l'émission des alkylphénols et du bisphénol-A par les matériaux et produits issus de la construction (Lamprea, 2012). Les essais ont été effectués dans des conditions contrôlées en laboratoire avec une simulation de pluie pendant 2h. Les résultats de ce travail montrent que les membranes d'étanchéité SBS, les gouttières en PVC et les panneaux sandwich en polycarbonate sont des sources importantes de bisphénol-A. L'apport aux eaux de ruissellement peut varier de 0,5 à 0,8 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ (cf. Tableau 14) selon le type de matériaux. Les membranes d'étanchéité SBS sont également source de contamination en alkylphénols des eaux de ruissellement avec une émission en moyenne de 9 $\mu\text{g}/\text{m}^2$.

Tableau 14: Emission de bisphénol-A et des alkylphénols par différents matériaux (Lamprea, 2012)

| Matériaux | Bisphénol-A | Alkylphénols |
|---------------------------|-------------|--------------|
| Membrane d'étanchéité SBS | 0,5 - 1,4 | 8,5 - 9,1 |
| Plaque en polycarbonate | 0,5 - 0,7 | 0 |
| Gouttière en PVC | 0,5 - 0,8 | 0 |

⁴⁸ L'EC50 (pour Effective Concentration) est la concentration seuil à partir de laquelle une molécule exerce un effet sur la moitié d'une population d'organismes. Cet effet peut être très variable. Il peut s'agir d'une baisse de mobilité, d'un changement de couleur, etc.

2.4. Flux unitaires d'émission de contaminants par les matériaux de toiture : état de l'art

Dans ce paragraphe nous allons identifier les différents flux unitaires évalués pour certains contaminants dans certains matériaux de toiture. Les flux unitaires annuels d'émission de contaminants sont très limités dans la littérature, la plupart des valeurs trouvées correspondent aux contaminants métalliques. En effet, les travaux se sont focalisés sur l'évaluation des concentrations ponctuelles pour certains événements pluvieux de certaines molécules afin de déterminer le niveau de toxicité de l'eau collectée au niveau de la toiture ou du banc d'essais.

2.4.1. Flux unitaires annuels de contaminants métalliques

Les contaminants métalliques les plus couramment mesurés dans les échantillons d'eaux de ruissellement de toiture sont le zinc, le cuivre, le plomb, le cadmium, le nickel et le chrome. Les résultats sont traduits dans le [Tableau 15](#).

Le zinc est fortement émis par les matériaux en zinc suivi de l'acier galvanisé. Les données de flux annuels de zinc émis par les matériaux en zinc sont différentes en fonction du site d'étude en France. Cette variabilité s'explique par des conditions atmosphériques différentes et donc un processus de corrosion du matériau en zinc qui n'est pas le même d'un site à l'autre. Il faudra noter que les flux de zinc mesurés dans un site industriel sont deux fois supérieurs à ceux mesurés dans les sites urbains ([cf. Tableau 15](#)). Ceci confirme bien l'influence de l'atmosphère qui est plus corrosive dans un site industriel. Les mêmes conclusions sont effectuées pour les calculs de flux de zinc par les matériaux en zinc en Suède et en Belgique.

En France, le flux annuel de zinc émis par les matériaux en zinc pour des sites urbains et péri-urbain se situe entre 2105 mg/m²/an et 4517 mg/m²/an ([cf. Tableau 15](#)). En Suède, ce flux est entre 800 mg/m²/an et 3500 mg/m²/an ([cf. Tableau 15](#)). En Suisse, le flux est entre 1900 mg/m²/an et 4290 mg/m²/an. Les bornes basses correspondent aux émissions des matériaux en zinc prépatinés alors que les bornes supérieures correspondent aux émissions des matériaux en zinc ancien. Cette variabilité de valeurs s'explique toujours par les conditions atmosphériques (pluviométrie, taux SO₂, alternance des temps sec et humide...) auxquelles le matériau est soumis : ces conditions diffèrent nettement d'un pays à un autre.

Si l'on regarde les autres contaminants émis par les matériaux en zinc, nous remarquons que ceux-ci émettent du cuivre, du cadmium, du plomb, du nickel et du chrome. Notons que les bornes supérieures des valeurs calculées par [Robert-Sainte \(2009\)](#) sont celles du zinc ancien. Ainsi, l'explication des émissions de ces contaminants vient du fait qu'avec la révolution

industrielle, les fabricants de feuilles métalliques (en zinc ou autres) avaient leurs propres formulations. En d'autres termes, une normalisation des compositions des matériaux n'existait pas à cette époque : pour le zinc, celle-ci date depuis 1983 nommée NF A55-201 (1983-06-01).

Tableau 15: Les flux d'émission des contaminants métalliques élaborés dans la littérature

| Famille de matériau de toit | Flux de contaminants (mg/m ² /an)* | | | | | | Nature du site (Localisation) | Références | Pays |
|-----------------------------|---|-------|----------|-------|-------|--------|--|---|----------|
| | Zn | Cu | Pb | Cd | Ni | Cr | | | |
| Zinc | 2295-4517 | 0-1,6 | 0,5-19,1 | 0-2 | 0-6 | 0-0,06 | Urbain (Créteil) | (Robert-Sainte <i>et al.</i> , 2009) | France |
| | 2105-4145 | 0-0,9 | 0,3-15,8 | 0-1,5 | 0-5,5 | 0-0,04 | Péri-urbain (Champs) | | |
| | 8720 | - | - | - | - | - | Industriel (Normandie) | | |
| | 3910 | - | - | - | - | - | Rural (Payerne) | (Leuenberger-Minger <i>et al.</i> , 2002) | Suisse |
| | 1900-4290 | - | - | - | - | - | Péri-Urbain (Dübendorf) | | |
| | 3340 | - | - | - | - | - | Urbain (Bern) | | |
| | 7080 | - | - | - | - | - | Autoroutier (Härkingen) | | |
| | 800-3500 | - | - | - | - | - | Urbain (Stockholm) | (Odnevall Wallinder <i>et al.</i> , 1998; He <i>et al.</i> , 2001b; Karlen <i>et al.</i> , 2001; Odnevall Wallinder <i>et al.</i> , 2001; Bertling <i>et al.</i> , 2006) (Vmzinc, 2010b; Persson et Kucera, 2001) | Suède |
| | 1800-2200 | - | - | - | - | - | Rural | (Verbiest <i>et al.</i> , 1999) | Belgique |
| | 14600-11800 | - | - | - | - | - | Urbain et industriel | | |
| | 3800-7000 | - | - | - | - | - | Industriel (Olen) | | |
| | 4,6-3 | - | - | - | - | - | Zone avec haute concentration de SO ₂ | (Rheinzink, 2005; Rheinzink, 2012) | - |

| Famille de matériau de toit | Flux de contaminants (mg/m ² /an)* | | | | | | Nature du site (Localisation) | Références | Pays |
|-----------------------------|---|-----------|------------|-------|-------|-----------|---------------------------------|---|----------|
| | | | | | | | | | |
| Plomb | 52,4-113 | 6,9-8,7 | 7233-22491 | 0-4,6 | 0-1,1 | 0 | Urbain (Créteil) | (Robert-Sainte <i>et al.</i> , 2009) | France |
| | 43,1-86,6 | 4,2-16,6 | 7695-11036 | 0-4,2 | 0 | 0 | Péri-urbain (Champs) | | |
| | - | - | 4000 | - | - | - | Péri-Urbain (Dübendorf) | (Faller et Reiss, 2005) | Suisse |
| | - | - | 1030 | - | - | - | Evaluation théorique | (Schultze-Rettmer, 1995) | Allmagne |
| | - | - | 880-7650 | - | - | - | Urbain | (Wilson, 2003) | Pays Bas |
| Cuivre | - | 580 | - | - | - | - | Rural (Payerne) | (Leuenberger-Minger <i>et al.</i> , 2002) | Suisse |
| | - | 1300-1450 | - | - | - | - | Péri-Urbain (Dübendorf) | (Leuenberger-Minger <i>et al.</i> , 2002; Faller et Reiss, 2005) | |
| | - | 350 | - | - | - | - | Urbain (Bern) | (Leuenberger-Minger <i>et al.</i> , 2002) | |
| | - | 110 | - | - | - | - | Autoroutier (Härkingen) | | |
| | - | 1576 | - | - | - | - | Urbain (Milan) | (Goidanich <i>et al.</i> , 2011) | Italie |
| | - | 600-1000 | - | - | - | - | Rural (Hoboken) | (Odnevall Wallinder et Leygraf, 2001; Odnevall Wallinder et Leygraf, 1997; He <i>et al.</i> , 2001a; Karlen, 2002; Sandberg <i>et al.</i> , 2006) | Suède |
| | - | 1100-1700 | - | - | - | - | Urbain (Stockholm) | (Odnevall Wallinder <i>et al.</i> , 2000; Odnevall Wallinder et Leygraf, 2001) | |
| | - | 1250 | - | - | - | - | Péri-Urbain (Farsta) | (Odnevall Wallinder <i>et al.</i> , 2009) | |
| | - | 3930 | - | - | - | - | Industriel (Normandie) | (Jouen <i>et al.</i> , 2004) | France |
| - | 1360-1610 | - | - | - | - | Marin (-) | (Sandberg <i>et al.</i> , 2006) | | |

| Famille de matériau de toit | Flux de contaminants (mg/m ² /an)* | | | | | | Nature du site (Localisation) | Références | Pays |
|-----------------------------|---|-------|-------|------|---------|----------|-------------------------------|---|--------|
| | 0-1966 | 0-2 | 0-0,4 | 0 | 0-0,1 | 0-0,07 | | | |
| Acier | 0-1966 | 0-2 | 0-0,4 | 0 | 0-0,1 | 0-0,07 | Urbain (Créteil) | (Robert-Sainte <i>et al.</i> , 2009) | France |
| | 0-1867 | 0-0,4 | 0-0,5 | 0 | 0 | 0 | Péri-urbain (Champs) | | |
| | 2400 | - | - | - | - | - | Péri-Urbain (Dübendorf) | (Faller et Reiss, 2005) | Suisse |
| | - | - | - | - | 200-750 | 280-1200 | Urbain (Stockholm) | (Odnevall Wallinder <i>et al.</i> , 2002; Odnevall Wallinder et Leygraf, 2002) | Suède |
| | 70-2700 | - | - | - | - | - | Urbain (Stockholm) | (Karlen <i>et al.</i> , 2001; Odnevall Wallinder <i>et al.</i> , 2001; Bertling <i>et al.</i> , 2006) | Suède |
| Aluminium | 33,7 | 0,4 | 2,1 | 0 | 0 | 0,4 | Urbain (Créteil) | (Robert-Sainte <i>et al.</i> , 2009) | France |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Péri-urbain (Champs) | | |
| | 540 | - | - | - | - | - | Marin (Brest) | (Qiu <i>et al.</i> , 2012; Zhang <i>et al.</i> , 2012; Zhang <i>et al.</i> , 2013) | |
| Ardoise | 1626 | 3,61 | 11,43 | 0,8 | 4,55 | 2,53 | Urbain (Nantes) | (Lamprea, 2009) | |
| Tuile | 660 | 4 | 67,51 | 0,5 | 1,29 | 2,27 | | | |
| Bitume | 245 | 5,39 | 94,84 | 0,50 | 1,7 | 2,8 | | | |

* Nous avons choisi l'unité mg/m²/an pour pouvoir ressortir les plus faibles valeurs donc le nombre de chiffres significatifs n'est pas harmonisé du fait de la variabilité des valeurs.

- Les cases en mauve correspondent aux données liées aux zones urbaines.

2.4.2. Flux unitaires annuels de contaminants non métalliques

Dans la littérature les données de flux unitaires des molécules non métalliques sont très limitées. Concernant les biocides épandus sur les toitures, nous pouvons noter les travaux d'A. [Van de Voorde \(2012\)](#) sur l'émission du benzalkonium issu de l'entretien (démoussage) des toitures en tuile. Le flux annuel de benzalkonium a été évalué expérimentalement à l'échelle de bancs d'essais (~ 1 m² projeté). Pour une toiture peu sale en tuiles de béton, le flux mesuré après une année d'exposition est de 200 g/m²/an alors que pour une toiture en terre cuite très sale (avec beaucoup de moisissures) nous avons un flux de 15 g/m²/an. Les tuiles en béton émettent beaucoup plus de benzalkonium que les tuiles en terre cuite. Ceci s'explique par la nature des tuiles très différentes : une tuile en terre cuite minérale perméable (ce qui permet au benzalkonium de pénétrer en profondeur de la tuile) et une tuile en béton moins imperméable mais permet une fixation du benzalkonium en surface.

Une étude sur l'émission des biocides par les peintures des façades a permis de développer un modèle d'évaluation de la dynamique du ruissellement de biocides ([Wittmer et al., 2011](#)). L'application du modèle à la molécule diuron montre que le flux de biocide dépend énormément de la hauteur de la pluie, plus celle-ci est grande plus le flux est important. Les valeurs de flux mesurées se situent entre 0,06 et 0,2 g/m²/an.

Il convient de noter que le calcul des flux des biocides émis par les peintures ou le traitement de démoussage dépend d'un autre paramètre celui de la dernière date du traitement. En fait, le stock émissile de biocides s'épuise au cours du temps et avec un nouveau traitement (démoussage ou peinture) un nouveau stock de contaminants est ajouté.

Pour les toitures végétalisées, l'émission de mécoprop a été évaluée pour deux types de membranes d'étanchéité différentes ([Burkhardt, 2011](#)). Le flux ainsi calculé sur 11 événements d'arrosage est de 12,4 mg/m² pour la membrane Preventol B2 et de 1,1 mg/m² pour la membrane Herbitect.

3. Synthèse des contaminants potentiellement émis et ceux effectivement émis par les matériaux de toiture

L'étude des émissions par les matériaux de toiture reste très parcellaire malgré l'importance accordée à ces émissions. L'étude de la composition des matériaux montre un grand nombre

de composants susceptibles d'être émis par les matériaux. Néanmoins, ces composants ne sont pas toujours bien explicites.

Les travaux sur les émissions réelles par les matériaux de toitures montrent parfois des contaminants qui sont *a priori* absents dans la composition du matériau étudié comme les pesticides, les HAP et les PCB. Ceci s'explique d'une part par un apport atmosphérique en temps sec. D'autre part, ces contaminants peuvent être incorporés volontairement ou non volontairement en très faibles quantités dans la composition du matériau et ils ne sont pas déclarés dans la composition.

Le [Tableau 16](#) résume les différents contaminants potentiellement émis et ceux étudiés et quantifiés dans la littérature.

L'évaluation de la contamination des eaux de ruissellement des toitures a été effectuée soit dans des conditions contrôlées soit sur des toitures réelles. La plupart des résultats a été traduite sous formes de concentrations ponctuelles pour certains événements pluvieux de certaines molécules afin de déterminer le niveau de toxicité de l'eau collectée au niveau de la toiture ou du banc d'essai. Ces données de concentrations, dans la littérature, que ce soit de contaminants métalliques ou organiques n'ont pas été étudiées dans les travaux de thèses de [Schiopu \(2007\)](#), [Robert-Sainte \(2009\)](#), [Lamprea \(2009\)](#) et [Van de Voorde \(2012\)](#). Dans le cadre de la présente thèse nous nous intéressons à évaluer le flux moyen annuel d'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture à l'échelle urbaine. Ainsi, nous avons dressé un tableau des différents flux unitaires annuels d'émission de certains contaminants évalués dans la littérature. Ce travail montre que les données sur les flux sont très limitées dans la littérature surtout pour les contaminants non métalliques. Les données de concentrations sont évaluées sur des durées très courtes et pour des événements pluvieux très variables ce qui rend très difficile l'extrapolation de ces données pour obtenir des flux annuels.

Tableau 16: Synthèse des contaminants potentiellement émis et ceux effectivement émis par les matériaux de toiture

| Source | Contaminant(s) suspecté(s) | Contaminant(s) émis | Données existantes en Concentration ou flux |
|--|---|--|---|
| Asphalte | - HAP | - HAP • naphthalène • phénanthrène | Concentration |
| Bardeaux bitumineux | - | Pb, Cu, Zn, Fe | Concentration |
| Béton | - | - Alkylphénols | Concentration |
| Couche de drainage des toitures végétalisées | - Absorbants UV : • ultraviolet UV-1164 | - | - |
| Démoussage tuile béton et tuile en terre cuite | Biocide : benzalkonium | Benzalkonium | Concentration et Flux |
| Elastomères des revêtements d'étanchéité | - Absorbants UV : • HALS (Hindered Amine Light Stabiliser) tel que le Bis(2,2,6,6-tetraméthyl-4-piperidyl)sebacate | - | - |
| Matériaux en acier | Fe, Cr, C, Si, Mn, Al, Ti, Ni, S, P, N, Mo | Al, Ba, Co, Fe, Mn, Sr, Ti, Zn, Cu, Pb, Ni, Cr | Concentration et Flux |
| Matériaux en aluminium | Al, Cu, Mn, Si | Ba, Zn, Al, Cu, Pb, Cr, Fe, Mn, Ti | Concentration et Flux |
| Matériaux en cuivre | Cu, Sn, Al, Zn | Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Pb, Sr, Ti, Zn | Concentration et Flux |
| Matériaux en plomb | Pb, Sb, Sn, Al, Te, Cu, Ag | Pb, Cu, An, Cd, Ni | Concentration et Flux |
| Matériaux en zinc | Zn, Ti, Al, Cu, Cd | Al, Ba, Cd, Co, Li, Mn, Ni, Pb, Sr, Fe, Zn, Ti, Cu, Cr | Concentration et Flux |
| Membranes bitumineuses des Toiture végétalisée | - Herbicide : • Preventol B2 (polyglycolester du mécoprop) • Preventol B5 (octylester du mécoprop) • Herbitect (éthylhexylester du mécoprop) | Mécoprop | Concentration et Flux |
| Membranes d'étanchéité SBS | - | - Bisphénol-A - Alkylphénols | Concentration |
| Membranes synthétiques en polyoléfines (FPO) | - Stabilisants thermiques : Les polyoléfines : antioxydants phénoliques • Metilox • hydroxytoluène butylé (BHT) • 2,6-Di-tert.-butylphenol et l'Irganox. - Stabilisants thermiques : Amines aromatiques - Stabilisants photochimiques : Absorbants UV : • Hydroxybenzophénones • 2-hydroxy-4-(octyloxy)benzophénone • benzotriazoles (tels que le 2,4-ditert-butyl-6-(5-chlorobenzotriazol-2-yl)phenol) • HALS (Hindered Amine Light Stabiliser) tel que le Bis(2,2,6,6-tetraméthyl-4-piperidyl)sebacate | - | - |

| Source | Contaminant(s) suspecté(s) | Contaminant(s) émis | Données existantes en Concentration ou flux |
|------------------------------------|---|--|---|
| Panneaux sandwich en polycarbonate | - | - Bisphénol-A | Concentration |
| Peinture et crépis | <ul style="list-style-type: none"> - Biocides : <ul style="list-style-type: none"> • diuron • isothiazolinone • terbutyne • carbendazime. - Plomb | <ul style="list-style-type: none"> - Nanoparticules d'argent de titane (un pigment blanc) - Organoétains - Biocides <ul style="list-style-type: none"> • diuron • isothiazolinone • terbutyne • carbendazim • isoproturon • iodocard • DCOIT - Plomb - Alkylphénols | Concentration |
| Plastique laqué | - | <ul style="list-style-type: none"> - Phtalates : <ul style="list-style-type: none"> • DEHP | Concentration |
| Polymères | <ul style="list-style-type: none"> - Plastifiants : les Phosphates : <ul style="list-style-type: none"> • orthophosphates d'alkyle et/ou d'aryle • phosphates de diphényl-octyle ou de diphényl-isodécyle | - | - |
| PVC | <ul style="list-style-type: none"> - Plastifiant : <ul style="list-style-type: none"> • copolymère d'éthylène et de propylène • Chloroparaffines - Les Phtalates : <ul style="list-style-type: none"> • BBP (Butylbenzyle) • DnOP (di-n-octyle) • DINP (di-isononyle) • DIDP (di-isodécyle) • DEHP (di-(2-éthylhexyle)) - Plastifiants : Epoxydes <ul style="list-style-type: none"> • l'huile de soja époxydée • les époxy-stéarates d'octyle (les plus appliqués) • époxy-tallates d'octyle - Plastifiants : Les phosphates : <ul style="list-style-type: none"> • orthophosphates d'alkyle et/ou d'aryle • phosphates de diphényl-octyle ou de diphényl-isodécyle - Absorbeurs UV : <ul style="list-style-type: none"> • Hydroxybenzophénones • 2-hydroxy-4-(octyloxy)benzophénone • benzotriazoles (tels que le 2,4-ditert-butyl-6-(5-chlorobenzotriazol-2-yl)phenol). -Stabilisants à base de plomb. -Stabilisant à base de l'étain - Stabilisant : Sulfate de baryum -Biocides : <ul style="list-style-type: none"> • organoétains | <ul style="list-style-type: none"> - Bisphénol-A - Plomb - Phtalates : DEHP | Concentration |

| Source | Contaminant(s) suspecté(s) | Contaminant(s) émis | Données existantes en Concentration ou flux |
|--|---|---|---|
| Revêtements d'étanchéité bitumineux | - HAP - Retardateurs de flammes halogénés <ul style="list-style-type: none"> • polybromodiphényles (PBB) • polybromodiphényléthers (PBDE) • les tetrabromobisphénols A (TBBPA) : Bisphenol A • hexabromocyclododécane (HBCD) • pentabromodiphényléthers (PEBDE) • octabromodiphényléthers (OCBDE) • décabromodiphényléthers (DEBDE) | - HAP <ul style="list-style-type: none"> • naphthalène • phénanthrène • fluoranthène • Acénaphthène • Pyrène • benzo(3,4)(b)fluoranthène - Zn, Pn, Cd, Cu | Concentration |
| Revêtements d'étanchéité synthétiques | - | - Phtalates : <ul style="list-style-type: none"> • DEHP • DINP • DIDP. | Concentration |
| Toiture végétalisée | - | As, Cu, Cd, Pb, Cr, Ni | Concentration |
| Traitement de surface du bois | - | - Biocides <ul style="list-style-type: none"> • tebuconazole • monoethanolamine • benzalkonium • chloride | Concentration |
| Tuile en terre Cuite | - | Pesticides : <ul style="list-style-type: none"> -terbuthylazi -bromophos -atrazine - simazine - malathion | Concentration |

PARTIE 2.

**METHODOLOGIE DE CHANGEMENT D'ECHELLE POUR
L'EVALUATION DES FLUX URBAINS DE CONTAMINANTS
ISSUS DES TOITURES**

« Les villes sont des systèmes ouverts, c'est-à-dire des systèmes qui interagissent en permanence avec leur environnement, dont les éléments constitutifs sont également en interaction et par conséquent interdépendants »

Gérard Hégron et Olivier Haxaire

Le grand travail bibliographique de la [Partie 1](#) a été basé sur la recherche d'informations à partir de la bibliographie scientifique classique, qui s'est avérée insuffisante, ce qui a conduit à avoir recours à l'utilisation de la littérature grise, de sites internet des professionnels des toitures, une recherche internet par mots clés et une analyse des brochures des produits collectées lors de BATIMAT 2011. Cette recherche pose la question de la validité des informations recueillies. Nous avons opté comme méthode de validation la comparaison pour un même matériau de plusieurs informations de différents producteurs. Pour les contaminants potentiellement émis nous considérons que la composition normalisée des matériaux est respectée par tous les industriels. Par contre pour les contaminants non déclarés par les producteurs l'information reste comme une boîte noire entrant dans le processus de confidentialité des industriels.

Ainsi, nous considérons que, si dans le cadre de ce travail nous avons pu obtenir une vision assez complète des matériaux de toitures existants à l'échelle urbaine, pour les contaminants la connaissance demeure très partielle et des études futures devront être menées. Elles viseront, d'une part à identifier les contaminants émis par les matériaux, et, d'autre part à produire des données de flux unitaires qui restent très limitées dans la littérature.

Cette étude bibliographique de la [Partie 1](#) montre une diversité très importante des matériaux de toiture ce qui n'est pas facile à quantifier à grande échelle. De plus, les données de flux unitaires d'émission des contaminants ont été produites essentiellement à petites échelles spatiales ne dépassant pas l'échelle du bâtiment. L'évaluation des émissions à grandes échelles, la tâche paraît très difficile, nécessite l'invention d'une méthode spécifique pour remplir cet objectif.

Ainsi, la question qui se pose « *Comment évaluer le flux annule d'émission d'un contaminant dans le ruissellement des matériaux de toiture à l'échelle urbaine?* »

Pour répondre à cette question nous allons développer, dans la [Partie 2](#), une méthode de changement d'échelle pour l'évaluation des flux de contaminants à l'échelle urbaine. Le [Chapitre 2.1](#) consiste à décrire le développement de la méthode en termes de démarche et principes méthodologiques employés. Ensuite, dans le [Chapitre 2.2](#), nous étudions le phénomène d'émission à l'échelle du toit afin d'identifier les différents paramètres influençant l'émission à l'échelle du toit et à l'échelle urbaine. Nous définissons alors la notion de *situation-type d'émission d'un contaminant par les matériaux de couverture à l'échelle du toit* comme un cas élémentaire d'émission d'un contaminant caractérisé par son appartenance à un matériau et sa localisation sur le toit. A chaque situation-type on associe

un flux unitaire unique d'émission d'un contaminant. Le [Chapitre 2.3](#), permet d'identifier les paramètres relatifs à l'échelle urbaine et dresse une liste des recommandations pour l'évaluation des émissions de contaminants à grande échelle à partir d'une étude bibliographique sur les méthodologies repérées de changements d'échelle. Il s'agit de méthodologies traitant des problématiques partageant une ou plusieurs caractéristiques communes avec notre recherche.

Enfin, la description et l'interprétation de ces critères de choix des matériaux de toiture a permis de définir un moyen opérationnel d'identification des matériaux de toiture à l'échelle urbaine. Il s'agit de découper l'échelle urbaine en zones homogènes en termes de répartition propre des matériaux de toiture.

Le [Chapitre 2.4](#) décrit l'approche adoptée pour créer un moyen permettant d'avoir des données quantitatives sur la répartition des matériaux des différents éléments du toit à l'échelle urbaine. Nous définissons ainsi la notion de règles comme un moyen opérationnel d'exploitation des données existantes pour quantifier les matériaux de toitures à l'échelle urbaine.

Notons que dans cette partie, nous nous focalisons sur les étapes de la méthode qui peuvent être développées d'une façon générique indépendamment d'un terrain d'étude.

Chapitre 2.1. Emission de contaminants de l'échelle du toit à l'échelle urbaine : Problématique, données et approches adoptées

Ce chapitre est consacré à la description du développement de la méthodologie générale d'évaluation du flux annuel d'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture à l'échelle urbaine.

1. Difficulté de l'évaluation de l'émission d'un contaminant à l'échelle urbaine

A l'échelle urbaine nous nous confrontons à une diversité très importante de matériaux de couverture. La quantification des matériaux de toitures et leurs émissions à grandes échelles n'a pas fait l'objet d'études spécifiques à part certains travaux qui ont estimé, sur la base d'hypothèses grossières, l'émission de certains contaminants (Thévenot *et al.*, 2007; Gromaire *et al.*, 2011). L'émission de contaminants par les matériaux de toiture pose le problème du passage de l'échelle de la mise en œuvre d'un matériau de toiture et son émission de contaminant par temps de pluie (échelle du bâtiment) à l'échelle de l'évaluation « urbaine ». En effet, l'utilisation d'un matériau de toiture est une pratique liée au « bâtiment ».

1.1. Echelle du toit

Dans la littérature, les modèles d'émissions de contaminants par les matériaux de couvertures ont été développés à l'échelle du banc d'essai et du toit (cf. Chapitre 1.3). Ces modèles ont permis de produire des données d'émissions unitaires pour certains contaminants et certains matériaux. Les conditions expérimentales d'évaluation des émissions sont très variables et donc les valeurs d'émissions produites sont aussi différentes. En effet, pour un même matériau testé dans deux pays différents et même deux villes d'un même pays, l'émission d'un contaminant donné n'est pas forcément cohérente. Ainsi, l'émission du contaminant cuivre par le matériau cuivre neuf dans un site urbain, en Suisse, est de $0,35 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Leuenberger-Minger *et al.*, 2002) alors qu'en Italie elle est de $1,58 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (Goidanich *et*

al., 2011). Cette variabilité pose un problème majeur de représentativité des données et de leur utilisation pour l'évaluation de l'émission à grande échelle. Faut-il produire dans chaque ville ou chaque pays une donnée d'émission spécifique pour pouvoir évaluer l'émission à grande échelle ?

L'évaluation des émissions à l'échelle expérimentale fait intervenir des paramètres spécifiques à cette échelle. Nous pouvons citer sans exhaustivité les caractéristiques de la toiture (orientation, inclinaison...) et la nature du matériau. Deux questions se posent alors : *Ces paramètres interviennent-ils tous dans l'évaluation de l'émission à l'échelle urbaine ? Y-a-t-il d'autres paramètres proprement urbains dont il faut également tenir compte ?*

1.2. Echelle urbaine

Le passage à la modélisation à l'échelle urbaine fait intervenir d'autres *paramètres spécifiques à cette grande échelle*. Ces paramètres devront être identifiés et étudiés. Par exemple, un paramètre important dans la modélisation est la surface des matériaux de toiture à une échelle urbaine donnée. Or, actuellement, à l'échelle urbaine, les informations concernant les matériaux de couverture et leurs surfaces dans une zone donnée (lotissement, quartier...) n'existent pas dans les bases de données urbaines.

Il est impossible, au niveau d'une grande échelle, de traiter toutes les toitures existantes. A ce niveau, nous assistons à une hétérogénéité importante des bâtiments ainsi que leurs matériaux de toitures sur différents aspects. En effet, l'échelle urbaine est une unité urbanistique complexe, formée par des zones urbaines très variables que ce soit en termes de mode d'occupation de sol (des zones industrielles, des zones résidentielles...) ou au niveau historique. Nous avons vu dans le [Chapitre 1.2](#) que la ville évolue énormément au fil de l'histoire, ainsi que les matériaux de couverture. Cette évolution historique devra être prise en compte.

Enfin, en se confrontant à la réalité du terrain, nous ne trouvons pas de données quantifiables sur les bâtiments en fonction de leurs matériaux de toitures. Par exemple nous ne trouvons pas une base de données numérisée associant directement pour chaque bâtiment de l'échelle urbaine sa surface projetée ainsi que le matériau de sa toiture. En revanche, une méthode de reconnaissance des matériaux de toiture à partir de l'analyse spectrale des images aériennes a été développée ([Le Bris et Robert-Sainte, 2009](#)). Cette méthode a présenté des limites en termes de confusion entre certains matériaux comme l'ardoise à la lumière et le zinc. De plus,

ce type de reconnaissance automatique ne permet que de quantifier les matériaux de rampant et ne détecte pas les autres éléments du toit tel que les gouttières et les noues.

1.3. Synthèse

L'évaluation de l'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture à l'échelle urbaine pose le problème de la transition entre deux échelles complètement distinctes : une échelle élémentaire (celle du bâtiment) et une échelle globale incluant un très grand nombre de bâtiments (celle urbaine). Pour arriver à trouver une connexion entre ces deux échelles, nous avons besoin d'établir un état des lieux afin de voir si des données existantes à chaque échelle permettent d'une manière ou d'une autre d'atteindre notre objectif. Ensuite, à partir de cet état des lieux, nous essayerons d'inclure un ensemble de principes aidant à exploiter l'existant au niveau des deux échelles et d'identifier le manque d'informations que l'on cherchera à combler.

2. Identification des données

La première étape de la modélisation consiste à repérer toutes les données disponibles à l'échelle du toit et à l'échelle urbaine permettant directement ou indirectement (par réinterprétation, adaptation...) d'atteindre notre objectif de quantification des émissions de contaminants par les matériaux de toiture à l'échelle urbaine.

2.1. Echelle du toit

A l'échelle du toit nous disposons des données d'émission de certains contaminants établies dans la littérature, d'une description des matériaux des différents éléments de toit ainsi que des normes et réglementations gérant les matériaux de toiture.

2.1.1. Données d'émission de contaminants

Dans la littérature, nous disposons de données de flux unitaires d'émission de certains contaminants par divers matériaux de toiture. Ces flux ont été produits dans des conditions expérimentales bien spécifiques (cf. [Chapitre 1.3](#)). Différents paramètres influençant l'émission d'un contaminant donné par un matériau de toiture ont été identifiés. Nous pouvons citer sans exhaustivité : inclinaison et orientation de la toiture, hauteur et intensité de

la pluie, nature et géométrie de l'élément de toiture (rampant, gouttière...), caractéristiques de l'atmosphère, âge du matériau émetteur... La question qui se pose est : *Tous ces paramètres sont-ils pertinents à l'échelle urbaine ?*

Pour y répondre, il est important d'étudier les paramètres influant l'émission au niveau d'une toiture.

2.1.2. Matériaux de toiture

Une toiture fait intervenir plusieurs éléments qui sont formés par des matériaux spécifiques. L'état des lieux (cf. [Chapitre 1.1](#)) a permis d'avoir une liste opérationnelle des matériaux existants sur les différents éléments de toiture.

2.1.3. Normes et réglementations

Dans le [Chapitre 1.1](#), l'état des lieux des matériaux de couverture existants montre que ces matériaux sont régis par un cadre réglementaire bien défini. Nous distinguons des réglementations de mise en œuvre (DTU), d'autres qui interdisent la fabrication ou la commercialisation d'un matériau de toiture (comme l'interdiction de l'amiante en 1997). Des normes s'intéressent à imposer des compositions ou des caractéristiques spécifiques au matériau tels que les normes ISO (International Standard for Organisations) ou les normes AFNOR (Association française de normalisation). Ces textes réglementaires et normatifs ont permis de dresser une première liste des matériaux existants et ainsi de mieux identifier les contaminants potentiellement émis (cf. [Chapitre 1.1](#) et [Chapitre 1.3](#)).

A l'échelle du bâtiment, au niveau du projet de construction, certaines mesures sont prescrites par le client ou l'architecte pour utiliser tel matériau dans le cahier des charges défini par le maître d'ouvrage.

2.2. Echelle urbaine

Pour étudier un phénomène à une grande échelle, il est important de recenser les informations et les bases de données existantes permettant d'accéder à une donnée urbaine.

Actuellement, avec le développement des outils informatiques, nous trouvons à l'échelle urbaine des bases de données numérisées. Ces bases ont été conçues pour des objectifs précis tel que le recensement de la taille de la population (Base de l'INSEE⁴⁹), l'étude de l'évolution

⁴⁹ Institut national de la statistique et des études économiques.

économique, recensement des entreprises, des écoles, étude de l'évolution du mode d'occupation du sol...

D'autres types d'informations peuvent être exploités comme les données de marché des matériaux de couverture, les règlements d'urbanisme...

2.2.1. Base de données d'occupation du sol

Dans notre travail, les bases de données étudiant l'occupation du sol serviront comme un outil de découpage de l'échelle urbaine en zones urbaines d'occupation du sol homogènes. Ce découpage est intéressant, car il nous permet d'une part, d'avoir un groupement de bâtiments suivant une logique d'occupation du sol, et d'autre part, il permet l'accès à une donnée quantifiable qui est la surface d'une occupation du sol donnée, en particulier, le type du bâtiment.

Différentes bases d'occupation de sol ont été repérées. Chaque base sera décrite et interprétée par rapport à son utilité dans le cadre de notre travail.

A l'échelle européenne, nous disposons de la base de données CORINE Land Cover⁵⁰. C'est une base de données biophysique de l'occupation des terres. Elle présente un découpage standard du territoire hiérarchisé en 3 niveaux et 44 postes répartis selon 5 grands types d'occupation du territoire : Territoires artificialisés, Territoires agricoles, Forêts et milieux semi-naturels, Zones humides, Surfaces en eau. Cette base est disponible à l'échelle de la France. Elle fournit un découpage très large des modes d'occupation de sol et ne donne pas d'information sur les bâtiments. Par conséquent, elle ne sera pas utilisée dans notre travail.

Au niveau de la France, il existe d'autres types de base de données d'occupation du sol, à savoir :

a. Land Use Map

Base de données détaillée en 9 thèmes : Très grands Bâtiments (gratte-ciel et haute tour), Industrie et Commerce (grands bâtiments), Urbain dense (ex : centre-ville), Lotissement (ex : maisons de banlieue), Parcs (ex : espaces verts), Village (construction en milieu rural), Bâtiments denses (bâtiment sans aucun espace vert), Urbain ouvert (zone non bâtie ni espace

⁵⁰La base de données géographique CORINE Land Cover, dite CLC, est produite dans le cadre du programme européen de coordination de l'information sur l'environnement CORINE. Cet inventaire biophysique de l'occupation des terres fournit une information géographique de référence pour 38 états européens. La continuité du programme et la diffusion des données CORINE Land Cover sont pilotées par l'Agence européenne pour l'environnement. Le producteur pour la France est le Service de l'observation et des statistiques du ministère chargé de l'environnement.

<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/li/1825/1097/occupation-sols-corine-land-cover.html>

vert), Urbain Moyen (constructions distinctes). Ces thèmes sont principalement développés autour de la forme et de la localisation des constructions ainsi que des densités d'habitation. Cette base est utilisée par les Télécom pour la localisation des obstacles. La hauteur du bâti (en tant que forme) est donc prise en compte. Elle est fournie par ISTAR (Intelligence, Surveillance, Target Acquisition, and Reconnaissance). Cette base fournit une description des bâtiments selon leurs formes et leurs distributions (dense, discontinue...) dans la zone urbaine.

b. BD-Carto⁵¹

Cette base couvre tout le territoire français. Elle est structurée en sept thèmes regroupant des objets partageant une même fonctionnalité sur le terrain ou dans la base : Administratif (commune, département...), Equipement (piste aérodrome, ligne électrique...), Habillage (vigne, forêt, bâti...), Hydrographie (surface hydrographique...), Réseau ferré (voie ferrée...), Réseau routier (équipement, itinéraire...), Toponymie (zone d'habitat, massif boisé...). Cette base ne permet pas d'accéder à une donnée sur le bâtiment puisque le découpage du territoire se fait par zone de même fonctionnalité.

c. BD-TOPO

Cette base couvre tout le territoire français et elle est fournie par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). La BD-TOPO⁵² est structurée en 10 thèmes : Réseau routier (ex : voies de communication), Réseau ferroviaire (les voies ferrées, téléphériques...), Réseau de transport d'énergie (haute et très haute tension...), Réseau hydrographique (cours d'eau, réservoirs...), Bâtiments (indifférenciés, industriels et remarquables) et autres constructions, Végétation arborée, Orographie (toponymes relatifs au relief), Structure administrative (ex : communes), Points d'activité ou d'intérêt (ex : sites administratif, religieux, sportif...), Toponymes de lieux-dits.

La particularité de cette base est qu'elle permet de reproduire fidèlement la réalité du territoire par digitalisation des bâtiments. Elle permet une focalisation sur le bâti donc nous obtenons la surface projetée de chaque toiture. Cette base sera utilisée dans notre travail comme source de données quantifiable des surfaces des toitures et elle sera croisée avec une autre base d'occupation du sol plus détaillée.

⁵¹ Il s'agit de la base de données cartographique de référence de l'IGN. Elle est utilisée tant au niveau départemental qu'au niveau régional. C'est une base de données vectorielle qui contient les réseaux routiers et ferrés, les limites administratives, le réseau hydrographique, l'occupation du sol, la toponymie, les équipements divers.

⁵² <http://professionnels.ign.fr/bdtopo>

d. MOS de l'IAU-IDF⁵³

Cette base représente l'atlas cartographique informatisé de l'occupation du sol de l'Île-de-France. C'est un outil de suivi et d'analyse du territoire francilien. La base de connaissance sur le MOS est une carte interactive qui montre l'occupation du sol détaillée en 81 postes de légende. Ces 81 MOS sont les résultats de 5 niveaux hiérarchiques. Le premier niveau comporte 5 principaux thèmes : Bois ou forêt, Rural, Eau, Urbain ouvert, Urbain construit. Chaque thème est décomposé en d'autres sous-thèmes dans un deuxième niveau qui lui aussi sera décomposé jusqu'à atteindre le cinquième niveau comportant 81 MOS. Un descriptif de chaque poste apporte des renseignements précis sur la nature de l'occupation du sol (ex : bois, habitat collectif, activité, équipement de santé, transport...), illustrés par une photographie. L'avantage de cette base est, d'une part, qu'elle est très détaillée, ce qui nous permettra d'étudier l'influence du mode d'occupation du sol sur l'utilisation des matériaux de toiture. D'autre part, pour chaque MOS nous disposons de sa surface pour chaque commune.

L'analyse de ces bases montre que chacune a sa propre morphologie de représentation des spécifications de l'occupation du sol français. Nous trouvons, en fonction de l'objectif de la base, des découpages très détaillés (allant jusqu'à 81 modes d'occupation du sol) et d'autres moins détaillés (ex : 9 modes d'occupation du sol).

Par rapport à notre objectif de quantification des émissions des matériaux de toiture, ces bases ne permettent pas d'accéder directement à une information quantifiable de matériaux de toiture. Toutefois, l'utilisation de l'une de ces bases est susceptible d'être adaptée à notre travail. Ainsi, une réorganisation de l'une de ces bases de manière à obtenir de nouveaux modes d'occupation du sol ayant un même mode d'utilisation des matériaux de toiture permet un découpage homogène de l'échelle urbaine. Notre terrain d'étude étant une ville de l'Ile-de-France, et compte tenu des avantages assurés par certaines bases nous avons choisi d'exploiter les bases de données MOS de l'IAU-IDF et la BD-TOPO. Ainsi, une réorganisation de la base MOS sera effectuée avec un croisement avec la BD-TOPO pour obtenir la surface des toitures pour chaque nouveau mode d'occupation du sol.

⁵³MOS-IAU : Modes d'Occupation du Sol de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la région Ile-de-France.

2.2.2. Autres bases de données urbaines

a. *BD-PARCELLAIRE*⁵⁴

Cette base est fournie par l'IGN. Elle décrit l'information cadastrale numérique, géoréférencée et continue sur l'ensemble du territoire français. Elle est réalisée à partir de l'assemblage du plan cadastral dématérialisé. Cette base intéressante donne accès à la surface au sol d'un bâtiment et non pas à la surface projetée de la toiture. Par conséquent, elle ne sera pas exploitée dans notre travail.

b. *Base de données d'images aériennes*

Les images aériennes permettent l'identification visuelle ou par un outil de classification des matériaux utilisés sur les toits grâce à leurs radiométries ainsi que leurs surfaces projetées. Ces photos aériennes sont de plus en plus nombreuses, notamment grâce au développement récent d'outils de visualisation de la Terre qui les utilisent, en complément d'images satellites, tels que Google Earth à l'échelle mondiale ou Géoportail à l'échelle nationale. Donc, l'accès à ce type d'image est facile pour consultation ou exploitation. Les organismes qui les fournissent (l'IGN, InterAtlas qui réalise des prises de vues pour Google Earth) réalisent des mises à jour assez régulières (environ tous les 3 à 4 ans) pour une zone donnée. L'IGN dispose d'une base de données qui couvre le territoire français appelé BD-ORTHO. Cette base sera utilisée dans notre travail.

2.2.3. Autres sources d'informations

c. *Données globales liées à l'évolution temporelle des matériaux de toiture*

A l'échelle urbaine, coexistent différents types de bâtiments : des bâtiments neufs et d'autres anciens. Ce décalage temporel a des conséquences sur les matériaux présents. Dans le [Chapitre 1.1](#), nous avons vu que le *marché des matériaux de couverture* donne une idée intéressante de l'évolution de l'utilisation des différentes grandes familles de matériaux de couverture en France et en particulier en Île-de-France. Cette information donne une image récente (moins de 11 ans) de l'utilisation des matériaux de toiture et elle se limite aux matériaux de rampant. Pour avoir une image plus réaliste du patrimoine bâti, le *tableau historique* de l'évolution des matériaux de toiture établi dans le [Chapitre 1.2](#), permet d'aller plus loin dans la description des matériaux utilisés sur les différents éléments du toit (rampant, gouttière...) depuis le 19^{ème} siècle. Ainsi, le croisement de ces deux données permet d'avoir

⁵⁴ <http://professionnels.ign.fr/bdparcellaire#!prettyPhoto>

une liste temporelle des matériaux de toiture potentiellement existants à n'importe quelle échelle urbaine.

d. Données globales liées à l'évolution de l'urbanisation d'une zone urbaine

Le paysage urbain français a beaucoup évolué au cours du temps (cf. Chapitre 1.2). Nous assistons à l'apparition de nouveaux types de bâtiments, de nouvelles configurations de zones urbaines (ZUP, ZAC...). Cette évolution influence l'utilisation des matériaux de toiture. Actuellement, au niveau d'une ville, nous trouvons des données sous différents formats (cartes, documents...) décrivant l'évolution historique de l'urbanisation de la ville. L'analyse de ces données historiques permet d'identifier les processus d'urbanisation de la ville au cours du temps (les réglementations utilisées à une époque donnée, les incitations à utiliser tel matériau...). Ainsi, nous pouvons associer à chaque époque de l'urbanisation de la ville une liste des matériaux potentiellement existants.

e. Réglementations

Chaque zone urbaine (commune, ville, département...) est régie par un cadre réglementaire urbanistique bien défini. Les réglementations d'urbanisme sont décrites dans des textes spécifiques. En France nous distinguons :

- Le Règlement national d'urbanisme (RNU) : il s'agit des règles générales en matière d'utilisation du sol, en dehors de la production agricole, applicable à tout le territoire ;
- La Directive territoriale d'aménagement et de développement durables (DTADD) : c'est un document d'urbanisme regroupant des prescriptions concernant l'environnement ou l'aménagement d'une ou de plusieurs régions (une échelle suprarégionale) ;
- Le Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT) (anciennement le Schéma Directeur (SD)) : c'est un outil de conception et de mise en œuvre d'une planification intercommunale (concerne un groupement de communes) en orientant l'évolution d'un territoire dans le cadre d'un projet d'aménagement et de développement durable ;
- Le Plan Local d'Urbanisme (PLU) : c'est un document d'urbanisme qui, à l'échelle d'une commune ou d'un groupement de communes (EPCI), établit un projet global d'urbanisme et d'aménagement et fixe en conséquence les règles générales d'utilisation du sol sur le territoire considéré ;
- La carte communale : c'est un document d'urbanisme simple qui délimite les secteurs de la commune où les permis de construire peuvent être délivrés : elle permet de fixer

clairement les règles du jeu. Elle peut élargir le périmètre constructible au-delà des « parties actuellement urbanisées » ou créer de nouveaux secteurs constructibles qui ne sont pas obligatoirement situés en continuité de l'urbanisation existante. Elle peut aussi réserver des secteurs destinés à l'implantation d'activités industrielles ou artisanales.

En Île-de-France, le Schéma Directeur de la Région Île-de-France (SDRIF) s'appuie sur le socle du projet voté en 2008, fruit d'un large consensus et précurseur en matière d'aménagement durable, que les évolutions législatives amenées par les lois Grenelle, la loi du Grand Paris et la loi du 15 juin 2011 ont conduit à mettre en révision.

Dans ces textes, il est possible d'autoriser/préconiser ou même interdire l'utilisation d'un matériau de couverture. Donc, dans la zone d'étude, il est important d'identifier les réglementations concernant l'utilisation des matériaux de toiture. Ce type d'information aidera à avoir une première liste des matériaux potentiellement existants.

3. Méthodes et principes

Pour résoudre notre problématique, nous avons besoin d'adapter les données existantes à notre objectif. Une méthodologie d'exploitation de ces différents types de données sera développée. Pour cela, plusieurs opérations ont été effectuées sur la base d'un ensemble de principes.

3.1. Exploitation des données au niveau du toit

Tout d'abord, une étude à l'échelle du toit du phénomène d'émission d'un contaminant donné devra être élaborée. Il s'agit d'identifier les différents paramètres influençant l'émission à l'échelle du toit quel que soit le type de contaminant. Cette étude nous permettra d'identifier les paramètres qui devront être retenus à l'échelle urbaine. *A priori*, nous distinguons comme paramètres : la surface ou la longueur de l'élément du toit (gouttière, noue...), l'âge et le type du matériau émetteur de contaminants. A ces paramètres s'ajoutent les données d'émissions de contaminants produites à l'échelle du toit (cf. [Chapitre 1.3](#)). Nous avons ainsi défini *la notion de situation-type d'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture à l'échelle du toit* comme un cas élémentaire d'émission d'un contaminant caractérisé par son

appartenance à un matériau et sa localisation sur le toit. A chaque situation-type est associé un flux unitaire annuel unique d'émission d'un contaminant.

3.2. Exploitation des données au niveau de l'échelle urbaine

Le passage à l'échelle urbaine est basé tout d'abord sur une étude des paramètres influençant la quantification à cette échelle. Ensuite, une exploitation et une adaptation des bases de données existantes sera effectuée par :

- Création de nouvelles typologies de bâtiments appelées « classes de bâtiments » ;
- Création d'un filtre historique des matériaux de toiture dans une zone urbaine donnée ;
- Découpage de l'échelle urbaine en entités urbaines plus petites ;

3.2.1. Etude des paramètres influençant la quantification à l'échelle urbaine

L'évaluation de l'émission d'un contaminant à l'échelle urbaine fait intervenir de nouveaux paramètres, différents de ceux identifiés à l'échelle de la toiture. En effet, l'échelle urbaine a ses propres caractéristiques (taille, surface, nombre de bâtiments, histoire...) dont certains devront être pris en compte dans le modèle d'évaluation du flux de contaminants. L'identification de ces paramètres se fait par une étude et une interprétation des documents décrivant l'échelle urbaine. Il s'agit des documents d'urbanisme, de l'histoire de l'échelle urbaine, des réglementations...

3.2.2. Création de typologies de bâtiments appelées « classes de bâtiments » pour passer de l'échelle du bâtiment à l'échelle urbaine

Les bases de données de mode d'occupation du sol existantes à l'échelle urbaine ne permettent pas d'accéder à une information quantitative des surfaces ou longueurs des matériaux de toiture. L'avantage de ces bases est qu'elles permettent de grouper un nombre de bâtiments sous une logique de typologie de bâtiments. Il s'agit d'une première étape de passage de l'échelle de bâtiment à l'échelle d'un groupement de bâtiment et la totalité des groupes de bâtiments forme l'échelle urbaine.

Les bases ont un même objectif d'étude d'occupation du sol mais sont très différentes dans leurs conceptions d'un mode d'occupation du sol donné. Pour atteindre notre objectif il est important d'exploiter ces bases en définissant des modes d'occupation du sol par rapport à notre travail. Il s'agit de définir de nouvelles typologies de bâtiments par rapport à l'utilisation

des matériaux de toiture. L'utilité de ce travail est qu'il nous permet un gain temporel et stratégique. Par exemple, si l'on prend la typologie des habitats individuels, nous savons, d'après les études de marché, que les tuiles sont les matériaux de toiture les plus utilisés. Donc, dans notre cas d'étude, nous introduirons une typologie de « classes de bâtiments » correspondant à un ensemble de bâtiments présentant un mode spécifique d'utilisation des matériaux de toiture. Par exemple la classe habitat individuel est caractérisée par des toitures majoritairement en tuile. La définition des nouvelles classes de bâtiments adéquates devra être effectuée à partir d'une réorganisation d'une base de données de mode d'occupation du sol et à l'aide d'un ensemble de critères bien définis. Il s'agit de réorganiser la base MOS de l'IAU-IDF (choisie précédemment) de manière à ressortir des classes de bâtiment en regroupant les MOS ayant le même mode d'utilisation des matériaux de couverture. L'idée sera d'attribuer une répartition spécifique des matériaux de toiture par classe de bâtiments.

3.2.3. Création d'un filtre historique des matériaux de toiture dans une zone urbaine donnée

L'histoire des matériaux de couverture permet de dater l'apparition et la disparition d'un matériau donné ainsi que l'évolution de ses caractéristiques (ex : changement de composition). De plus, l'évolution de l'urbanisation d'une zone urbaine donnée permet d'identifier par époque historique les tendances architecturales ainsi que les réglementations en matière de matériaux de toiture.

Le croisement de ces différentes données (histoire des matériaux, histoire de l'urbanisation de d'une zone donnée et réglementations associées) permet de créer un filtre historique des matériaux de toiture. En d'autres termes, pour une époque historique donnée, nous pouvons associer une liste des matériaux potentiellement utilisés dans la zone d'étude. Ce type de croisement permet aussi de dater les matériaux de toiture et identifier les pratiques de renouvellement par ajout des données sur la durée de vie des matériaux de couvertures.

L'objectif sera donc de définir des périodes historiques croisant les différentes informations.

3.2.4. Découpage de l'échelle urbaine en entités urbaines plus petites

Ce travail de découpage permet de réduire l'échelle urbaine en sous échelles permettant de mieux quantifier les matériaux de toiture. Par exemple, les différentes classes de bâtiments croisées avec les zones historiques permettent d'obtenir des entités homogènes formées par une classe de bâtiments localisée historiquement. Dans chaque entité nous obtenons un

groupement de bâtiments ayant le même mode d'utilisation des matériaux de toiture par période historique.

3.3. Méthodes de quantification

Le croisement des données précédemment décrites ne permet pas d'accéder à une information quantifiable des matériaux de toiture ainsi que leurs surfaces/longueurs à l'échelle urbaine. Pour combler ce manque nous aurons donc recours à d'autres moyens : le développement d'une méthode statistique, l'application d'une méthode de traitement d'images et l'organisation d'entretiens et d'une enquête de terrain. Il s'agit de méthodes de nature très différente.

3.3.1. Méthode statistique

La grande échelle est caractérisée par un très grand nombre de bâtiments. Il est alors impossible de quantifier pour chaque matériau la surface de toiture correspondante en procédant toit par toit. C'est pourquoi nous avons développé une méthode statistique basée sur l'échantillonnage. Il s'agit de choisir le plus petit échantillon de bâtiments représentatif de tous les bâtiments de l'échelle urbaine en assurant une erreur fixée *a priori*. Cette méthode est croisée avec l'interprétation visuelle des matériaux de toiture de l'échantillon retenu à partir des images aériennes.

3.3.2. Méthode de traitement d'images

Cette méthode permet de quantifier les matériaux de rampant à l'aide d'un outil de classification des images aériennes. Cette méthode déjà existante servira comme une première forme de validation en termes d'ordres de grandeur de notre nouvelle approche statistique. En d'autres termes, il s'agit de comparer les résultats de ces deux méthodes appliquées dans les mêmes conditions. En effet, la méthode de traitement d'image présente beaucoup de limites. Par exemple, des confusions entre certains matériaux sont apparues (ex : zinc et ardoise au soleil), l'âge du matériau est non identifié et les autres éléments de toit (gouttière, noue...) ne sont pas repérés.

3.3.3. Entretiens et enquêtes de terrain

Cette méthode appliquée au niveau du terrain (l'échelle urbaine) permet, d'une part, d'identifier les sources d'informations sur les matériaux de toitures disponibles à l'échelle

urbaine et, d'autre part, de comprendre les différents processus intervenant à l'échelle urbaine et influençant l'utilisation des matériaux de toiture.

Des entretiens et une enquête auprès d'experts et de professionnels du domaine de la couverture (syndicat, artisan, architecte...) ont été effectués permettant d'étudier les processus de choix et d'utilisation des matériaux de couverture.

3.4. Principes

Comme avancé, notre méthode est basée sur l'exploitation et l'adaptation des données urbaines identifiées. Pour mener ce travail, nous avons besoin d'effectuer un certain nombre d'opérations basées sur des principes (regroupement, découpage, croisement, hiérarchisation et majoration). Un nouveau principe méthodologique a été développé basé sur la définition de règles de quantification des matériaux de toiture à l'échelle urbaine.

Ces principes sont introduits pour permettre d'obtenir un résultat quantitatif du flux d'émission d'un contaminant à l'échelle urbaine.

3.4.1. Principes intervenant dans les opérations de calcul

a. Principe de regroupement

Il s'agit de rassembler les bâtiments partageant une caractéristique intéressante au regard de notre problématique et permettant un traitement commun. Nous distinguons un regroupement par rapport à l'utilisation des matériaux de toiture et un regroupement par rapport à une période historique.

b. Principe de découpage

L'échelle urbaine étant très grande, nous l'avons alors découpée en petites entités selon un ensemble de critères. Par exemple, l'échelle urbaine est découpée en zones historiques. Chaque zone a des matériaux potentiellement présents correspondant à l'époque de construction.

c. Principe de croisement

Il s'agit de croiser des informations ou des bases de données de natures différentes pour mieux appréhender les matériaux de toiture à l'échelle urbaine. Dans notre étude nous avons croisé la base des classes de bâtiments avec la base BD-TOPO pour obtenir les surfaces de toiture pour chaque classe. Le croisement des données historiques (histoire des matériaux,

histoire de l'urbanisation d'une zone donnée et ses réglementations associées) avec la base de classes de bâtiments permet d'une part de dater les matériaux de couverture et, d'autre part, de mieux appréhender la répartition des matériaux par classe de bâtiments et zone historique.

d. Principe de hiérarchisation

Il s'agit d'effectuer un choix des données ou des tâches les plus importantes dans le but d'optimiser le temps de calcul. Par exemple, nous avons négligé les classes de bâtiments qui représentent moins de 5% en cumul de leurs surfaces de la surface totale des toitures de l'échelle urbaine.

e. Principe de majoration

En cas de manque de données, nous retenons une hypothèse correspondant à un majorant du flux émis tout en respectant l'objectif du travail. Par exemple, si nous ne pouvons pas trancher sur la répartition de matériaux de gouttière d'une zone donnée, alors nous pouvons utiliser le principe de majoration. Ainsi, si notre objectif est d'évaluer l'émission du cuivre et dans une zone donnée et que nous doutons sur la répartition entre cuivre et PVC, nous affectons alors une répartition majorant de 95% pour le cuivre contre 5% pour le PVC.

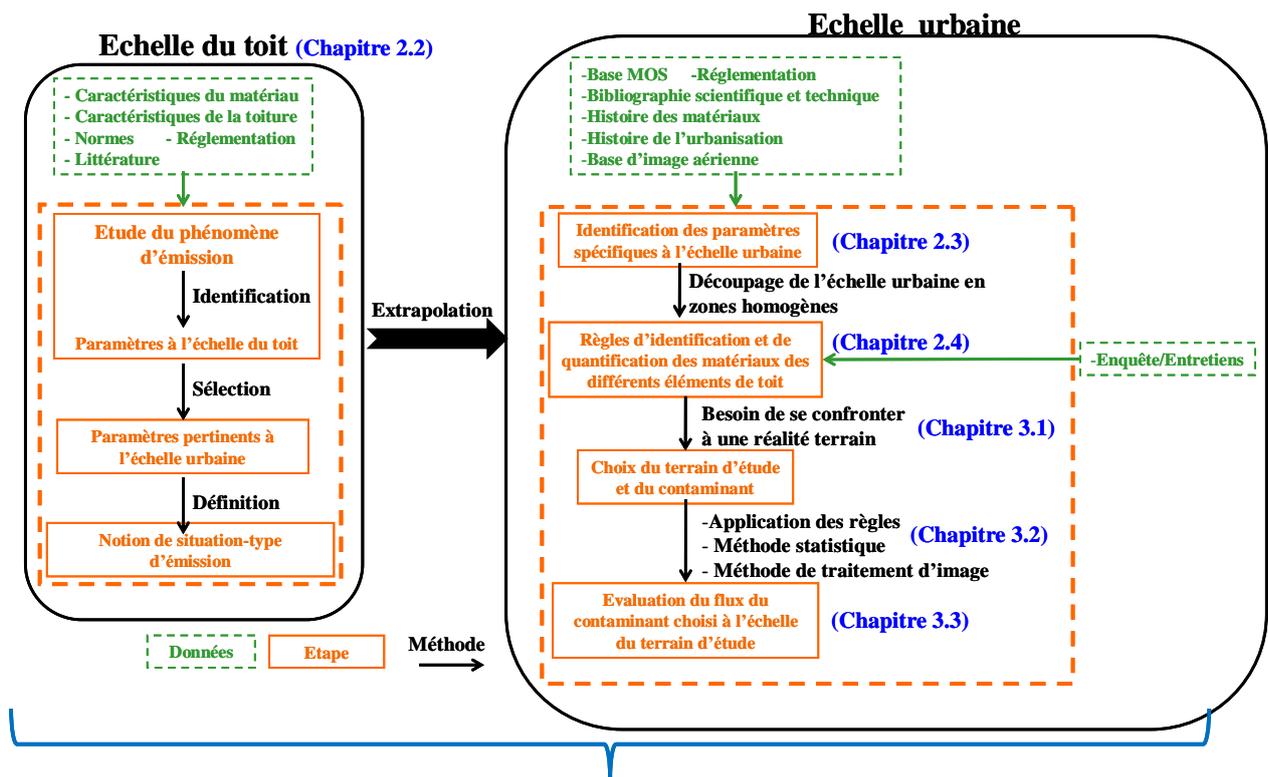
3.4.2. Définition des règles de quantification des matériaux de toiture à l'échelle urbaine

Pour avoir des valeurs quantifiables des matériaux de toiture à l'échelle urbaine nous avons défini un ensemble de règles. Ces règles ont été établies à partir des enquêtes décrites précédemment et d'un travail bibliographique. L'originalité de ce travail est qu'il a permis de faire ressortir, à partir des données qualitatives, des informations quantifiables. Par exemple, depuis 2005 la répartition des matériaux de gouttières est équiprobable entre zinc naturel, PVC et aluminium prélaqué. En France, pour les bâtiments construits entre 2000 et 2011 les toitures en ardoises sont réparties entre 71,75% d'ardoise naturelle contre 28,25% d'ardoise en fibres ciment. (MSI, 2006 ; MSI, 2012).

Ces différents principes seront utilisés et signalés au fur et à mesure du développement de la méthode d'évaluation des émissions de contaminants par les matériaux de toitures.

4. Synthèse

La [Figure 64](#) résume la méthodologie employée pour développer la méthode d'évaluation des flux de contaminants issus du ruissellement des matériaux de toitures à l'échelle urbaine. La méthodologie est basée sur une première étape d'étude du phénomène d'émission à l'échelle du toit permettant l'identification des paramètres pertinents à l'échelle urbaine. Ce travail a permis de définir une nouvelle notion appelée « situation-type d'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture » ([cf. Chapitre 2.2](#)). La deuxième étape consiste à définir les paramètres spécifiques à l'échelle urbaine et de proposer un découpage de cette échelle en zones homogènes en termes de répartition propre des matériaux de toiture ([cf. Chapitre 2.3](#)). Ensuite, des règles d'identification et de quantification des matériaux des différents éléments du toit seront développées ([cf. Chapitre 2.4](#)). L'aboutissement de la définition de la méthode se fera à travers un terrain d'étude et un contaminant bien défini qui permettront d'explicitier l'ensemble des tâches à mener ([cf. Chapitre 3.1](#)). Une approche statistique de quantification des matériaux des différents éléments du toit à l'échelle urbaine sera développée ([cf. Chapitre 3.2](#)) à travers le terrain d'étude. Une évaluation du flux total d'émission du contaminant en question pour le terrain d'étude considéré sera effectuée ([cf. Chapitre 3.3](#)). Enfin, un cahier des charges générique de la méthode (applicable à tout terrain d'étude et tout contaminant) sera élaboré ([cf. Chapitre 3.4](#)).



Méthode générale d'évaluation du flux de contaminants issu du ruissellement des matériaux de toitures à l'échelle urbaine

Figure 64 : Schéma de la méthodologie employée pour développer la méthode d'évaluation des flux de contaminants issus du ruissellement des matériaux de toitures à l'échelle urbaine

Chapitre 2.2. Identification des paramètres d'émission de toiture pertinents à l'échelle urbaine : la notion de situation-type

L'évaluation de l'émission d'un contaminant donné à l'échelle urbaine ne peut pas être directe, il faut avoir une vision de ce qui se passe à petites échelles en particulier au niveau de la toiture.

Dans ce chapitre, nous allons, tout d'abord, construire une stratégie basée sur, d'une part, la description du phénomène d'émission d'un contaminant donné et, d'autre part, la description de la toiture en fonction de ses éléments constitutifs : rampant, éléments d'étanchéité (arêtier, brisure, faîtage, noue, rive, étanchéité lucarne...), les éléments d'évacuation des eaux de pluie (égout, gouttière et chenaux, descente) et les accessoires. Pour chacun de ces éléments, les matériaux qu'il est possible de mettre en œuvre sont identifiés. Il s'agit de répondre aux questions suivantes : Quels sont les phénomènes induisant l'émission ? Quels contaminants sont émis ? Sous quelle forme sont présents ces contaminants au sein d'un matériau de couverture ?

Ensuite, à partir de cette étude nous allons identifier les différents paramètres influençant l'émission d'un contaminant donné à petite échelle. En outre, l'analyse et l'interprétation de ces paramètres nous permettra d'identifier ceux qui devront être pris en compte à l'échelle urbaine. Il s'agit de créer un moyen de passer de l'échelle du toit à celle urbaine. Pour ce faire, nous introduirons une nouvelle notion appelée *situation-type d'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture à l'échelle du toit* à laquelle est associé un flux unitaire unique d'émission d'un contaminant. Cette notion sera décrite et illustrée par des exemples. Enfin, l'équation du flux global d'émission d'un contaminant à l'échelle urbaine sera définie comme la somme de toutes les situations-types d'émission de ce contaminant.

1. Emission d'un contaminant par un matériau au niveau d'une toiture

L'étude d'émission de contaminants par les matériaux de toiture à petites échelles a été abordée dans beaucoup de travaux (cf. Chapitre 1.3). Différentes molécules ont été étudiées. Nous pouvons citer sans exhaustivité les molécules métalliques telles que le zinc, cuivre et plomb (Robert-Sainte *et al.*, 2009), les molécules non métalliques telles que les biocides (ex : benzalkonium (Van de Voorde *et al.*, 2012)), les HAP (Lamprea, 2009)...

L'objectif de ce paragraphe est d'identifier les différents paramètres influençant l'émission quelque soit le type de molécule émise.

1.1. Processus engagés dans l'émission

L'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture dépend à la fois du stock de polluants disponible sur les surfaces de matériaux au début de la pluie, et des caractéristiques des événements qui influent également sur la quantité du contaminant érodée ou lessivée des toitures pendant la pluie. Deux phénomènes se produisent à l'échelle du toit : *le processus de formation* du stock de contaminants par temps sec et *le processus de mobilisation* de ce stock par temps de pluie.

Nous distinguons des processus liés aux contaminants métalliques et d'autres liés aux contaminants non métalliques. Dans la suite, nous allons décrire brièvement quelques processus d'émission pour quelques exemples de contaminants. En effet, la description de ces phénomènes est très complexe et nécessite un travail très minutieux et qui n'est pas l'objet de notre thèse. L'objectif de ce travail est d'identifier les différents paramètres influençant l'émission à l'échelle du toit.

1.1.1. Processus de formation

Généralement le stock disponible sur la surface émettrice est d'origine diverse (Gromaire-Mertz, 1998) : retombées atmosphériques sèches, déchets rejetés par l'homme, animaux, végétation et en particulier le matériau de toiture. Le stock issu des matériaux de toiture est formé suivant des conditions particulières et en fonction du type de matériau (métallique ou non métallique).

a. Cas des contaminants métalliques

D'après le [Chapitre 1.3](#), les contaminants métalliques peuvent être émis par les matériaux métalliques (ex : acier) ou les matériaux non métalliques (ex : tuile). Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à décrire l'émission par les matériaux métalliques qui a été bien étudiée dans la littérature.

Les processus d'émissions de contaminants métalliques par les matériaux métalliques sont schématisés dans la [Figure 65](#). Pour les métaux lourds (ex : zinc, plomb) la formation du stock est liée essentiellement au phénomène de corrosion. Du point de vue de l'ingénieur, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés par réaction chimique avec l'environnement. Elle est donc, un phénomène nuisible entraînant des modifications dommageables pour les propriétés d'emploi d'un métal ([Landolt, 2003](#)).

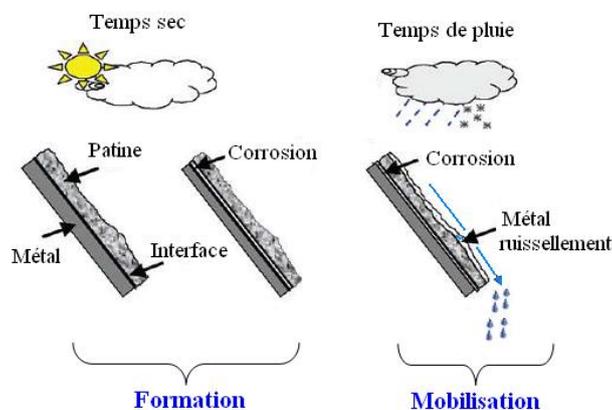


Figure 65 : Phénomènes de formation et de mobilisation de contaminants métalliques (Robert-Sainte, 2009)

Dans le bâtiment, la corrosion atmosphérique est la première cause de dégradation des matériaux. Elle désigne la réaction d'un métal avec l'oxygène de l'air sous les conditions atmosphériques (humidité, pollution...) à des températures naturelles ([Landolt, 2003](#)). L'eau atmosphérique (plus au moins polluée) et l'oxygène sont les deux constituants de base à l'origine du phénomène de corrosion. La corrosion atmosphérique est classée en trois types suivant le degré d'humidité de l'atmosphère ([Cresson et al., 1998](#)) :

- Corrosion sèche (l'humidité relative est faible, l'oxydation est très lente avec la formation d'un film d'oxyde très fin) ;
- Corrosion humide (elle se manifeste lorsque le taux d'humidité relative est supérieur à 60%) ;
- Corrosion aqueuse (mouillée) (par temps de pluie, un film d'eau se forme à la surface des matériaux, jouant le rôle d'électrolyte).

La composition de l'atmosphère et ses conditions, jouent un rôle très important dans la formation des produits de corrosion. En effet, la corrosion diffère d'un milieu à un autre (urbain, rural...) et de la nature de la pollution y régnant. La corrosivité de l'atmosphère est étroitement liée à différents facteurs (Robert-Sainte, 2009) : l'humidité, les polluants atmosphériques tels que le SO₂, les NO_x, l'O₃ ou différents sels, notamment les chlorures, qui tendent à acidifier le milieu et la pluie, augmentant les attaques vis-à-vis des matériaux. En particulier, SO₂ est un polluant important du fait de son rôle de catalyseur. En effet, la réduction du SO₂ étant plus facile thermodynamiquement que la réduction du O₂ de l'air, la corrosion se trouve accélérée.

La mesure du taux de corrosion est définie par l'épaisseur ou la quantité de métal corrodé (exprimé en $\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ ou en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$). La corrosion a lieu à l'interface métal/patine. En général, le taux de corrosion diminue avec le temps et l'augmentation de l'épaisseur de la couche de protection (Cone Schiopu, 2007).

b. Cas des contaminants non métalliques

Les contaminants non métalliques peuvent être aussi émis par des matériaux métalliques mais ils sont principalement émis par les matériaux non métalliques (cf. Chapitre 1.3).

Nous distinguons, sans exhaustivité, des contaminants appartenant à la composition du matériau ou produits par dégradation d'un composé du matériau (ex : mécoprop produit par hydrolyse d'un agent antiracinaire incorporé aux matériaux bitumineux utilisés pour la construction des toits-terrasses (Bucheli *et al.*, 1998)), des contaminants rapportés en surface (ex : benzalkonium un biocide épandue sur les tuiles pour démoussage (Van de Voorde *et al.*, 2012)) et enfin des contaminants introduits dans les peintures de façade. Les biocides tels que diuron, la terbutryne, et la carbendazime sont des additifs dans les peintures et les crépis permettant protéger les matériaux contre la dégradation par certains organismes tels que les microbes et les moisissures (Schoknecht *et al.*, 2009; Burkhardt *et al.*, 2011).

Pour les contaminants non métalliques, les processus de formation dépendent de la nature de la molécule étudiée et de son apport dans le matériau. Le stock de contaminants émissibles en surface est également conditionné par les processus de dégradation et les processus de diffusion du contaminant au sein du matériau. Par exemple, l'étude de la lixiviation des biocides par le bois montre que la dynamique d'émission est déterminée par les processus de diffusion à l'intérieur du système de pores du bois ainsi que des processus de pertes par dégradation (chimiques, physiques ou biologiques) (Lupsia *et al.*, 2013 ; Tiruta-Barna *et Schiopu*, 2011).

Prenant le cas du benzalkonium, son stock émissile est formé par épandage du produit d'entretien sur une toiture en tuile (Van de Voorde, 2012). L'épandage du produit crée plusieurs stocks ainsi que des pertes. Les pertes peuvent être issues de l'envol de microgouttelettes de produit lors de l'aspersion, renforcées en cas de vent, ou être liées au ruissellement du produit pour un épandage jusqu'à saturation du matériau. Les différents stocks créés se différencient par leur localisation par rapport au matériau. Une fraction des stocks est présente en surface de la tuile, au sein des particules et des végétaux de surface, sous forme de dépôts non liés au matériau ou encore sous forme d'une masse adsorbée⁵⁵ immédiatement à la surface. Ces stocks sont très disponibles à l'eau de ruissellement. Ils pourront donc être rapidement mobilisés. Le dernier stock correspond au benzalkonium qui a pénétré profondément dans les pores du matériau. Cette masse n'est donc pas immédiatement mobilisable lors du ruissellement. Par ailleurs, la migration du produit dans le matériau engendre un gradient de concentration, la surface étant beaucoup plus concentrée qu'en profondeur.

Différents paramètres influencent la formation du stock : les conditions d'épandage (volume et concentration du produit, conditions météorologiques), la nature du matériau traité (tuile béton ou tuile en terre cuite), l'affinité du matériau pour le benzalkonium, le comportement hydrique du matériau (perméabilité de la surface, capacité d'absorption capillaire) et l'état des tuiles (niveau de salissure, colonisation de la surface, état d'humidité, âge).

1.1.2. Processus de mobilisation du stock formé

La mobilisation des contaminants des toitures est effectuée par le phénomène de *ruissellement*. Ce phénomène désigne en hydrologie l'écoulement des eaux à la surface des toitures. Le ruissellement est un des moteurs de l'érosion : l'eau qui s'écoule entraîne avec elle des particules plus ou moins grosses en fonction de la quantité d'eau en mouvement et de la pente, ce qui peut avoir un effet abrasif sur la surface soumise au ruissellement.

L'importance de la pollution issue du lessivage des surfaces des toitures dépend (Gromaire-Mertz, 1998) :

- du stock de polluant disponible sur les surfaces en début de pluie ;
- de la quantité de polluant mobilisée par l'écoulement d'eau de pluie.

⁵⁵ L'adsorption est le processus de fixation des atomes ou des molécules de gaz ou de liquides (adsorbats) sur une surface solide (adsorbant) selon divers processus.

Plusieurs phénomènes peuvent induire le relargage d'un contaminant tels que : la dissolution, l'érosion, la désorption⁵⁶, la diffusion du stock de contaminant émissible.

c. Cas des contaminants métalliques émis par les matériaux métalliques

Pour les matériaux métalliques, le ruissellement (également appelé « relargage ») représente la partie des produits de corrosion qui est arrachée de la surface (par différents processus : dissolution, érosion...), par l'eau qui s'écoule sur le matériau par temps de pluie (Karlen *et al.*, 2001; Odnevall Wallinder *et al.*, 2004). Le ruissellement a donc lieu à l'interface entre les produits de corrosion formant la couche de patine et l'atmosphère (cf. Figure 65).

L'importance du phénomène de ruissellement est évaluée à travers la mesure du taux de ruissellement (exprimé en $\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ ou en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$) qui représente la quantité ou l'épaisseur de métal corrodé ayant été décrochée de la surface par l'eau de pluie pendant une durée donnée. Ce taux est donc systématiquement inférieur au taux de corrosion. Par exemple, le taux ruissellement du cuivre ne représente que 20% du taux de corrosion (He *et al.*, 2001a). Au-delà, les deux s'équilibrent et il peut y avoir des périodes au cours de lesquelles le taux de ruissellement est supérieur au taux de corrosion, ce qui fait que l'épaisseur de la patine diminue (He *et al.*, 2001a).

Plusieurs facteurs ont un rôle fondamental sur le taux de ruissellement. Parmi ceux-ci, nous trouvons plus particulièrement (Odnevall Wallinder *et al.*, 1998; Odnevall Wallinder *et al.*, 2000; Mouyon, 2001; He *et al.*, 2001a; He *et al.*, 2001b; Robert-Sainte *et al.*, 2008; Robert-Sainte, 2009; Van de Voorde *et al.*, 2010) : durée de la précipitation, caractéristiques des matériaux (type de matériau, âge du matériau), les conditions de mise en œuvre (inclinaison, orientation), caractéristiques du temps sec, caractéristiques de la pluie (quantité, pH, intensité, durée).

d. Cas des contaminants non métalliques émis par les matériaux non métalliques

Les processus de mobilisation seront illustrés pour deux molécules : le benzalkonium et le mécoprop.

- Pour le benzalkonium, les stocks formés en surface de la tuile et ceux fixés sur les végétaux ou les poussières vont être lessivés soit (Van de Voorde *et al.*, 2012) : par

⁵⁶ La désorption est la transformation inverse de la sorption, par laquelle les molécules sorbées se détachent du substrat.

érosion par l'impact des gouttes d'eau, qui dépendra donc de l'énergie cinétique des gouttes en lien avec l'intensité de la pluie ;

- par entraînement des particules par la lame d'eau, qui va dépendre de l'épaisseur de la lame d'eau et de la vitesse d'écoulement. L'intensité de pluie jouera donc un rôle ainsi que certains paramètres liés à la toiture (pente, longueur d'écoulement, forme et état de surface des tuiles) ;
- par des phénomènes de dissolution et de désorption, ainsi que des processus de diffusion, qui vont dépendre du temps de contact avec l'eau (donc de la durée de la pluie et de la hauteur d'eau précipitée).

Pour le mécoprop, il est libéré par hydrolyse des esters utilisés comme agents anti-racines dans les bitumes. Les principaux facteurs qui régissent la libération du mécoprop sont le type de membranes bitumineuses, la durée de contact avec l'eau de pluie et la quantité de l'herbicide utilisé dans le matériau (Bucheli *et al.*, 1998; Eawag, 2009; Burkhardt *et al.*, 2011).

1.2. Paramètres influençant l'émission

Dans ce paragraphe nous allons résumer les différents paramètres influençant l'émission de contaminants à l'échelle du toit. Ces paramètres n'interviennent pas tous obligatoirement dans l'émission d'un contaminant donné. Le nombre de paramètres varie d'un contaminant à un autre. Toutefois, quel que soit le processus d'émissions à l'échelle du toit et quel que soit le contaminant, les paramètres peuvent être résumés et classés en paramètres liés au matériau, des paramètres liés à la toiture, des paramètres liés aux conditions d'exposition et les propriétés physico-chimiques des contaminants.

1.2.1. Paramètres liés au matériau

Il s'agit des caractéristiques spécifiques au matériau. Nous distinguons :

a. Composition

Aujourd'hui la composition de certains matériaux est régie par des normes spécifiques telles la norme NF-EN 1304 pour la terre cuite, la norme NF EN 508 / 505 pour l'acier prélaqué, la norme NF EN 501 / 506 pour le zinc prépatiné (cf. Chapitre 1.3), etc.

Pour un même contaminant présent dans deux matériaux différents et avec deux proportions différentes, son émission ne sera pas la même. Pour les matériaux métalliques nous trouvons

différents types d'alliages et donc des proportions de contaminants très variables. Pour les matériaux non métalliques nous pouvons trouver des contaminants en de très faibles proportions rajoutés pour assurer une propriété spécifique. Par exemple, l'émission du plomb par les matériaux en plomb est plus importante que celle par le PVC où le plomb est rajouté en petites quantités pour stabiliser le PVC. Les stabilisants comme les phtalates sont aussi des contaminants rajoutés aux matériaux plastiques.

b. Les traitements de surface

Certains matériaux subissent durant les procédés de fabrication des traitements de surface tels que le prépatinage, le prélaquage, une peinture... Ces traitements influencent l'émission de contaminants. Par exemple, le prépatinage du zinc, par un traitement de phosphatation, donne lieu à de nouveaux matériaux (ex : anthra-zinc, quartz-zinc) moins émissifs que le zinc naturel (Odnevall Wallinder *et al.*, 2001; Bertling *et al.*, 2006). En outre, pour un matériau peint (ex : acier laqué) la présence d'une couche protectrice de peinture limite fondamentalement les émissions du contaminant par le matériau. En effet, la barrière créée par la peinture est réellement physique, elle isole complètement le matériau de l'atmosphère, en limitant par exemple le phénomène de corrosion métallique (Odnevall Wallinder *et al.*, 2001; Bertling *et al.*, 2006). Par contre, cette couche de peinture peut être à l'origine de l'émission de nouveaux contaminants. Il s'agit du cas de l'émission de biocides par les peintures (Jungnickel *et al.*, 2008).

c. Rugosité

Plus le matériau est rugueux plus il retient les particules telles que les poussières provenant de l'atmosphère (dépôt sec). Les matériaux ayant subi un traitement de surface (ex : anthra-zinc) présentent les surfaces les plus rugueuses. Les matériaux en plomb, ainsi que le zinc présentent une rugosité importante. Donc, une rugosité importante peut conduire à un piégeage privilégié à la fois de l'eau de ruissellement, pouvant occasionner des temps de mouillage plus longs et donc une corrosion plus rapide et des particules atmosphériques qui peuvent être entraînées dans les eaux de ruissellement et dont la présence peut être abusivement imputée aux matériaux (Robert-Sainte, 2009).

d. Age du matériau

Pour un même matériau l'émission d'un contaminant donné dépend de son âge (Odnevall Wallinder *et al.*, 1998). Par exemple, l'émission du contaminant cuivre par les feuilles en cuivre âgées de 40 ans ($2,1 \text{ g.m}^{-2}\text{an}^{-1}$) est supérieure à celle des feuilles de cuivre neuf ($1,3$

$\text{g.m}^{-2}\text{an}^{-1}$) (He *et al.*, 2001a). Pour les peintures contenant des biocides, l'émission d'un biocide diminue d'une année à une autre à cause du stock limité de biocides initialement présent dans la peinture (Jungnickel *et al.*, 2008; Burkhardt *et al.*, 2011).

1.2.2. Paramètres liés à la mise en œuvre de la toiture

Il s'agit de toutes les spécificités d'une toiture en termes de ses caractéristiques géométriques (inclinaison, dimension, orientation) et ses composantes (gouttière, noue...).

a. Inclinaison

Pour les matériaux métalliques, une étude menée pour plusieurs inclinaisons de panneaux en zinc (7, 45 et 90°) en conditions réelles a montré que plus le panneau est incliné, plus l'émission du zinc est faible par m^2 de matériau mis en œuvre (Odnevall Wallinder *et al.*, 2000). Cet écart s'explique par la différence de volume de pluie capté par le panneau. Néanmoins, en considérant la surface projetée de la toiture les effets de l'inclinaison s'estompent (cf. Paragraphe 1.3).

b. Orientation

L'orientation du toit dicte la quantité de pluie qu'il va recevoir. En effet, la direction du vent non verticale implique que des volumes plus ou moins importants sont captés par les faces d'un toit, en fonction de son orientation. Une étude sur les matériaux en cuivre et en zinc a montré que le relargage de contaminant est significativement plus important pour les matériaux orientés face au vent dominant (Odnevall Wallinder *et al.*, 2000).

c. Élément de toiture

Lors d'un événement pluvieux, les éléments de toitures rentrent en contact avec l'eau (cf. Figure 66). Chaque élément de toit a une forme, des caractéristiques spécifiques et un emplacement particulier sur la toiture. De ce fait, le mode de contact et le volume d'eau de pluie reçu par un élément de toit donné va être spécifique ce qui influence le flux du contaminant émis. Ceci est confirmé dans les travaux effectués dans OPUR qui ont montré (Robert-Sainte *et al.*, 2007) que pour un même matériau mis en œuvre sur différents éléments de toit (rampant, gouttière) dans les mêmes conditions expérimentales, le flux d'émission n'est pas le même. Par exemple, le flux d'émission du zinc par un rampant en zinc ($3,87 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) est supérieur à celui émis par une gouttière en zinc ($1,65 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) (Robert-Sainte *et al.*, 2009). De plus, le flux d'émission du plomb par une rive contre mur en plomb ($0,88$

$\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) est très inférieur à celui émis par un rampant en plomb ($5,23 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) (Wilson, 2003). Cette différence est due à l'emplacement de la rive et l'effet de l'abri.

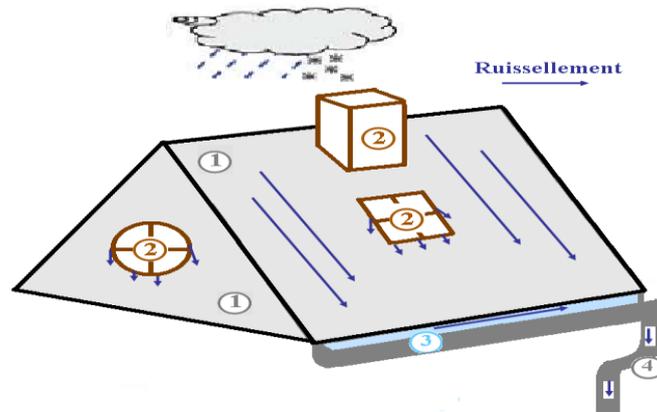


Figure 66 : Schéma simplifié de certains éléments de toit entrant en contact avec l'eau : 1) rampant ; 2) éléments d'étanchéité fenêtrés et cheminés ; 3) gouttière ; 4) descente

d. Dimension

Il s'agit de la surface ou la longueur du matériau employée sur un élément de toit qui est en contact avec l'eau de pluie. Ce paramètre permet de quantifier l'émission de contaminant. En effet, les mesures de taux de ruissellement sont exprimées en $\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. De plus nous avons montré que l'émission des contaminants métalliques dépend de la surface projetée (en m^2) de matériau mis en œuvre (Odnevall Wallinder *et al.*, 2000).

1.2.3. Paramètres liés aux conditions d'exposition

Il s'agit des sollicitations que subit une toiture durant sa vie en œuvre liées d'une part aux conditions atmosphériques (par temps de pluie et par temps sec) et d'autre part aux traitements qu'elle subit pendant sa vie en œuvre qui peuvent influencer l'émission de contaminants.

a. Caractéristiques de la pluie

Il s'agit de sa quantité ou sa hauteur, son intensité, sa durée et sa composition chimique notamment son pH.

Plus la quantité de pluie est importante plus le taux de ruissellement est élevé. Le pH est un facteur déterminant pour la qualité des eaux de ruissellement de toitures. Le pH des eaux de pluie, souvent acides, favorise la désorption et la solubilisation par l'eau de ruissellement de certains éléments (ex : le zinc). De plus, le pH des eaux de ruissellement est susceptible

d'influencer la répartition des différents polluants entre les phases dissoutes et particulaires. Des études ont noté une augmentation du pH lors du ruissellement des eaux de pluie sur la toiture. Cette augmentation est provoquée par la dissolution des particules amassées à la surface du toit et par le matériel composant le revêtement (Mouyon, 2001). Pour le zinc, plus le pH est acide, plus la concentration en zinc dans les eaux de ruissellement augmente (He, 2002).

Une faible intensité de la pluie conduit à un contact plus long du matériau avec l'eau de pluie ce qui permet de dissoudre plus de produits donc une concentration plus élevée en contaminants. Par exemple, plus le temps de contact est important plus la dissolution des produits de corrosion du zinc est facile et donc l'eau de pluie est plus contaminée (He, 2002). Pour une forte intensité, c'est les phénomènes d'érosion ou d'arrachement qui se produisent. Pour le plomb qui est majoritairement sous forme particulaire (Schultze-Rettmer, 1995), ses produits de corrosion seront arrachés de la surface du matériau sous l'intensité de la pluie. De la même manière les mousses contaminées par le benzalkonium seront arrachées à la surface du toit et évacuées vers les gouttières (Van de Voorde, 2012).

Pour les biocides émis par les peintures, l'intensité de la pluie ainsi que sa durée sont les principaux facteurs de leurs émissions (Schoknecht *et al.*, 2009; Burkhardt *et al.*, 2011).

b. Durée de temps sec précédant la pluie

Pour les émissions métalliques, lors d'une période sèche, la couche de corrosion devient sèche et tend à se craqueler, favorisant la pénétration de l'eau, et la dissolution de la patine lors de la pluie suivante. De plus, les dépôts de temps sec (dépôts atmosphériques) jouent également un rôle, participant à la formation de nouveaux produits de corrosion au sein de la couche de patine.

c. 1^{er} flot et alternance entre périodes sèches et humides

Pour les matériaux métalliques, à l'échelle de l'évènement pluvieux, les taux de ruissellement sont d'abord élevés (premier flot ou effet de chasse (Mottier et Boller, 1992)) puis diminuent assez rapidement (après quelques millimètres de pluie), pour atteindre un niveau constant qui est fonction du matériau.

L'expression « 1^{er} flot » désigne « un fort pic de concentration en début de pluie » ou « la première période de l'évènement pendant laquelle la concentration en polluants est significativement supérieure à celle observée dans les phases ultérieures » (Gromaire-Mertz, 1998).

Il faut noter que le premier flot n'affecte que le début de l'évènement pluvieux : quelle que soit l'intensité de ce phénomène, le taux de ruissellement observé en régime stationnaire est toujours sensiblement le même pour un même matériau (He, 2002). Le phénomène de premier flot est directement lié aux caractéristiques de la couche de produits de corrosion présents à la surface du matériau (porosité, morphologie, épaisseur et capacité à retenir l'eau de pluie). Par exemple pour le zinc, sa concentration est très élevée au niveau du 1er flot (Joshi et Balasubramanian, 2010).

En absence de pluie, selon le taux d'humidité relative, il y a formation ou non d'un film d'eau à la surface du matériau. Ainsi, la durée de mouillage du matériau en fonction de l'humidité relative influence l'émission (Schriewer et Horn, 2008).

d. Caractéristiques de l'atmosphère

La composition de l'atmosphère est un paramètre important influençant les processus d'émission de contaminants. En effet, l'atmosphère renferme de nombreuses particules, résultant de processus naturels (érosion éolienne, émissions foliaires, activité volcanique...), et anthropiques (rejets industriels, trafic automobile, incinérateurs d'ordure, chauffage domestique) et ces particuliers peuvent s'incorporer dans le processus d'émission (cf. Chapitre 1.3).

Pour les matériaux métalliques, le taux de SO₂ atmosphérique est le paramètre atmosphérique le plus déterminant dans le phénomène de corrosion. Celui-ci étant absorbé dans la couche poreuse des produits de corrosion par temps sec, il facilite, en présence d'eau, la dissolution et la transformation des produits de corrosion et donc l'émission de contaminants métalliques (Odnevall Wallinder *et al.*, 1998; Verbiest *et al.*, 1999).

e. Entretien de la toiture

Certaines pratiques d'entretien des toitures représentent une source de contamination des eaux de ruissellement des toitures (cf. Chapitre 1.3).

Les principaux contaminants dont l'émission par ces produits a été documentée sont des biocides (Schoknecht *et al.*, 2003; Miyauchi *et al.*, 2005; Burkhardt *et al.*, 2007; Jungnickel *et al.*, 2008; Miyauchi et Mori, 2008; Schoknecht *et al.*, 2009). Parmi ces contaminants le benzalkonium est une molécule très utilisée dans les produits de démoissage des tuiles (Van de Voorde *et al.*, 2012). Ce type d'entretien des toitures induit au lessivage de cette molécule dans l'eau de pluie ruisselée sur une toiture traitée. C'est un contaminant déclaré comme dangereux pour l'environnement aquatique.

f. Les propriétés physico-chimiques des contaminants

Chaque contaminant a un comportement spécifique en contact avec l'eau et donc des propriétés physico-chimiques différentes sa solubilité, son Kow^{57} , Koc^{58} ... Certains contaminants se dissolvent en contact avec l'eau, d'autres restent sous forme particulaire et seront entraînés dans l'eau. Par exemple, certaines études (Mottier et Boller, 1992; Quek et Förster, 1993; Gromaire-Mertz *et al.*, 1999) montrent que le plomb est majoritairement sous forme particulaire, le zinc est principalement sous forme dissoute le cuivre se répartit quasiment équitablement entre les deux phases et le cadmium est présent pour environ 80% dans la phase dissoute.

1.2.4. Synthèse sur le phénomène d'émission de contaminants à l'échelle du toit

Les processus d'émission d'un contaminant sont des phénomènes très complexes qui se produisent à l'interface du matériau et de l'environnement extérieur (cf. Figure 67). A cette interface des réactions chimiques et physiques s'établissent entre les composantes du matériau et les composantes de l'environnement extérieur que ce soit en temps sec ou en temps de pluie. Pour aller plus loin dans la compréhension de ces phénomènes microscopiques, des études poussées devront être développées pour différents contaminants et différents matériaux.

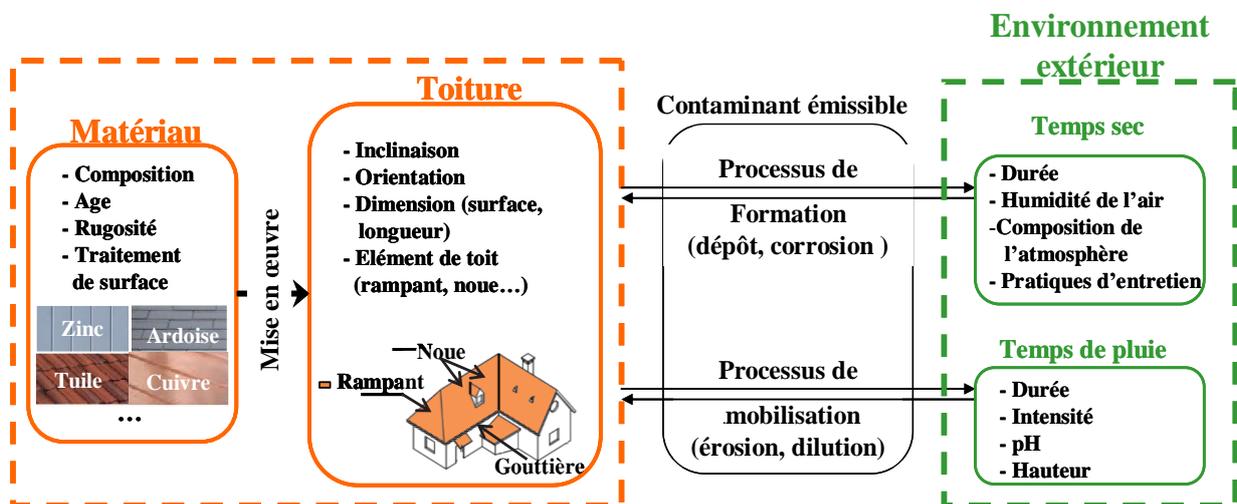


Figure 67: Schéma représentatif du phénomène d'émission d'un contaminant à l'échelle du toit

⁵⁷ Kow le coefficient de répartition octanol-eau : est une mesure de la solubilité différentielle de composés chimiques dans deux solvants

⁵⁸ Le Koc , coefficient de partage carbone organique/eau, donne une indication sur l'aptitude de la molécule à être adsorbée ou désorbée sur la matière organique.

Dans notre travail l'objectif est d'évaluer l'émission d'un contaminant donné par les matériaux de couverture à l'échelle urbaine. La question qui se pose alors :

« Jusqu'à quel niveau de détails faut-il aller pour décrire le phénomène d'émission pour le quantifier à l'échelle urbaine? ».

Pour y répondre, nous allons étudier l'interdépendance des deux échelles vis-à-vis du phénomène d'émission. Ceci nous permettra de retenir à partir des paramètres listés précédemment ceux à prendre impérativement en compte à l'échelle urbaine.

1.3. Quels paramètres liés au toit sont-ils pertinents à l'échelle urbaine?

L'évaluation des émissions à l'échelle du toit fait intervenir des paramètres spécifiques à cette échelle. L'objectif de ce paragraphe est d'identifier à partir des différents paramètres retenus à l'échelle du toit ceux pertinents à l'échelle urbaine.

Nous sommes devant une problématique de changement d'échelle. Or, chaque échelle suppose de poser le problème d'émission d'une façon particulière qui lui est propre et qui ne dépend pas nécessairement de l'échelle inférieure ou supérieure. Donc, nous assistons à une indépendance relative entre les échelles (Simon, 2004). Ainsi, si nous voulons savoir comment un contaminant est formé puis évacué, il faut que nous nous placions à l'échelle moléculaire et nous étudions les processus physiques et chimiques pour répondre à cette question. Si notre objectif est de quantifier les émissions des toits d'une ville, la problématique change : l'émission du contaminant n'est plus représentée comme un ensemble de processus d'échanges entre environnements extérieur (l'atmosphère) et intérieur (le matériau). En revanche, l'émission de contaminants par les matériaux de toiture pose le problème de passage entre l'échelle de la mise en œuvre d'un matériau de toiture et son émission de contaminant en temps de pluie (celle du bâtiment) et l'échelle de l'évaluation « la ville ». Donc, il faut étudier l'interaction entre toit et ville, les différents aspects d'intégration du toit dans une ville : comment est-il choisi, quelle caractéristiques lui attribue-t-on, en fonction de quoi... ?

La définition des paramètres sera donc définie par rapport à la toiture et à l'échelle urbaine. Dans ce paragraphe nous allons, tout d'abord, identifier les paramètres relatifs à la toiture à partir des paramètres décrits précédemment. Dans le [Chapitre 2.3](#) suivant nous allons identifier les paramètres relatifs à l'échelle urbaine.

1.3.1. Paramètres liés au toit influençant le flux d'émission à l'échelle urbaine

L'émission d'un contaminant donné dépend d'une part des caractéristiques du matériau (composition, âge, traitement de surface) (Odnevall Wallinder *et al.*, 2001; Bertling *et al.*, 2006) et d'autre part des caractéristiques du toit le contenant (orientation, inclinaison, entretien,...) (Odnevall Wallinder *et al.*, 2000; Robert-Sainte *et al.*, 2009).

A l'échelle urbaine, les *caractéristiques du matériau* doivent être identifiées. En effet, pour un contaminant donné son émission dépend de l'âge, la composition et le traitement de surface subi par le matériau émetteur. Par contre, les effets de l'orientation et de l'inclinaison sont lissés. En effet, les toitures d'une échelle urbaine donnée présentent différentes orientations et différentes inclinaisons. Pour les matériaux métalliques l'inclinaison du toit influence l'émission de contaminant par m² de matériau exposé mais n'a que peu d'effet sur l'émission par m² de surface projeté du matériau (Odnevall Wallinder *et al.*, 2000; Berggren *et al.*, 2004; Bertling, 2004). De plus, l'identification des matériaux de toiture à l'échelle urbaine sera effectuée à partir des images aériennes qui ne permettent d'avoir accès qu'à des surfaces projetées.

L'émission d'un contaminant diffère en fonction de l'élément de toit, ceci s'explique notamment par la différence de volumes d'eau ruisselée sur l'élément du toit (Robert-Sainte *et al.*, 2009). Donc, l'appartenance d'un contaminant à un *élément de toiture* est un paramètre important qui doit être pris en compte à l'échelle urbaine.

Les pratiques d'entretien d'une toiture sont considérées comme une source d'émission de nouveaux contaminants n'appartenant pas au matériau (Jungnickel *et al.*, 2008; Van de Voorde *et al.*, 2012). Il faudra donc identifier les entretiens subis par les toitures à l'échelle urbaine. La *dimension* de l'élément de toit source du contaminant est un élément fondamental dans l'évaluation de l'émission à l'échelle urbaine.

De plus, dans notre modèle nous nous intéressons à l'évaluation des *flux moyens annuels de contaminants* émis par les matériaux de toiture à l'échelle urbaine. Donc, les paramètres relatifs aux processus d'émission tels que les caractéristiques du temps sec (durée, humidité...) et les caractéristiques de la pluie (intensité, durée, quantité, pH) ne seront pas pris en compte directement dans notre modèle. Par contre, ils sont pris en compte indirectement puisqu'ils participent aux conditions de production des ratios unitaires moyens annuels.

A l'échelle du toit, l'émission d'un contaminant se traduit par l'évaluation soit de sa concentration soit de son flux. Dans la littérature des données de flux unitaires d'émission d'un contaminant par un matériau de toiture ont été élaborées à l'échelle de bancs d'essai ou

celle de toitures. Ces données *quantitatives* permettront l'évaluation de l'émission à grande échelle.

1.3.2. Intégration des paramètres pertinents à travers la définition de la notion « situation-type »

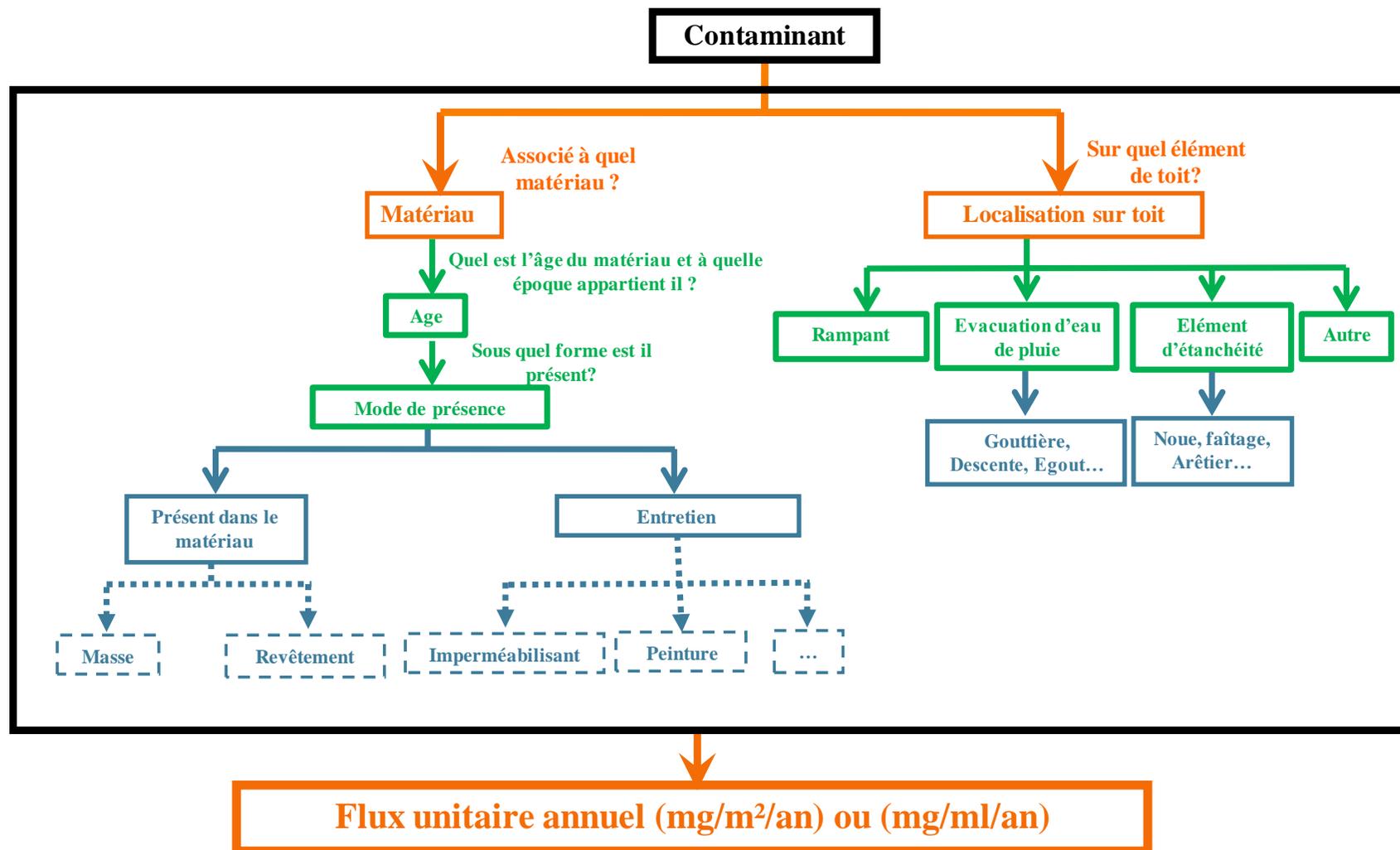
Les différents paramètres retenus influençant l'émission à l'échelle du toit et à l'échelle urbaine devront être analysés de manière à créer un moyen de passage de l'échelle du toit à celle urbaine. Nous avons défini alors une nouvelle notion appelée *situation-type d'émission d'un contaminant par les matériaux de couverture à l'échelle du toit* pour laquelle nous associons un flux unitaire unique d'émission d'un contaminant. Il s'agit du flux annuel par m² projeté ou par ml projeté de matériau. La notion de situation-type est une *notion générale* applicable pour tout contaminant. Elle permet le passage de l'échelle du toit à l'échelle urbaine, c'est une nouvelle définition de l'émission à l'échelle du toit incluant *uniquement* les paramètres pertinents à l'échelle urbaine.

2. Description de la notion de « situation-type »

Nous définissons, donc, la notion de *situation-type d'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture à l'échelle du toit* comme *un cas élémentaire d'émission d'un contaminant caractérisé par son appartenance à un matériau et sa localisation sur le toit* (cf. [Figure 68](#)). A chaque situation-type est associé un flux unitaire d'émission d'un contaminant qui sera noté : $f_{\text{matériau, localisation toit}}$.

L'objectif de ce paragraphe est de décrire les différents éléments composant la définition de la notion de situation-type illustrés dans la [Figure 68](#). Cette notion se base sur trois éléments : l'appartenance à un matériau (son âge et le mode de présence du contaminant dans le matériau), la localisation sur le toit (gouttière, noue, rampant...) et le flux unitaire annuel moyen d'émission de contaminants associé à sa situation-type.

Figure 68: Définition de la situation-type d'émission d'un contaminant par les matériaux de couverture



2.1. Appartenance à un matériau

L'appartenance d'un contaminant à un matériau fait intervenir deux éléments majeurs influençant l'émission d'un contaminant : l'âge du matériau et le mode de présence du contaminant dans le matériau.

2.1.1. Age du matériau

A l'échelle urbaine, nous nous confrontons à une diversité importante des matériaux de toiture que ce soit en termes de la nature du matériau et même de son *âge*. Connaître l'âge du matériau est très important. L'âge du matériau nous renseigne sur son époque de production. Dans le [Chapitre 1.2](#) nous avons montré que l'évolution historique des matériaux de couverture témoigne de leurs changements au cours du temps. En effet, pour les matériaux métalliques, l'évolution de la métallurgie a pas mal changé la composition des alliages. Par exemple, le cadmium a été éliminé de la composition des feuilles en zinc à partir de 1983. En effet, certaines toitures en zinc construites avant cette époque contenaient du cadmium qui a été utilisé par certaines industries comme un élément d'alliage vers les années 1960 (D'après Mr Bissery de VMZINC). Pour l'acier inoxydable, à partir de 1971, une couche très fine de plomb/étain est rajoutée ([Invernizzi, 2000](#)). De plus, comme décrit dans le [Paragraphe 1.2.2](#), l'âge d'un matériau influence son émission de contaminants. Par exemple, le zinc ancien âgé de 62 ans émet plus de zinc qu'un zinc neuf avec des taux de d'émission respectif 14,6 et 2,3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ ([Odnevall Wallinder et al., 1998](#); [Odnevall Wallinder et al., 2001](#)).

2.1.2. Mode de présence du contaminant dans le matériau

Lors de notre étude bibliographique sur les matériaux de couverture ([Chapitre 1.1](#)), nous avons montré que certaines familles de matériau se décomposent en plusieurs variétés. La variété peut être obtenue par un traitement spécifique (ex : le prélaquage, prépatinage, coloration en masse...) ou par un changement de la composition du matériau initial. De plus, certains matériaux subissent des traitements spécifiques pendant la vie en œuvre (ex : épandage de produits d'entretien sur les surfaces envahies par les moisissures cas des tuiles). Ces traitements subis par les matériaux influencent leurs émissions de contaminants par temps de pluie (cf. [Chapitre 1.3](#) et [Paragraphe 1.2.1](#)). Ces émissions peuvent être moins importantes que celles du matériau d'origine comme elles peuvent contenir d'autres contaminants issus

des traitements subis. Ce constat a été confirmé dans deux thèses élaborées dans OPUR (Robert-Sainte, 2009; Van de Voorde, 2012).

L'appartenance d'un contaminant à un matériau donné pose la question : *sous quelle forme ce contaminant existe-t-il dans le matériau ?*

La réponse à cette question permet de mieux identifier les flux d'émission. Par exemple, dans une zone donnée comportant des toitures et des gouttières en zinc et aucun élément en cuivre (ex : gouttière), le flux principal du cuivre sera celui émis par les matériaux en zinc. En effet, le cuivre est un composant secondaire des matériaux en zinc. Donc, il faut arriver à décrire l'intégralité des situations-types basiques dans lesquelles nous pouvons trouver une substance donnée et la rattacher à un flux unitaire.

Le *mode de présence* permet de décrire la nature de l'apport de contaminant dans le matériau : apport avant mise en œuvre et durant la fabrication du matériau ou apport après mise en œuvre. Dans le [Chapitre 1.3](#), nous avons montré que le contaminant peut être présent dans la masse du matériau soit comme un composant principal, ou un composant secondaire ou comme un adjuvant. Le contaminant peut être aussi présent dans le revêtement du matériau. Le contaminant peut ne pas faire partie de la composition du matériau, il est un agent extérieur déposé volontairement lié aux pratiques d'entretien (ex : démoussage) ou non volontairement (ex : apport atmosphérique) sur les éléments de la toiture (cf. [Figure 69](#)).

Notons que les contaminants issus des retombées atmosphériques ne font pas partie de notre recherche. En fait, l'étude de cette source de contamination est très complexe, et notre recherche s'intéresse aux contaminants émis uniquement par le matériau de toiture.

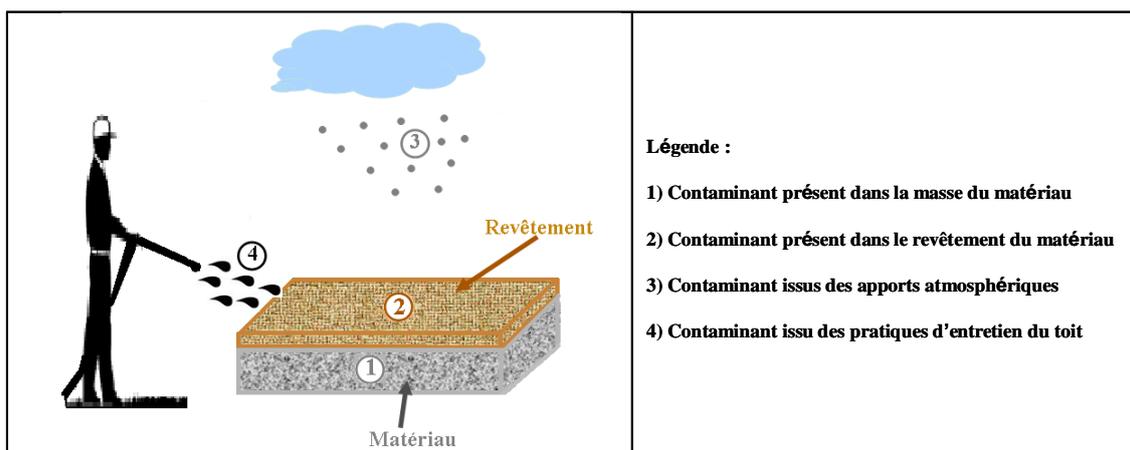


Figure 69 : Schématisation des différents modes de présence d'un contaminant sur un toit

2.1.3. Localisation sur le toit

La localisation du matériau sur un élément spécifique de la toiture induit une émission spécifique de contaminant (cf. [Paragraphe 1.2.2](#)). Quatre grandes catégories d'éléments sont identifiées : le rampant, les éléments d'étanchéité, les éléments d'évacuations des eaux de pluies et autres (les accessoires : crochets de fixations des ardoises...). A l'échelle urbaine, l'identification et la quantification des dimensions de ces éléments est indispensable pour évaluer les émissions de contaminants.

2.2. Exemples de situations-types réelles

La [Figure 70](#) montre quelques exemples de situations-types associées à la gouttière et la descente. Nous remarquons bien que les gouttières/descentes métalliques anciennes sont différentes par rapport aux neuves avec la prise de la patine par le métal. Ainsi, le zinc initialement brillant devient plus foncé et matte en vieillissant. De même pour le cuivre, il prend une patine verte. Les gouttières/descentes en aluminium présentent une forme spécifique rectangulaire par rapport aux autres gouttières.

La [Figure 71](#) illustre quelques exemples des situations-types associées à la noue. Nous remarquons que la noue en zinc prépatiné gris foncé se marie bien avec la couleur de l'ardoise par rapport à la noue en zinc naturel qui reste apparente. D'après les experts de la couverture le zinc prépatiné gris foncé a été développée pour les accessoires des toitures en ardoise.

La [Figure 72](#) présente différentes situations-types associées au rampant. Nous distinguons entre les différents matériaux de rampant par leur couleur, leur profil et leur forme. Ainsi, l'ardoise est sous forme de petit élément gris et la tuile de couleur rougeâtre. Les plaques en fibres ciment sont sous forme de grands éléments ondulés alors que l'acier est sous forme de plaques nervurée.

Enfin, les étanchéités des éléments de toiture tels que les cheminées et les fenêtres sont principalement sous forme de bavettes en plomb (cf. [Figure 73](#)). Actuellement sur le marché de nouvelles bavettes en aluminium laqué apparaissent et qui se marient avec la couleur de la toiture.



Figure 70 : Exemples de situations-typiques associées à la gouttière et la descente

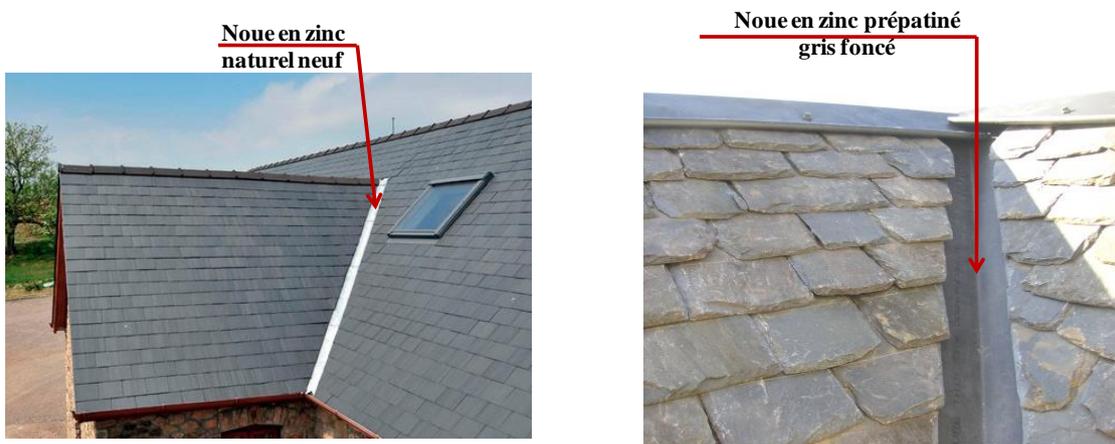


Figure 71 : Exemples de situations-typiques associées à la noue

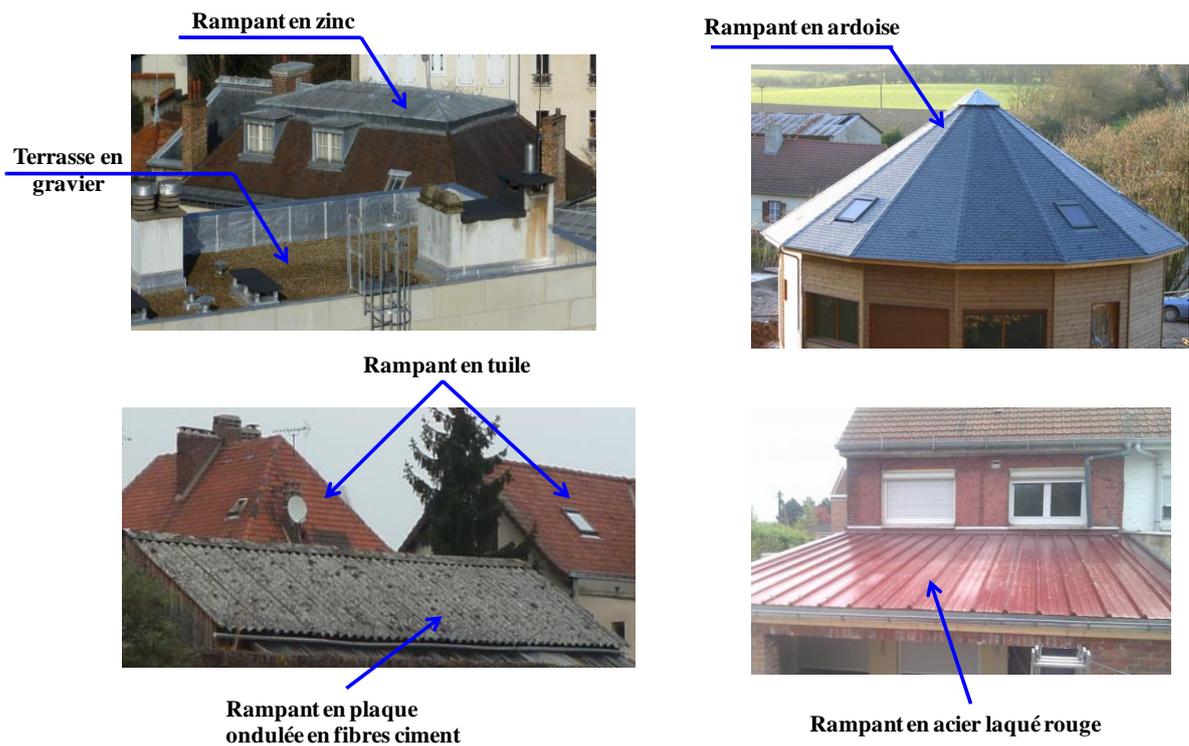


Figure 72 : Exemples de situations-types associées au rampant

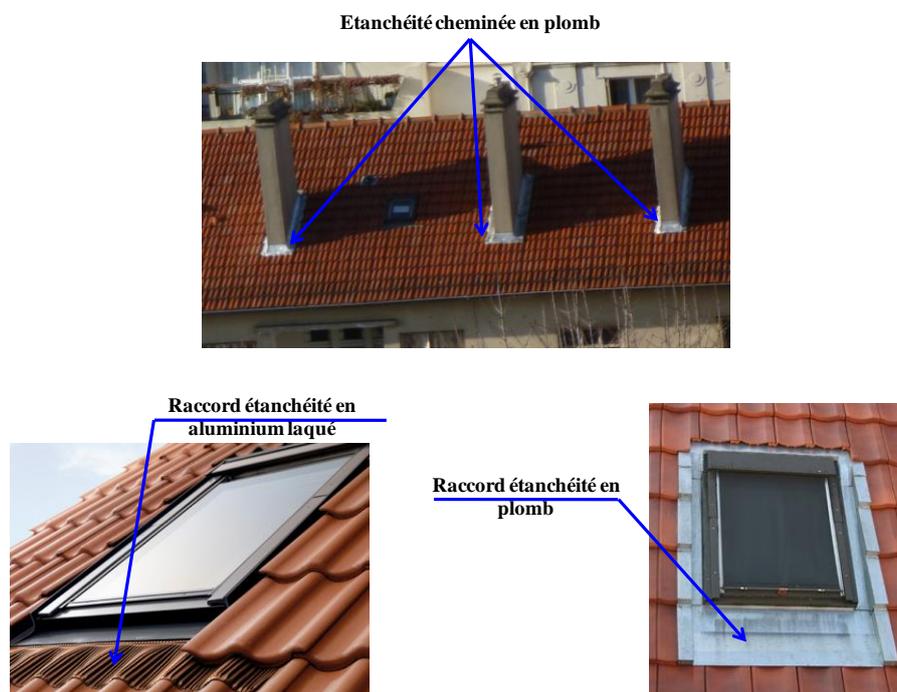


Figure 73 : Exemples de situations-types associées aux éléments d'étanchéité

2.3. Flux unitaire par situation-type

L'objectif de ce paragraphe est d'identifier les situations-types renseignées en termes de flux unitaires. Il s'agit d'attribuer les flux identifiés dans la littérature dans le [Tableau 15](#) du [Chapitre 1.3](#) aux situations-types correspondantes. Nous avons ainsi remarqué, d'une part que les situations-types ne sont pas toutes renseignées car nous avons un manque de données de flux unitaires moyens. D'autre part, parfois pour une même situation-type nous avons trouvé plusieurs valeurs de flux. Ainsi, pour trancher, nous avons proposé une démarche de choix entre ces différentes données.

2.3.1. Contaminants métalliques

Dans ce paragraphe, nous allons présenter pour trois contaminants différents (Zn, Cu et Pb) (les plus étudiés dans la littérature) leurs situations-types renseignées à partir des données de la littérature. Les résultats sont illustrés dans les tableaux **ci-dessous** : [Tableau 17](#), [Tableau 18](#), et [Tableau 19](#). Il s'agit des données moyennées de flux annuels moyens unitaires. En d'autres termes pour certains sites nous avons trouvé parfois plus qu'une valeur donc nous avons effectué une moyenne de ces données. En effet, l'objectif de ce paragraphe est de fournir des tableaux opérationnels de situations-types renseignées, c'est-à-dire prêt à être utilisés.

Nous remarquons que pour une situation-type donnée nous disposons parfois de différentes valeurs de flux unitaire d'émission du contaminant. Ces différentes valeurs s'expliquent par différentes études élaborées dans des sites, des pays et dans des conditions expérimentales spécifiques. Par exemple, le flux d'émission du zinc par le rampant en zinc neuf exposé dans un site urbain est de 3,87 g/m²/an ([Robert-Sainte et al., 2009](#)) en France alors qu'en Suisse il est de 3,34 g/m²/an ([Leuenerger-Minger et al., 2002](#)). En Suède, l'émission est d'environ 3 g/m²/an ([Odnevall Wallinder et Leygraf, 2002](#); [Karlen et al., 2001](#); [Odnevall Wallinder et al., 2001](#)). Ce que nous pouvons conclure c'est que pour un site urbain dans différents pays les valeurs d'émission du zinc par le zinc neuf ne sont pas très variables, l'écart maximal est de 22%. Les sites industriels, favorisant le phénomène de corrosion, permettent d'avoir les valeurs d'émission les plus élevées par rapport aux autres types de sites (urbain, rural, péri-urbain...). En effet, le flux annuels d'émission du contaminant cuivre par le rampant en cuivre neuf dans un site industriel en France est de 3,93 g/m²/an contre des flux mesurés sur d'autres type de sites dans différents pays (Suède, Suisse) qui varient entre 0,58 et 1,62 g/m²/an ([cf. Tableau 18](#)).

L'émission des matériaux anciens dans un site urbain est très variable d'un pays à un autre. Le plomb ancien étudié dans un site urbain en France émet trois fois plus de plomb (22,5 g/m²/an (Robert-Sainte *et al.*, 2009)) que celui testé au Pays Bas (7,65 g/m²/an (Wilson, 2003)). De plus, un zinc ancien de 35 ans étudié en France émet environ 4,17 g/m²/an de zinc (Robert-Sainte *et al.*, 2009), valeur supérieure à celle élaborée en Suède pour un zinc ancien de 40 ans qui émet 3,5 g/m²/an de zinc (Odnevall Wallinder *et al.*, 2001). Cette variabilité s'explique du fait que certains matériaux sont très anciens (ex : 100 ans) et d'autres un peu moins anciens (ex : 30 ans). En outre, la composition des matériaux anciens est très mal connue puisque la composition n'était pas normée avant 1983 (cf. Chapitre 1.3). De plus, l'atmosphère était plus polluée et corrosive surtout pendant les guerres. Ainsi, les matériaux métalliques exposés ont été soumis à des conditions très spécifiques qui varient d'un pays à un autre.

Pour les différents éléments de toit, les données de flux unitaires annuels sont très limitées, les travaux se sont focalisés sur l'étude des émissions par le rampant. Les travaux de (Robert-Sainte *et al.*, 2009) se sont élargis à étudier les émissions des différents matériaux de gouttières et des crochets de fixation.

Beaucoup d'études ont été élaborées sur les émissions du zinc (cf. Tableau 17). Néanmoins, les situations-types du zinc ne sont pas toutes renseignées surtout celles associées aux autres éléments du toit. A part les travaux de Robert-Sainte (2009) sur les émissions de différents matériaux de gouttières nous ne trouvons pas d'autres études. De plus, d'après notre étude sur les matériaux de toitures (cf. Chapitre 1.1) et d'après les entretiens avec les experts de la couverture, les toitures non métalliques tels que l'ardoise et la tuile engagent beaucoup d'éléments singuliers tels que les noues et les étanchéités (fenêtre, cheminée...). Ces éléments sont la plupart du temps métalliques, en particulier les noues sont majoritairement en zinc. Ainsi, à grande échelle la contribution des émissions des noues est non négligeable surtout dans les habitats individuels (formé en majorité par des toitures en tuile). Donc, la production des données de flux unitaires d'émission du zinc par les noues devient nécessaire.

Tableau 17 : Les différentes situations-types renseignées d'émission du zinc par les matériaux de toiture

| Matériau | Localisation sur le toit | Mode de présence | Flux unitaires moyens (g.m ⁻² .an ⁻¹) (g.m ⁻¹ .an ⁻¹)* | Site (Localisation) |
|----------------|--------------------------|------------------------------|--|---|
| Zinc neuf | Rampant | Composant principal en masse | 3,87 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 3,34 | Urbain - Bern (Suisse) |
| | | | 3 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 18,1 | Urbain avec industrie (Belgique) |
| | | | 3,3 | Péri-Urbain Champ sur Marne (France) |
| | | | 3,6 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) |
| | | | 8,72 | Autoroutier- Härkingen (Suisse) |
| | | | 8,72 | Industriel - Normandie (France) |
| | | | 6,4 | Industriel - Olen (Belgique) |
| | | | 4 | Rural - Payerne (Suisse) |
| | 2,6 | Rural (Belgique) | | |
| | Gouttière* | Composant principal en masse | 0,87 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,7 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Zinc ancien | Rampant | Composant principal en masse | 3 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 4,17 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 3,5 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 14,6 | Urbain avec industrie (Belgique) |
| | | | 4,15 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | | | 7,1 | Industriel - Olen (Belgique) |
| | | | 7,6 | |
| | 39 ans | 7,9 | | |
| | 40 ans | Gouttière* | Composant principal en masse | 0,81 |
| | | | 0,8 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Anthra zinc | Rampant | Composant principal en masse | 2,3 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 1,35 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 11,9 | Urbain avec industrie (Belgique) |
| | | | 2,1 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | | | 1,9 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) |
| | | | 4,2 | Industriel - Olen (Belgique) |
| | 1,9 | Rural (Belgique) | | |
| | Gouttière* | Composant principal en masse | 0,5 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,33 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Quartz zinc | Rampant | Composant principal en masse | 1,15 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 13 | Urbain avec industrie (Belgique) |
| | | | 3,2 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) |
| | | | 4,15 | Industriel - Olen (Belgique) |
| | | | 1,95 | Rural (Belgique) |
| Zinc prépatiné | Rampant | Composant principal en masse | 3,5 | Zone avec faible concentration de SO ₂ |

| Matériau | Localisation sur le toit | Mode de présence | Flux unitaires moyens (g.m ⁻² .an ⁻¹) (g.m ⁻¹ .an ⁻¹)* | Site (Localisation) |
|---------------------------|--------------------------|---|--|--|
| Acier galvanisé | Rampant | Composant principal du traitement de surface de l'acier galvanisé | 1,97 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 2,74 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 1,87 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | | | 2,4 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) |
| | Crochet de fixation | | 0,046 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0438 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Acier galvanisé prépeint | Rampant | Composant principal du traitement de surface de l'acier galvanisé | 0,0246 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,07 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 0,0074 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Acier prépeint | Rampant | Composant principal du traitement de surface de l'acier galvanisé | 0,72 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| Acier inoxydable | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,00014 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Plomb neuf | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0524 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0431 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Plomb ancien (50 ans) | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,113 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0866 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Aluminium | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0337 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,540 | Marin – Brest (France) |
| | Gouttière* | | 0,0357 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Aluminium prépeint | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0112 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Cuivre neuf | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,002 | Urbain - Créteil (France) |
| Cuivre ancien 20 à 25 ans | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0214 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0206 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |

Les situations-types d'émission du cuivre renseignées (cf. Tableau 18) sont aussi limitées dans la littérature. Comme pour le zinc, les études sur les émissions du cuivre par des autres éléments de toit sont limitées. En termes d'utilisation sur la toiture, le matériau cuivre en éléments singuliers est de moins en moins utilisé, surtout en France, car c'est un matériau noble et cher. De même le cuivre en rampant reste limité et il est utilisé sur des bâtiments exceptionnels. Il est aussi utilisé en gouttière surtout pour les bâtiments anciens. Pour les autres éléments du toit, d'après notre recherche le cuivre est quasiment absent. Pour l'émission du contaminant cuivre par les autres matériaux métalliques la plus importante est celle du plomb ancien (0,0087 g/m²/an). Ainsi, en termes de production de données, il faudra

faire un choix et une analyse hiérarchique des différentes situations-types par rapport au site d'étude pour savoir celles prioritaires et surtout importantes pour avoir des données. En effet, un travail expérimental de production de données est coûteux et nécessite une étude au préalable.

Tableau 18 : Les différentes situations-types renseignées d'émission du cuivre par les matériaux de toiture

| Matériau | Localisation sur le toit | Mode de présence | Flux unitaires moyens (g.m ² .an ⁻¹) (g.m ¹ .an ⁻¹)* | Site |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|--|--|
| Zinc neuf | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0023 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,006 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Anthra-zinc | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0014 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,006 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Zinc ancien (35 ans) | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0016 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,009 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Gouttière* | | 0,0033 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0023 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Cuivre neuf | Gouttière* | Composant principal en masse | 0,416 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,323 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Rampant | Composant principal en masse | 1,58 | Urbain - Milan (Italie) |
| | | | 0,35 | Urbain - Bern (Suisse) |
| | | | 1,4 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 1,38 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) |
| | | | 0,11 | Autoroutier - Härkingen (Suisse) |
| | | | 3,93 | Industriel - Normandie (France) |
| | | | 0,8 | Rural - Hoboken (Suède) |
| | | | 0,58 | Rural - Payerne (Suisse) |
| 1,61 | Marin (France) | | | |
| Cuivre ancien | Rampant | Composant principal en masse | 1,4 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 2,1 | |
| | | | 1,9 | |
| | | | 1,74 | |
| | | | 1,36 | Marin (France) |
| Cuivre ancien 20 à 25 ans | Gouttière* | Composant principal en masse | 0,631 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,429 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Plomb neuf | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,007 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0042 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Plomb ancien (50 ans) | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0087 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,017 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |

| Matériau | Localisation sur le toit | Mode de présence | Flux unitaires moyens ($\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) ($\text{g.m}^{-1}.\text{an}^{-1}$)* | Site |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--|--|
| Acier galvanisé prépeint | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,002 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,004 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Acier galvanisé | Crochet de fixation | Composant secondaire en masse | 0,00038 | Urbain - Créteil (France) |
| Acier inoxydable | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,006 | Urbain - Créteil (France) |
| | Crochet de fixation | | 0,000035 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | | | 0,000021 | Urbain - Créteil (France) |
| Aluminium | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,004 | Urbain - Créteil (France) |
| | Gouttière* | | 0,004 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Aluminium prépeint | Gouttière | Composant secondaire en masse | 0,0016 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |

Comme pour le zinc et le cuivre, les situations-types d'émission du plomb renseignées (cf. [Tableau 19](#)) sont limitées dans la littérature. Pour les éléments de toiture, d'après notre recherche (cf. [Chapitre 1.1](#)), le matériau plomb est très utilisé en tant qu'éléments d'étanchéités sur les toitures non métalliques (tuile et ardoise). Ainsi, la production de données d'émission de ces éléments devient nécessaire pour l'évaluation à grande échelle. Pour le rampant, comme le cuivre, le plomb est un matériau noble utilisé sur quelques bâtiments très anciens (des monuments). Aujourd'hui, en France, le marché du plomb est de 0,1% du marché totale de la couverture ([MSI, 2006](#) ; [MSI, 2012](#)).

Tableau 19 : Les différentes situations-types renseignées d'émission du plomb par les matériaux de toiture

| Matériau | Localisation sur le toit | Mode de présence | Flux unitaires moyens (g.m ² .an ⁻¹) (g.m ⁻¹ .an ⁻¹)* | Site |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|---|--|
| Plomb neuf | Rampant | Composant principale en masse | 7,2 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 4,3 - 6,6 | Urbain (Pays-Bas) |
| | | | 4 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) |
| | Rive contre mur | Composant principale en masse | 0,88 | Urbain (Pays-Bas) |
| Plomb ancien | Rampant (50ans) | Composant principale en masse | 22,5 | Urbain - Créteil (France) |
| | Rampant | | 11,1 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | | | 7,65 | Urbain (Pays-Bas) |
| Zinc neuf | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0005 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0003 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0009 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0002 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Anthra zinc | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0007 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0006 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0003 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0001 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Zinc ancien (35 ans) | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,019 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,016 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0024 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,002 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Cuivre neuf | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0014 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0002 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Cuivre ancien | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0009 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0004 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Acier galvanisé | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0003 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0004 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Crochet de fixation | Composant secondaire en masse | 0,000027 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,000013 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Acier galvanisé prépeint | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0004 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0005 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Acier inoxydable | Crochet de fixation | Composant secondaire en masse | 0,00005 | Urbain en Créteil 2006-2008 |
| Aluminium | Rampant | Composant secondaire en masse | <0,01 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) |
| | | | 0,0021 | Urbain - Créteil (France) |
| | Gouttière* | | 0,0002 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |

2.3.2. Contaminants organiques

Les données de flux annuels d'émission des molécules organiques sont très limitées dans la littérature. Ces molécules ont des comportements très spécifiques par rapport aux contaminants métalliques. En effet, les molécules organiques ont différents processus d'émission qui diffèrent d'une molécule à une autre. En particulier, le stock émissile se forme de différentes manières : certaines molécules comme les HAP et le mécoprop sont présentes dans la composition du matériau, d'autres contaminants sont rapportés en surface du matériau comme les biocides dans les peintures ou encore les produits de démoissage. Le point commun de ces molécules est qu'elles sont présentes en quantités limitées et leurs stocks tendent s'épuiser au cours du temps en fonction du nombre d'événements pluvieux. Pour alimenter plus les situations-types associées à ces contaminants, des travaux devront être menés.

Il faudra noter que pour les molécules organiques présentent un flux d'émission qui dépend d'un paramètre spécifique celui de la *durée depuis le traitement de surface ou la mise en œuvre*. Ainsi, la situation-type devra annoncer ce paramètre.

Le [Tableau 20](#) illustre quatre situations-types d'émission de contaminants organiques. Nous remarquons bien que le comportement des deux molécules le benzalkonium et le mécoprop est différent. La première molécule est émise par les traitements de démoissage des matériaux anciens en tuile. La deuxième molécule émise par hydrolyse d'un agent anti-racinaire incorporée dans la composition des matériaux neufs. Les émissions des deux molécules dépendent énormément de la nature du matériau. D'un matériau à un autre le facteur d'émission de benzalkonium par les tuiles béton est 13 fois plus important que celui d'émission par les tuiles en terre cuite. Pour le mécoprop son émission par les membranes Preventol B2 est 11 fois plus supérieure que celle des membranes Herbitect.

Tableau 20 : Les différentes situations-types renseignées d'émission de contaminants organiques par les matériaux de toiture

| Contaminant | Matériau | | | Localisation sur le toit | Flux unitaires (g.m ⁻² .an ⁻¹) | Durée depuis la mise en œuvre ou le traitement | Référence |
|--------------|------------------------------------|----------|--|--------------------------|---|--|-----------------------|
| | Nom | Age | Mode de présence | | | | |
| Benzalkonium | Tuile en terre cuite | Ancienne | Composant principal du produit de démoussage | Rampant | 15 | Première année d'exposition après épandage | (Van de Voorde, 2012) |
| | Tuile béton | | | | 200 | | |
| Mécoprop | Membrane d'étanchéité Preventol B2 | Neuve | Composant secondaire dans le revêtement d'étanchéité | Terrasse | 12,4 | Après 11 événements d'arrosage | (Burkhardt, 2011) |
| | Membrane d'étanchéité Herbitect | | | | 1,1 | | |

2.3.3. Synthèse : démarche d'attribution de flux unitaire à une situation-type

La question qui se pose, *pour évaluer l'émission d'un contaminant donné à l'échelle urbaine quels sont les flux à considérer pour chaque situation-type ?*

Pour répondre à cette question, deux cas se présentent : soit les données de flux pour chaque situation-type existent pour le site étudié, soit elles sont absentes. Sachant qu'à grande échelle nous avons besoin d'une démarche opérationnelle qui nous permettra d'appliquer rapidement sans hésitation la valeur de flux attribuée à une situation-type donnée, nous proposons la démarche suivante suivant trois cas : un cas où les données existent pour le site étudié, un cas où il n'y a pas de données locales, mais des données existent pour des « cas comparables » et enfin un cas aucune donnée disponible, situation-spécifique.

- **1^{er} cas : des données existent pour le site étudié**

Dans un site d'étude, nous devons identifier les données de flux existantes ces données seront utilisées en tant que telles.

- **2^{ème} cas : il n'y a pas de données locales, mais des données existent pour des « cas comparables »**

Si aucun flux n'est évalué pour un contaminant donné l'idée sera d'approximer le flux par les données qui existent dans le même pays ou dans le site le plus proche de même nature (Urbain, Péri-urbain...). En effet, en France nous disposons de deux études effectuées sur l'émission des métaux par les matériaux de toiture, un travail a été conduit sur des matériaux

tests (Robert-Sainte, 2009) en région parisienne. L'autre étude a été menée sur des toitures réelles à Nantes (Lamprea, 2009). La comparaison des deux études est faite pour le toit en zinc (comparé au zinc ancien). Les flux annuels de zinc sont comparables dans les deux cas, 3,2 à 3,87 g/m²/an¹ (Robert-Sainte, 2009) contre 3,42 g/m²/an (Lamprea, 2009).

- **3^{ème} cas : aucune donnée disponible, situation-spécifique**

Enfin, si nous ne disposons d'aucune information sur une situation-type donnée, il faudra alors développer une démarche d'acquisition de données. Cette démarche devra être opérationnelle et efficace et a pour objectif principal l'évaluation des flux à l'échelle urbaine. En d'autres termes, nous chercherons à identifier pour un contaminant donné les situations-types les plus importantes. Il s'agit d'effectuer un travail de hiérarchisation des situations-types par rapport à leurs potentiels émissifs. Ainsi, si le contaminant est un composant principal de différents matériaux donc toutes les situations-types associées à ces matériaux devront être évaluées. Si nous prenons le cas du plomb, nous savions qu'en tant que rampant, en France le plomb en surface est quasiment négligeable, donc nous pouvons nous contenter des données produites par Robert-Sainte (2009) comme données représentatives pour toute la France. Par contre, pour les éléments d'étanchéité qui sont très utilisés en toitures non métalliques, un besoin de production de données se présente, ainsi les situations-types associées à ces éléments de toit devront être étudiées.

Il faudra noter qu'il y a un grand manque de données par rapport à l'émission par les différents éléments du toit qui devra être résolu. De même pour les molécules non métalliques, pour certaines leur nocivité est connue pour l'environnement mais nous ne disposons d'aucune information sur leurs flux d'émission annuels moyens.

L'étude expérimentale étant coûteuse et longue, elle devra être élaborée uniquement en cas de besoin. En d'autres termes, les flux qui ont été mesurés dans la littérature ont permis dans certains travaux d'élaborer des modèles d'émission. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'effectuer une acquisition de données. Il suffit donc d'appliquer les modèles développés ailleurs (Schiopu *et al.*, 2009; Gromaire *et al.*, 2011; Wittmer *et al.*, 2011; Lupsea *et al.*, 2013) en évaluant l'incertitude induite par cette transposition.

Enfin, si les modèles n'existent pas, un travail expérimental d'acquisition de données sera nécessaire mais il devra être développé dans l'objectif d'élaborer de nouveaux modèles. Il faudra alors élaborer des approches de modélisation d'émission à petites échelles permettant d'avoir des flux annuels moyens.

3. Equation générale du flux annuel total d'émission d'un contaminant donné

Le flux annuel d'émission F_c d'un contaminant C par les matériaux de toiture s'écrit comme la somme des émissions de toutes les situations-types associées à ce contaminant. Chaque situation-type (ST) se traduit par son flux unitaire (f) et sa dimension (D) pour un matériau donné (cf. Equation 1).

$$\text{Equation 1 : } F_c = \sum_{i=ST} f_i \times D_i$$

La dimension de la situation-type correspond à la dimension du matériau de l'élément du toit. Le flux unitaire correspond à l'émission du contaminant par un matériau localisé sur un élément du toit. Donc l'équation 1 peut être réécrite par l'Equation 2.

$$\text{Equation 2 : } F_c = \sum_{i=\text{matériau}} \left(\sum_{j=\text{élément toit}} (f_{i,j} \times D_{i,j}) \right)$$

$D_{i,j}$: la dimension peut être une surface (m^2) ou une longueur (ml) de l'élément du toit.

$f_{i,j}$: le flux unitaire pour un matériau localisé sur un élément du toit peut être en $g.m^{-2}.an^{-1}$ ou en $g.ml^{-1}.an^{-1}$.

D'après l'Equation 2, l'évaluation du flux annuel global d'un contaminant à l'échelle urbaine repose sur deux principaux paramètres : des flux unitaires et des surfaces ou des longueurs associés à des situations-types. Les flux unitaires sont des données produites à petites échelles spatiales (banc d'essai ou toit). Dans notre recherche, nous ne nous intéressons pas à la production de flux mais uniquement à utiliser ceux qui ont été produits (cf. Tableau 18, et Tableau 19). Donc, notre problématique d'évaluation du flux global à l'échelle urbaine se réduira à l'évaluation du paramètre surface ou longueur associée à chaque situation-type.

La question qui se pose alors, « comment peut-on évaluer la dimension d'une situation-type d'émission d'un contaminant donné à l'échelle urbaine ? »

En d'autres termes : *Comment peut-on identifier et évaluer la dimension (surface ou longueur) d'un matériau i d'un élément du toit à l'échelle urbaine?*

Pour répondre à cette question, il faudra tout d'abord identifier les paramètres liés à la grande échelle qui seront décrits dans le Chapitre 2.3 suivant.

4. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre nous avons défini une nouvelle notion appelée « situation-type d'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture ». Cette notion est un moyen de passage de l'échelle du toit à l'échelle urbaine en intégrant uniquement les paramètres identifiés à l'échelle du toit mais qui influencent l'évaluation de l'émission à l'échelle urbaine.

Un travail d'identification des situations-types renseignées en termes d'existence de flux unitaires moyens dans la littérature a été effectué. Ce travail a montré un manque de données et ainsi nous avons proposé une démarche d'exploitation des situations-types dans n'importe quelle échelle urbaine. Enfin, l'équation générale d'émission de contaminant à l'échelle urbaine a été définie comme la somme de toutes les situations-types associées à un contaminant donné. Ainsi, le travail de notre développement de modèle d'émission à l'échelle urbaine se réduit à un développement d'une méthode d'évaluation de la dimension des matériaux des différents éléments de toiture. Pour ce travail, nous avons besoin en premier lieu d'identifier les paramètres spécifiques de l'échelle urbaine influençant l'utilisation d'un matériau d'élément de toiture (cf. [Chapitre 2.3](#)).

Chapitre 2.3. Identification de critères de choix des matériaux de toitures à l'échelle urbaine : un découpage en entités homogènes

Dans le [Chapitre 2.2](#) précédent, nous avons défini la notion de situation-type comme un moyen de passage de l'échelle du toit à l'échelle urbaine. Ce chapitre a permis d'identifier les différents paramètres influençant l'émission de contaminants au niveau du toit ainsi qu'à l'échelle urbaine. L'évaluation du flux annuel global d'un contaminant à l'échelle urbaine repose sur deux principaux paramètres : des flux unitaires et des surfaces ou des longueurs associés à des situations-types. Ainsi, la nouvelle problématique qui se pose est : *Comment peut-on identifier et évaluer la dimension (surface ou longueur) d'un matériau d'un élément de toiture à l'échelle urbaine?*

Pour répondre à cette question nous procédons en quatre temps. Tout d'abord, nous avons effectué un état des lieux sur les méthodes de quantification des matériaux de toitures existantes. Ces méthodes automatiques présentent des limites et ne nous permettent pas d'aller plus loin dans le développement de notre méthode. Par exemple elles quantifient uniquement les surfaces des matériaux de rampant et ne donnent aucune information sur les autres éléments de toit. Ainsi, dans la deuxième section, nous avons décidé d'établir un état des lieux sur les modèles d'évaluation à l'échelle urbaine des phénomènes se produisant à petites échelles spatiales. L'objectif est d'identifier les moyens exploités dans ces modèles pour l'évaluation à grandes échelles.

La troisième section sera consacrée à identifier les critères de choix des matériaux de toiture à partir d'une étude bibliographique. Enfin, l'interprétation de ces critères a permis de définir un moyen opérationnel d'identification des matériaux de toiture à l'échelle urbaine. Il s'agit de découper l'échelle urbaine en entités homogènes en termes de répartition propre des matériaux de toiture. Cette étape constitue un premier pas vers le développement de notre méthode d'évaluation des dimensions des éléments de toit à l'échelle urbaine.

1. Les méthodes de reconnaissance automatique des matériaux de toiture

L'identification et la quantification, à grandes échelles, des matériaux de toitures ont été étudiées dans les travaux de classification d'images aériennes. Plusieurs méthodes de classifications ont été développées à l'aide de différents outils. Nous distinguons les méthodes basées sur l'exploitation des données hyperspectrales et les méthodes basées sur l'analyse d'images multispectrales classiques.

1.1. Méthodes basées sur l'analyse des données hyperspectrales

La spectro-imagerie, également appelée imagerie « hyperspectrale » par opposition à l'imagerie « multispectrales », est une technologie permettant la représentation d'une scène suivant un grand nombre de bandes spectrales (généralement plus d'une centaine), étroites ($\leq 10\text{nm}$) et contiguës. Le domaine spectral peut couvrir le visible, le proche infrarouge et le l'infrarouge de courte longueur d'onde. Ce type d'image est de plus en plus utilisé dans le domaine de la reconnaissance automatique de différents objets (bâtiment, voirie, espace vert, matériau de toiture...).

En Allemagne, dans le cadre d'un projet d'évaluation des émissions de polluants par les matériaux des surfaces urbaines, une méthode de classification des matériaux de toiture a été mise au point ([Lemp et Weidner, 2004](#)). Cette approche est basée sur la combinaison de données hyperspectrales (dans le visible et le proche infrarouge) avec un modèle numérique de surface (MNS). La classification est effectuée à l'aide du logiciel eCognition (logiciel de traitement d'image qui permet de segmenter l'image en groupes de pixels montrant des caractéristiques similaires tels que leurs tailles, couleurs, etc. et de faire de la classification). Le MNS sert à identifier la géométrie des surfaces détectées ainsi qu'à détecter les bâtiments et les découper en pans de toit. L'identification du matériau de toiture est obtenue à partir de la classification de données hyperspectrales. Il s'agit d'affecter à chaque matériau le spectre radiométrique proche. Le MNS est utilisé pour lever les ambiguïtés entre certains matériaux. En effet, la pente de la toiture, estimée à partir du MNS, est utilisée dans le processus de la classification pour différencier entre certains matériaux « ressemblants ».

Le résultat obtenu est une image de surfaces de toitures colorées, chaque couleur correspond à un matériau spécifique. Par exemple, la couleur rouge correspond à la tuile alors que le bleu-ciel représente le zinc (cf. Figure 74).

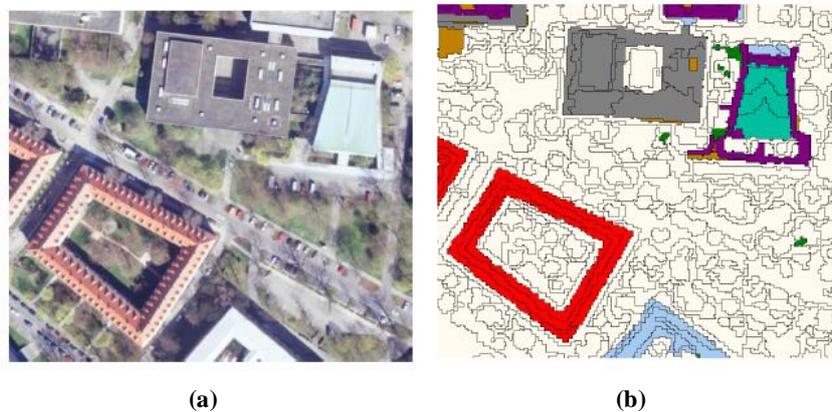


Figure 74 : (a) Image aérienne ; (b) Classification de matériaux de toit (Lemp and Weidner, 2004)

Néanmoins, cette méthode présente des problèmes de classification des matériaux de toiture dus à la variabilité des matériaux d'une part et la similitude des spectres de certains matériaux d'autre part. Ainsi, une classification basée seulement sur les données hyperspectrales reste difficile, bien que les données fournissent une haute résolution spectrale.

Une autre méthode a été développée plus spécifiquement pour classifier les matériaux de toiture dans la ville de Karlsruhe en Allemagne (Brand, 2005). Cette méthode s'est basée sur une application d'un masque (issu des données de balayage à laser) permettant de se focaliser uniquement sur les bâtiments (cf. Figure 75). Des données hyperspectrales ont été utilisées dans la classification. Les résultats de ce travail montrent que les matériaux en tuile et en cuivre sont bien classés. D'autres matériaux comme l'ardoise et les terrasses en bitume sont confondus à cause de la similitude de leurs courbes spectrales.

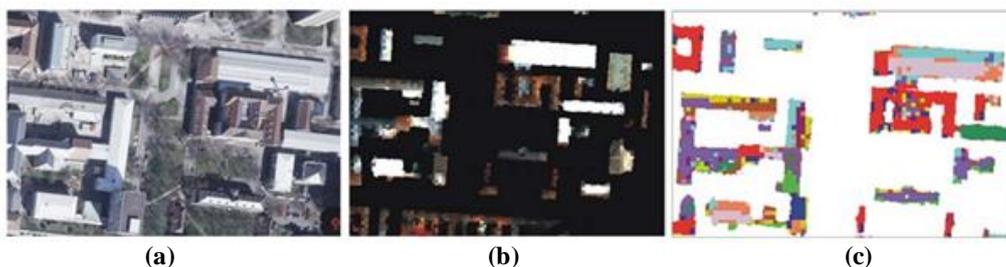


Figure 75 : (a) Image aérienne ; (b) Application du masque ; (c) Classification des matériaux de toitures (Brand, 2005)

Pour améliorer la classification à partir des données hyperspectrales, une étude plus récente a adopté une approche par analyses spectroscopiques utilisant un diagnostic des caractéristiques spectrales (Heiden *et al.*, 2007). Il s'agit de déterminer et d'évaluer des caractéristiques spectrales spécifiques à chaque matériau permettant d'éviter le chevauchement entre classes de matériaux et la variabilité dans une même classe. Pour atteindre cet objectif, l'analyse a été basée sur une bibliothèque de plus de 21000 spectres de matériaux utilisés dans des villes allemandes. Les résultats de cette étude montrent qu'une importante gamme de matériaux de toitures peut être identifiée en utilisant des données d'images hyperspectrales.

1.2. Méthode basée sur l'analyse des images multispectrales

L'imagerie « multispectrales » est une technologie développée à l'origine pour l'imagerie spatiale. Elle peut capter la lumière à partir des fréquences au-delà de la gamme de la lumière visible (rouge, vert et bleu), comme l'infrarouge.

Une méthode de classification des matériaux de toitures a été développée à partir de l'identification des fonctions de distribution de réflectance bidirectionnelle (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) des matériaux (Martinoty, 2005). En fait, l'identification d'un matériau dépend de la manière dont il est éclairé et de la direction dans laquelle on le regarde. En d'autres termes, le modèle BRDF estimé à partir d'images multispectrales permet de tenir compte de l'éclairage du matériau. La méthode a été appliquée au centre-ville d'Amiens (France) caractérisée par une majorité des toitures en ardoises. Une vérité-terrain des matériaux de toiture a été réalisée à partir des observations des toitures réelles. La méthode montre que les toitures en ardoise, en fibrociments et en asphaltes sont bien classées par rapport aux toitures en tuiles. Les résultats montrent un pourcentage global de bonne classification d'environ 85 %.

D'autres travaux ont entrepris une ventilation des surfaces des toits et par suite l'estimation des flux de polluants à des échelles spatiales importantes (Le Bris et Robert-Sainte, 2009; Robert-Sainte, 2009; Gromaire *et al.*, 2011). La méthode développée est basée sur la classification des matériaux de toiture à partir des ortho-images aériennes (multispectrales) et de données vecteurs (permettant une focalisation sur les bâtiments). Ces photos sont prises dans le domaine visible (sur trois canaux : rouge, vert et bleu) où la valeur de chaque pixel représente la radiométrie du matériau. Ainsi, cette méthode permet d'estimer les surfaces de toits et d'identifier les différents matériaux de toiture à l'échelle d'un bassin versant. Ces

photographies aériennes sont analysées à l'aide d'un outil de classification (nommé AVET⁵⁹) permettant d'obtenir une identification fiable des matériaux de rampants. La méthode inclut la segmentation de l'image en zones de radiométrie homogènes, de la focalisation sur le bâti (application d'un masque), une estimation du modèle à partir d'un apprentissage et la classification proprement dite. Cette méthode a été appliquée sur une partie de la ville de Noisy-le-Grand de 2,25 km². Les résultats obtenus montrent qu'environ 75% des surfaces des matériaux de toiture ont été bien classées.

Comme pour les méthodes d'analyse des images hyperspectrales, cette méthode de classification présente aussi des limites en termes de confusion entre les différentes classes (par exemple: zinc dans l'ombre et ardoises à la lumière).

Une étude récente de classification des matériaux de toitures développée en Malaisie (Tahezadeh *et al.*, 2013) a exploité les images multispectrales issues de données satellites (la résolution est de 50 cm). Quatre matériaux les plus utilisés en Malaisie ont été recherchés dans les toitures : la tuile en terre cuite, la tuile béton, les métaux (sans spécifier la nature) et l'amiante-ciment. Cette méthode a été appliquée sur une partie de la ville de Kuala Lumpur. Les mêmes principes ont été utilisés pour la classification que la méthode précédente (Le Bris et Robert-Sainte, 2009). Par contre, cette méthode utilise en plus de la radiométrie de l'image, l'information sur la texture ce qui permet de mieux identifier les matériaux de toitures. Les résultats obtenus montrent qu'environ 82% des surfaces des matériaux de toitures ont été bien classées.

1.3. Méthode de classification des toitures par rapport à leur planéité

Un modèle 3D a été développé au Royaume-Uni pour classer les bâtiments selon leurs toitures plates ou inclinées. Deux paramètres ont été pris en compte : la hauteur du bâtiment et l'inclinaison de la toiture (Alexander *et al.*, 2009). Ce modèle est basé sur l'utilisation d'une base de données de mode d'occupations de sol, de données topographiques et de données LiDAR⁶⁰ intégrant l'élévation des différentes structures d'une zone urbaine. La cartographie

⁵⁹ AVET (Automatic Vegetation Extraction Technique) est un logiciel de classification semi-automatique développé dans le laboratoire MATIS de l'IGN :(Trias-Sanz Boldo, 2005 ; Trias-Sanz, 2006).

⁶⁰ LiDAR (Light Detection And Ranging) est une technologie de télédétection ou de mesure optique. Son fonctionnement est le même que celui du radar, la différence étant le domaine spectral dans lequel il travaille et le type de faisceau utilisé. Le LiDAR couvre en particulier le domaine du visible, et également les domaines ultraviolet (UV) et infrarouge (IR) et utilise un faisceau laser. Alors que le radar fonctionne dans le domaine des ondes radio et utilise un faisceau électromagnétique classique, non polarisé.

LiDAR⁶¹ est considérée comme un outil permettant la reconstruction 3D des fonctions urbaines comme les bâtiments. Pour le développement du modèle 3D, ces différentes bases ont été exploitées et adaptées à l'aide du SIG en tenant compte des paramètres de modélisation.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de classer les bâtiments en fonction de leurs types de toitures plates ou inclinées. Mais elle ne permet pas d'aller plus loin dans l'identification des matériaux de toiture, peut-être faut-il la croisée avec d'autres informations. Dans notre méthode, avoir une classification des toitures par rapport à leur planéité est intéressant. En effet, les matériaux des toitures inclinées sont différents de ceux employés sur les toitures-terrasses.

1.4. Contraintes et limites des méthodes de reconnaissance automatique

L'avantage des méthodes de reconnaissance automatique des matériaux de toiture est qu'elles sont automatisables avec des outils de plus en plus développés. Par exemple, les méthodes basées sur l'analyse des données hyperspectrales présentent de bonnes performances en termes d'utilisation de différents spectres pour analyser les images et classer les matériaux de toiture. Ces méthodes évoluent au fil du temps pour gérer au mieux les problèmes de confusion entre différents matériaux de toiture et elles sont plus performantes (on peut atteindre 90% de bonne classification) que celle basée sur le traitement d'images multispectrales prises dans le domaine du visible. Néanmoins, l'imagerie hyperspectrale à très haute résolution spatiale reste assez rare et nécessite souvent des acquisitions spécifiques. En France, un projet soutenu par l'IGN et l'ONERA (Le centre français de recherche aérospatiale) est en cours de développement pour l'acquisition des données hyperspectrales pour les villes d'Amiens et Toulouse ([Adeline et al., 2013](#)). En revanche, les images multispectrales (rouge, vert, bleu, poche infra rouge) sont disponibles partout en France (la base BD-ORTHO).

Toutes ces méthodes présentent encore des problèmes de confusion entre certains matériaux. Il faudra noter aussi que les méthodes automatiques dépendent énormément des conditions

⁶¹ La cartographie LiDAR est une technologie émergente du domaine de la télédétection capable de produire rapidement une impressionnante densité de points 3D géoréférencés. L'exactitude des points est équivalente aux levés traditionnels mais avec un temps d'acquisition et de traitement nettement plus rapide que les méthodes aériennes conventionnelles (photogrammétrie).

d'entrée de l'analyse. En effet, la qualité et la résolution de l'image qu'elle soit hyperspectrale ou multispectrales (à 3 canaux de couleurs) influence énormément le résultat de la classification. Les résultats sont meilleurs en fonction d'une résolution plus fine de l'image (50 cm, 10 cm...). La qualité radiométrique joue un rôle important dans la classification : par exemple l'heure et la date de la prise de la photo. Ainsi, il est nécessaire de disposer d'une image de très haute résolution qui exige un coût élevé et qui n'est pas toujours disponible pour tous les cas d'étude.

De plus, la classification de l'image est basée sur un apprentissage, c'est-à-dire une attribution de spectres ou d'un modèle pour chaque matériau de toiture. Ainsi, dans l'outil AVET, si l'opérateur désigne cinq matériaux en entrée de son outil de classification, le classifieur se limite à classer toute l'image en uniquement ces cinq matériaux et n'est pas capable d'en identifier d'autres. Ceci implique que l'opérateur doit avoir une bonne connaissance du terrain d'étude pour ne pas oublier un matériau de toiture.

Il faudra noter aussi que l'identification de l'âge des matériaux est un paramètre important dans l'évaluation des émissions de contaminants par les matériaux de toiture. Or, les méthodes de classification d'images multispectrales ne permettent pas d'avoir cette information indispensable pour notre travail. De plus, ces méthodes ne permettent pas d'aller très loin dans l'identification des matériaux de toiture au-delà de l'appartenance à une famille donnée. Par exemple, il n'est pas possible de distinguer entre tuiles en terre cuite et tuiles en béton ou encore entre zinc naturel neuf, zinc ancien et même zinc prépatiné. Enfin, cette méthode permet d'évaluer uniquement les surfaces des rampants : les autres éléments de toit (gouttière, noue...), potentiellement producteurs de contaminants, ne sont pas repérés.

Par conséquent, pour développer notre méthode de quantification des dimensions des différents éléments de toit à l'échelle urbaine les méthodes décrites précédemment restent des outils limités actuellement. En revanche, ce que nous pouvons tirer de ces travaux est que l'image aérienne est un support intéressant et une base de données accessible gratuitement pour notre recherche via l'IGN. Il s'agit de la base BD-ORTHO (disponible pour toute la France). L'application d'un masque bâti est un moyen très intéressant permettant une focalisation uniquement sur les toitures. Ainsi, dans le développement de notre méthode nous allons utiliser cette approche en exploitant la base de données BD-TOPO permettant de donner la surface projetée des toitures et servira comme un masque bâti. Cette base sera croisée avec la BD-ORTHO. Nous n'allons pas utiliser les classifieurs semi-automatiques dans notre modèle à cause de leurs limitations. Par contre, ils serviront comme un moyen de

comparaison et de validation de notre méthode développée. Donc, nous avons besoin de trouver d'autres moyens pour exploiter au mieux les deux bases de données BD-TOPO et BD-ORTHO de manière à atteindre notre objectif de modélisation.

Pour ce travail, nous avons décidé d'effectuer une étude bibliographique sur les méthodes de modélisation urbaine de phénomènes différents. Il s'agit d'identifier les moyens utilisés pour atteindre les objectifs de la modélisation et de discuter leur utilité et leur transposabilité à notre recherche.

2. Méthodes de changement d'échelle

Pour mieux situer notre recherche, nous avons effectué une recherche bibliographique sur les méthodes développées pour évaluer, à grandes échelles, des phénomènes spécifiques se produisant à petites échelles spatiales. Ci-dessous, nous distinguons une méthode d'évaluation de l'impact du trafic sur la pollution de l'air à l'échelle européenne, des méthodes évaluant des problématiques liées à l'eau à grandes échelles et des méthodes évaluant des phénomènes liés au bâtiment à l'échelle urbaine.

2.1. Méthode d'évaluation de l'impact du trafic sur la pollution de l'air à l'échelle européenne (MEET)

Cette méthode (MEET) est développée pour estimer l'émission de polluants par les transports dans l'air. Elle a pour objectif d'orienter les politiques de choix et de tests des moyens de transports alternatifs pour limiter l'impact sur la pollution de l'air ([Hickman *et al.*, 1999](#) ; [Prud'homme *et al.*, 2011](#)).

L'évaluation de l'émission des polluants est basée sur l'estimation de la consommation de carburant par les véhicules. Pour cela un travail typologique a été effectué. Il s'agit de définir des catégories des véhicules en fonction :

- du type du véhicule (voitures de tourisme, véhicules légers, poids lourds, autobus, autocar);
- de la taille du moteur ;
- de l'âge du véhicule ;
- du carburant utilisé (essence ou diesel).

Ensuite, à chaque catégorie un taux d'émission de polluant (ex : dioxyde de carbone (CO₂), monoxyde de carbone (CO), hydrocarbures (HC)...) est affecté.

D'autres paramètres sont aussi intégrés dans le modèle tels que le type de la route (ex : autoroute), distance parcourue par le véhicule et sa vitesse moyenne. Pour une route donnée, l'estimation de l'émission est basée sur des données statistiques du trafic routier.

Cette méthode est générale et applicable à l'échelle européenne.

Le [Tableau 21](#) nous permet une comparaison de la méthode MEET par rapport à notre étude. Ainsi, cette méthode nous permet de déduire que pour résoudre la problématique de changement d'échelle nous avons besoin :

- d'effectuer une étude typologique des bâtiments par rapport à l'utilisation des matériaux de toitures;
- d'exploiter les données d'émission de contaminants, dans notre cas nous avons défini la notion de situation-type (cf. [Chapitre 2.2](#)) ;
- d'étudier les caractéristiques de l'échelle urbaine influençant l'utilisation des matériaux de toiture (ex : histoire urbaine, nombre de bâtiments) ;
- d'identifier et d'exploiter des données urbaines quantifiables (ex : base de données d'images aériennes).

Tableau 21 : Comparaison de notre étude et de la méthode MEET

| Références | (Hickman <i>et al.</i> , 1999 ; Prud'homme <i>et al.</i> , 2011) | Notre étude |
|--------------------------------|--|--|
| Echelle élémentaire | Véhicule | Toiture d'un bâtiment |
| Grande échelle | Route (ex : autoroute) | Urbaine (ex : ville) |
| Pistes de changement d'échelle | <ul style="list-style-type: none"> - Catégorie de véhicules - Taux d'émission de polluant pour chaque catégorie de véhicules - Identification des caractéristiques de la route (ex : type, longueur) - Données statistiques sur le trafic routier (ex : nombre de véhicules) | <ul style="list-style-type: none"> - Type de bâtiments - Flux unitaire pour chaque situation-type d'émission de contaminant par un élément de toit. - Identification des caractéristiques de l'échelle urbaine - Données urbaines (ex : nombre de bâtiments) |

2.2. Méthodes d'évaluation de problématiques liées à l'eau à grande échelle

Deux méthodes ont été repérées. La première a comme but de repérer à l'échelle d'un bassin versant les sites d'approvisionnement en eau de pluie. La deuxième vise à évaluer la qualité des eaux de ruissellement urbaines à l'échelle de la ville après l'intégration des systèmes de traitements des eaux dans les réseaux d'assainissement.

2.2.1. Méthode de repérage des sites d'approvisionnement en eau de pluie à l'échelle d'un bassin versant

En Afrique du Sud, les zones agricoles souffrent de la rareté des sources d'eau pour alimenter leurs cultures. Pour assurer un meilleur approvisionnement en eau, l'eau de ruissellement est collectée à partir de sites appropriés. Dans ce cadre, une méthode d'identification des sites susceptibles de collecter les eaux de ruissellement a été développée (de Winnaar *et al.*, 2007). La méthode a été développée à partir d'un site d'étude en zone agricole. Un travail a été effectué pour l'identification des bases de données et des critères permettant le repérage des sites de stockage de l'eau de pluie pour la distribuer de manière appropriée aux zones souffrant de la rareté de l'eau. Les critères identifiés sont le mode d'occupation du sol, le type du sol, la pente et les caractéristiques de la pluie. Chaque base de données a été traitée et adaptée à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) appelé ArcGIS⁶², ainsi des données numérisées facilement exploitables sont obtenues. Un ensemble de critères d'identification des sites de collecte d'eau ont été définis (par exemple, un sol peu argileux permet un meilleur drainage de l'eau). Pour tenir compte de ces critères les données acquises ont été interprétées sous forme de carte à l'aide d'ArcGIS. Enfin, le croisement des différentes cartes produites a permis d'obtenir une carte des sites appropriés pour la collecte d'eau de ruissellement.

Nous retenons de cette étude les principes suivants :

- qu'il est indispensable d'identifier les critères qui influencent le phénomène d'étude à grande échelle ainsi que les bases de données disponibles à cette échelle ;
- qu'un travail de cartographie des critères identifiés sera utile et qu'une exploitation des bases devra être effectuée.

Appliqués à notre cas d'étude, ces principes pourront se décliner de la manière suivante :

- nous chercherons à identifier les critères de choix des matériaux de toiture à l'échelle urbaine ainsi que les bases de données urbaines liées aux bâtiments. *A priori* nous disposons des bases d'occupation de sol ;
- l'exploitation de toutes ces informations sera assurée avec les outils SIG.

⁶² ArcGIS est un ensemble de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développés par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute, Inc.).

2.2.2. Méthode d'évaluation de la qualité des eaux de ruissellement après traitement à l'échelle de la ville

En Angleterre, une étude a été mise en place pour maîtriser les risques de pollution des eaux de ruissellement urbaines par l'intégration des systèmes de traitements des eaux dans les réseaux d'assainissement. Ainsi, une méthode d'évaluation des facteurs d'atténuation du risque de pollution a été développée. Cette méthode utilise un système intégré d'informations géographiques (SIG) basé sur une approche d'indice de pollution fondé sur les surfaces imperméabilisées, les concentrations des eaux de ruissellement et enfin la performance potentielle des traitements assurés par les systèmes d'assainissement (Ellis *et al.*, 2012). Une première étape consiste à identifier les facteurs influençant la qualité des eaux de ruissellement pluviales. Les principaux facteurs sont la nature, la surface et les indices de pollution des différents modes d'occupation de sol (chaussée, jardin...) sur lesquelles l'eau de pluie ruisselle. Dans un premier temps, les différents facteurs ont été combinés à l'aide de SIG pour évaluer la qualité de l'eau globale du site. Dans un deuxième temps, les systèmes de traitement dans les réseaux d'assainissement ont été intégrés dans le modèle pour évaluer leur impact sur la qualité de l'eau dans le site d'étude.

Cette méthode aussi repose sur un travail d'identification des facteurs influençant la qualité des eaux de ruissellement à l'échelle de la ville. Ce type de démarche sera adopté dans notre développement de méthode. En d'autres termes, il s'agira d'identifier les facteurs influençant l'utilisation des matériaux de toiture à l'échelle urbaine. De plus, à nouveau, les SIG se présentent comme un moyen efficace d'intégration de différentes informations à grande échelle pour atteindre l'objectif de la modélisation.

2.2.3. Conclusions sur les méthodes d'évaluation des problématiques liées à l'eau à grande échelle

Par rapport à notre recherche, les deux points intéressants sur ces deux méthodes sont que l'évaluation d'un phénomène à grande échelle nécessite tout d'abord un travail d'identification des critères ou des facteurs influençant le phénomène en question à l'échelle urbaine. Ensuite, ces critères ou facteurs devront être exploités à travers leur intégration dans des SIG. Les SIG permettent de traduire des informations identifiées sous formes de données numériques facilement exploitables. De plus, il s'agit d'exploiter les bases de données de mode d'occupation du sol en les adaptant par rapport à notre recherche à l'aide des SIG.

Ainsi, en croisant les critères cartographiés avec les données d'occupation du sol nous pourrions construire un modèle urbain spatial à grande échelle.

2.3. Méthodes d'évaluation des phénomènes liés au bâtiment à l'échelle urbaine

Depuis quelques années nous remarquons un besoin grandissant de modélisation des phénomènes liés au bâti à l'échelle urbaine. Dans sa nouvelle phase, le programme OPUR intègre cette préoccupation de la modélisation urbaine. Récemment un groupement GiSMu⁶³ d'intérêt scientifique à l'échelle nationale sur la modélisation urbaine a été créé. L'objectif de ce groupement est de faire converger les besoins entre les mondes de la recherche, de l'ingénierie, de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre dans le champ de la modélisation urbaine, depuis la gouvernance et la conception des villes jusqu'à leur exploitation. Il a pour vocation de promouvoir une approche plus intégrée de la modélisation urbaine en abordant les différentes échelles spatiales et temporelles, en intégrant un développement des villes plus durable, en étudiant différentes typologies de villes, et en explorant des domaines novateurs comme, par exemple, la modélisation des flux entrants et sortants de la ville (Tapadinhas *et al.*, 2012).

Dans cette section, nous allons présenter quelques méthodes d'évaluation de phénomènes liés au bâtiment à l'échelle urbaine. Nous distinguons l'évaluation des performances des toitures végétalisées, l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments à l'échelle urbaine, l'évaluation de l'impact potentiel de l'utilisation de l'eau de pluie dans le bâtiment sur les consommations d'eau potable et l'évaluation des émissions des biocides par les façades à l'échelle urbaine.

2.3.1. Méthode d'évaluation des performances des toitures végétalisées

En Chine, une méthode d'évaluation de la performance des toitures végétalisées intégrées dans une zone urbaine a été développée (Hongbing *et al.*, 2011). Il s'agit d'évaluer les économies d'énergie, la réduction du bruit et de la pollution de l'air, la gestion de l'eau de pluie par rapport à une zone urbaine sans toitures végétalisées. Cette méthode a été conçue à l'aide de l'utilisation d'un SIG et de Google Earth en suivant différentes étapes. La première consiste à identifier les besoins du modèle en termes de données (disponibilité des toitures

⁶³ <http://www.urban-modelling.org/>

végétalisées, données sur la température, données pluviométriques ...). Ensuite, une recherche et une identification des bases de données existantes ont été effectuée (ex : utilisation des images 3D de Google Earth). Chaque base a été exploitée et intégrée dans le modèle à l'aide du SIG. Enfin, un calcul des performances des toitures végétalisées dans la zone d'étude est effectué.

Cette méthode nous donne une idée sur l'approche à suivre pour évaluer un phénomène lié au bâtiment (ici les toitures végétalisées) à l'échelle urbaine. Dans notre travail nous nous intéressons aux matériaux de toiture donc la problématique est proche. Ainsi, les démarches de cette méthode semblent être transposables à notre étude. Il s'agit donc d'un travail d'identification des besoins de notre modèle en termes de données, la recherche de bases de données urbaines et enfin l'intégration et l'exploitation de ces données à l'aide de SIG.

2.3.2. Méthodes d'exploitation et d'évaluation de la performance énergétique des bâtiments à l'échelle urbaine

Une méthode d'évaluation de la performance énergétique des bâtiments à l'échelle nationale ([Loga et Diefenbach, 2010](#)) a été développée en se basant sur l'utilisation des typologies des bâtiments. Dans cette étude, le projet intitulé « *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment –TABULA-* » avait pour but de trouver une définition commune de la typologie des bâtiments dans les pays d'Europe. Cette nouvelle définition sert en tant que plateforme pour la compréhension mutuelle de la consommation énergétique des bâtiments et l'élaboration de mesures de réduction de cette consommation. Un ensemble de paramètres a été identifié pour la nouvelle classification des bâtiments, parmi lesquels : le pays, la région ou zone climatique, la taille de la construction, le type du bâtiment (individuel ou collectif), son âge (avant 1946, entre 1946-1970...), ses caractéristiques géométriques (forme du bâtiment...).

Une autre méthode a été développée pour estimer la répartition géographique de la surface de toit disponible à grande échelle pour l'installation des systèmes photovoltaïques en Espagne ([Izquierdo et al., 2008](#)) et en Italie ([Bergamasco et Asinari, 2011](#)). Ces travaux sont basés sur des données urbaines telles que la densité de la population et le mode d'occupation du sol issus de la base de données Corine Land Cover⁶⁴.

⁶⁴ *Corine Land Cover* est une base de données européenne d'occupation biophysique des sols. Ce projet est piloté par l'Agence européenne de l'environnement et couvre 38 Etats. La partie française est réalisée par le Service de l'Observation et des Statistiques du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) du

Une méthode a été développée en France afin d'évaluer et exploiter le potentiel énergétique lié au bâtiment à l'échelle de la ville (Alessandrini, 2011). Devant la complexité de l'échelle et la multitude de paramètres, une approche typologique a été privilégiée. Il s'agit de regrouper les territoires en fonction de leurs ressources énergétiques. La ville a été découpée en différentes zones : centre-ville avec logements et activités tertiaires, banlieue 1960, village ou périurbain ville nouvelle, zone industrielle...

Si dans ces études les matériaux de toiture n'ont pas été pris en compte, les méthodes développées reposent sur des principes tout à fait intéressants pour notre recherche. Ce que nous retenons c'est qu'il faut effectuer un travail de repérage des paramètres influençant le phénomène d'étude, dans notre cas l'utilisation des matériaux de toiture, à l'échelle urbaine. De plus, le principe de découpage de l'échelle urbaine par rapport à la typologie des bâtiments a été utilisé. Il s'agit d'exploiter les bases d'occupation de sol permettant d'évaluer et exploiter la performance énergétique en fonction de la typologie des bâtiments. Ainsi, dans notre recherche il sera intéressant de créer des typologies de bâtiments par rapport à l'utilisation des matériaux de toiture en exploitant une base de modes d'occupation de sol existante.

2.3.3. Méthode d'évaluation de l'impact potentiel de l'utilisation de l'eau de pluie dans le bâtiment sur les consommations d'eau potable à l'échelle urbaine

Dans le cadre d'une étude sur le développement de la récupération de l'eau de pluie à grande échelle (Belmeziti *et al.*, 2013), la base MOS de l'IAU-IDF (cf. Chapitre 2.1) a été utilisée et adaptée de manière à créer de nouvelles typologies de bâtiments ayant un comportement analogue au regard de l'eau de pluie. Dans cette étude, la base MOS a été utilisée dans sa dernière version disponible, avec des données de 2008. Ainsi, 13 types de bâtiments ont été dégagés dans cette étude : habitat individuel, habitat collectif, habitat autre (prison, auberge...), activités secondaires, sport, bureaux, enseignement, surfaces commerciales, grands équipements (eau, gaz...), autres équipements, transport, enseignement 1^{er} degré, équipement de santé.

L'utilisation des matériaux de toiture dépend énormément du type de bâtiments. Ainsi, l'exploitation de la base d'occupation de sol MOS (dans sa dernière version disponible celle de 2008) sera choisie, dans notre recherche, comme base de données urbaines qui nous

permettra de créer de nouvelles typologies de bâtiments par rapport à l'utilisation des matériaux de toiture.

2.3.4. Méthode d'évaluation des émissions des biocides par les façades à l'échelle de la ville

Une méthode a été développée pour évaluer les émissions de biocides dues au lessivage des façades par temps de pluie à l'échelle de la ville (Coutu *et al*, 2012). Cette méthode a été appliquée à la ville de Lausanne en Suisse. Le modèle élaboré comprend deux étapes. La première consiste à étudier à l'échelle du bâtiment le phénomène de lessivage de biocides pour une seule façade. Un taux d'émission a été défini et calibré dans les conditions expérimentales contrôlées au laboratoire. La deuxième étape consiste à extrapoler le modèle d'émission produit à l'échelle expérimentale vers l'échelle de la ville. Ainsi, une identification des différents paramètres influençant l'émission a été effectuée. Il s'agit de la surface de la façade, sa hauteur (approximée par la hauteur du bâtiment) et l'âge de la peinture de la façade. La surface et la hauteur de la façade sont estimées à l'aide des SIG. Pour l'estimation de l'âge de la peinture une approche stochastique (calcul probabiliste) a été développée. Cette approche est croisée avec des données de marché sur la durée de vie d'une peinture estimée à 5 ans en moyenne. Ainsi, l'âge de la peinture suit une loi de Poisson de moyenne 5 ans.

Cette méthode est très proche de notre travail. Elle a permis de mettre au point un modèle d'émission à l'échelle unitaire (la façade). Dans notre cas d'étude nous avons étudié le phénomène d'émission de contaminant par les matériaux de toiture en définissant la notion de situation-type au niveau de la toiture (cf. Chapitre 2.2). Ensuite, les étapes de l'extrapolation pourront être suivies dans notre méthode. Ainsi, un travail d'identification des paramètres influençant l'émission de contaminant par les matériaux de toiture à l'échelle de la ville sera élaborée. La méthode d'évaluation de ces paramètres à l'échelle de la ville dépendra des bases de données existantes. Nous pourrions utiliser un SIG et recourir à des démarches probabilistes ou statistiques.

2.4. Les 3 étapes d'un changement d'échelle

Dans la littérature, l'évaluation à l'échelle urbaine d'un phénomène donné fait intervenir un ensemble d'opérations, certaines spécifiques à l'objectif de l'étude, d'autres communes à toutes les études. Les points communs se résument en trois principales étapes :

- Une première étape consiste à identifier les critères ou les paramètres ou les facteurs influençant l'évaluation du phénomène à l'échelle urbaine.
- Ensuite, un travail de repérage des bases de données existantes permettant l'accès à une information urbaine est effectué. L'avantage de ces bases c'est qu'elles sont disponibles sous forme numérique et permettent d'avoir des informations à l'échelle urbaine. Elles ne permettent pas directement d'avoir les résultats voulus, mais elles sont utilisées et adaptées en fonction de l'objectif de la recherche. Ainsi, une interprétation et une exploitation des bases de données sont effectuées en tenant compte des paramètres identifiés par rapport à l'objectif de l'étude. Par exemple, création de nouvelles typologies de bâtiments à partir des bases de données de mode d'occupation de sol, cartographie des critères sous forme de cartes numériques etc. La plupart de ces opérations de traitement de données sont effectuées à l'aide des SIG qui permettent aussi d'intégrer et de croiser les données traitées ensemble et d'avoir des données spatialisées pour atteindre l'objectif final de la recherche.
- Des approches probabilistes ou statistiques peuvent être développées pour l'évaluation de certains paramètres à l'échelle urbaine.

Dans notre méthode, nous allons nous inspirer des méthodes précédentes. Ainsi, nous proposons de développer une nouvelle méthode globale de quantification des dimensions des matériaux de toiture à l'échelle urbaine. Cette méthode est basée sur l'utilisation des photos aériennes (BD-ORTHO) d'une part et d'autre part sur l'utilisation et l'exploitation des données urbaines existantes en définissant de nouvelles approches sans avoir besoin de faire une description toit par toit ce qui reste un travail très fastidieux.

Pour développer cette méthode, nous allons commencer par identifier les critères de choix d'un matériau de toiture à l'échelle urbaine (cf. [Section 3](#)). Un travail approfondi de ces critères permettra d'identifier ceux qui demeurent pertinents à l'échelle urbaine et seront par la suite cartographiés à l'aide de SIG. Ensuite, nous allons exploiter les différentes bases de données urbaines existantes. La base d'occupation de sol MOS IAU-IDF nous permettra de créer des typologies de bâtiments par rapport à l'utilisation des matériaux de toiture (cf. [Chapitre 2.4](#)). La base BD-TOPO fournit les surfaces des toitures. L'intégration de toutes ces données sera gérée par SIG (cf. [Chapitre 3.1 et 3.3](#)). Enfin, nous exploiterons l'idée d'évaluation de certains paramètres à l'aide de méthodes statistiques ou probabilistes (cf. [Chapitre 3.2](#)).

3. Critères de choix des matériaux de toitures

Pour comprendre le processus de choix d'un matériau de toiture à l'échelle urbaine, il faut étudier l'interaction entre toit et échelle urbaine, les différents aspects d'intégration du toit dans une échelle urbaine donnée : *comment est-il choisi, quelles caractéristiques lui attribue-t-on ?*

Dans ce cadre, nous avons effectué une étude bibliographique scientifique et technique pour identifier les différents facteurs influençant l'utilisation d'un matériau sur les différents éléments de toiture (rampant, éléments d'évacuation d'eau de pluie, éléments d'étanchéité) que ce soit au niveau du bâtiment ou à l'échelle urbaine. Il s'agit aussi d'analyser le travail bibliographique effectué dans les deux [Chapitres 1.1 et 1.2](#). Cette étude montre qu'une toiture d'un bâtiment donné est extrêmement dépendante de son histoire (date de construction, renouvellement), de son environnement extérieur (quartier, ville...) et intérieur (architecture du bâtiment, type, taille ...). Donc, pour mieux identifier les matériaux de toit à l'échelle urbaine, il faudra, d'une part, étudier et comprendre le processus de construction de l'échelle urbaine (urbanisme, histoire, caractéristiques...) ([Merlin, 1989](#); [Le Xuan, 2011](#)). D'autre part, il faudra déterminer les réglementations (ex : plan local d'urbanisme (PLU), Documents techniques unifiés (DTU)) ainsi que les décideurs (architectes, aménageurs...) du choix des matériaux de couverture.

L'identification de tous les critères permettra de garder ceux pertinents à l'échelle urbaine, il s'agit de l'objet de la [Section 4](#).

Les matériaux de construction dans le domaine de l'architecture font l'objet de nombreuses études depuis plusieurs années. Dans ces études les matériaux sont traités sous des angles et dans des domaines bien spécifiques. Nous distinguons de nombreux ouvrages qui s'intéressent à un matériau spécifique comme le bois ([Asensio, 2005](#)). La plupart de ces études se focalisent sur les propriétés techniques, esthétiques du matériau et ses effets sur la santé ([Bathias et Bailon, 1980](#); [Deoux et Deoux, 2004](#); [Cousanet, 2005](#)). D'autres études ont vu le jour avec l'émergence des démarches environnementales dans les années 1990. Ils abordent de manière globale les différents aspects traités lorsqu'il est question d'écologie et de préservation de nos ressources ([Wines, 2000](#); [Gauzin-Müller, 2001](#); [Oliva et al., 2002](#)).

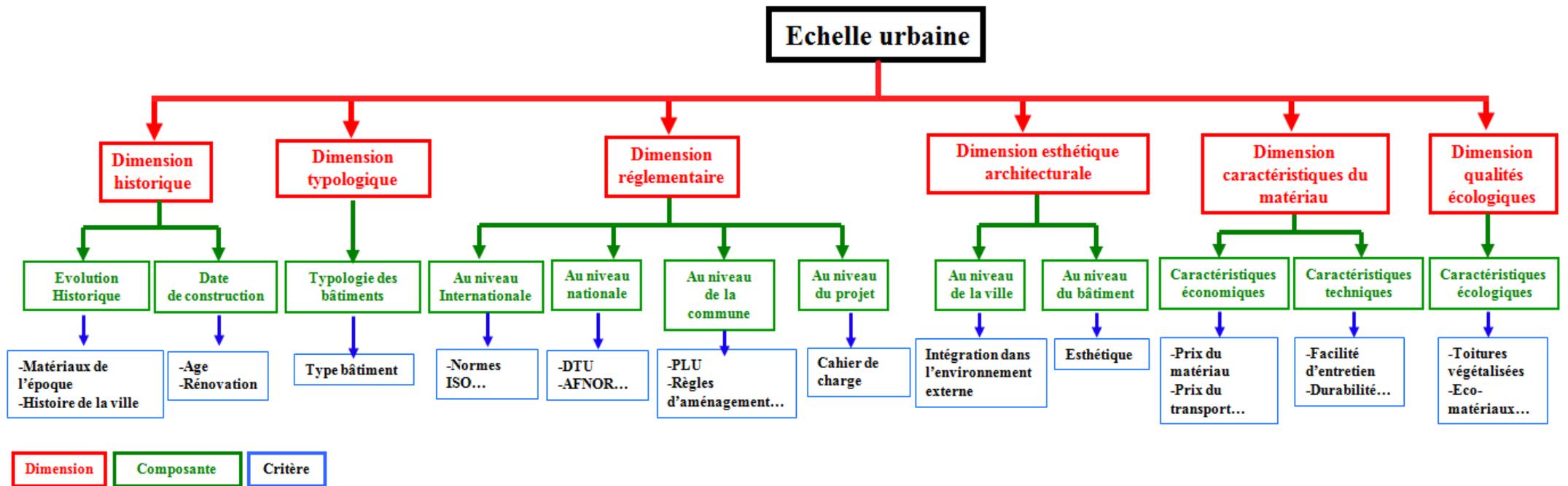
Cette diversité de matériaux de construction ainsi que les études sur leurs caractéristiques montrent que le choix d'un matériau dans un projet de construction est une tâche complexe et délicate. Ceci a incité certains travaux ([Fernandez, 2010](#); [Tornay, 2010](#); [Ogunkah et Yang,](#)

2012) à étudier les critères de choix des matériaux dans un projet de construction dans le but de développer des modèles pour faciliter le processus de sélection des matériaux. En effet, à l'échelle de l'architecture, le choix des matériaux s'effectue principalement autour de trois critères : *technique, usage et esthétique* (Tornay, 2010). A cette échelle, selon les périodes, les différents courants de pensée, les effets de modes, ou la sensibilité des concepteurs, l'importance relative donnée à chacun de ces trois critères diffère selon les projets (Tornay, 2010). Une autre étude plus détaillée (Fernandez, 2010) décline les critères de choix des matériaux de construction en cinq niveaux de critères allant d'un niveau très global à un niveau très spécialisé. Cette étude a été faite dans le but de développer une approche d'aide à la décision pour les architectes dans le choix du matériau de construction.

Nous avons analysé ces différentes études pour ressortir les principaux critères de choix des matériaux qui nous aideront à comprendre le processus d'utilisation des matériaux de couverture à l'échelle urbaine dans le cadre de notre recherche. De ce fait, nous devons faire un choix des différents critères, décrits dans les études précédentes, qui mettent en interaction trois entités : *la toiture, le bâtiment et l'échelle urbaine*. En effet, en plus des caractéristiques propres du matériau, le choix de matériaux de toiture dépend aussi du type de bâtiment, des caractéristiques urbanistiques (règles d'urbanisme, démarche d'intégration dans la ville...) et réglementaires de l'échelle urbaine.

L'analyse bibliographique que nous avons effectuée, nous a permis de classer les différents critères de choix de matériau de toiture en six dimensions : dimension historique, dimension typologique, dimension réglementaire, dimension esthétique architecturale, dimension caractéristiques du matériau et dimension qualités écologiques. Chaque dimension comporte des composantes qui regroupent un ensemble de critères déterminant le choix d'un matériau (cf. Figure 76).

Figure 76 : Critères de choix des matériaux de toiture



3.1. Dimension historique

Cette dimension se décline en deux composantes : une première liée à l'évolution historique (d'une part les matériaux de l'époque et d'autre part l'histoire de l'urbanisation de l'échelle urbaine), une deuxième concernant la date de construction des bâtiments (qui permet d'identifier la possibilité d'avoir des rénovations).

3.1.1. Evolution historique des villes

Dans le [Chapitre 1.2](#), nous avons montré l'importance du facteur temporel sur le choix et l'utilisation d'un matériau de couverture dans une échelle urbaine donnée.

En effet, jusqu'au milieu du 19^{ème} siècle, la majorité des habitants des pays développés habitaient en milieu rural, dans des constructions réalisées selon les traditions régionales, les savoir-faire des artisans et les matériaux disponibles localement ([Wignacourt, 2009](#)). Avec l'ère industrielle du 19^{ème} siècle, les villes ont connu une croissance fulgurante (par exemple de 1850 à 1970, la population de Paris double). Pour faire face à cette croissance, de nouvelles formes de planification et d'interventions vont apparaître. Cet accroissement des grandes villes, le capitalisme, ainsi que le souci urbanistique, créent un bouleversement architectural en Europe et aux Etats-Unis. C'est une véritable révolution industrielle caractérisée par l'apparition de nouveaux matériaux de construction, qui permettent l'élaboration d'immeubles plus nombreux et des édifices plus vastes. Un nouveau paysage urbain se dessine : l'apparition de nouveaux bâtiments tels que l'usine, une modification et une évolution des moyens de production d'où l'apparition de nouveaux matériaux dans des dimensions et des quantités importantes ([AOCDTF, 1989](#); [Fernandez, 2010](#)).

Au début du 20^{ème} siècle, la tendance était au matériau universel, capable de couvrir tous les types de toits. Ainsi, la tuile mécanique comme un modèle standard suffisamment efficace, avec un réseau de distribution bien ramifié, pouvait s'octroyer une grande partie du marché. Grâce au développement des technologies de construction et de fabrication, les matériaux de couverture industriels se sont énormément diversifiés. Cette variété se retrouve à l'échelle d'une agglomération actuelle où voisinent une grande quantité de matériaux différents dont l'unité est difficile à retrouver, si ce n'est dans les formes traditionnelles du passé ou dans les couleurs, parfois, grâce aux réglementations pour la protection des sites ([AOCDTF, 1989](#)). A partir du milieu du 20^{ème} siècle, nous observons une standardisation de différentes familles de

matériaux de construction et une dépendance aux matériaux préfabriqués et prêts à l'emploi (Bajard, 2006).

Ce mouvement historique a toujours suscité l'intérêt des architectes qui essaient d'exploiter les nouveaux matériaux pour avoir de nouveaux aspects architecturaux. Les formes des toits sont évoluées (Belhoste, 1997) avec une utilisation des métaux comme matériaux de toit vu la facilité de leurs façonnages.

Nous concluons, du croisement de l'évolution historique des matériaux de toiture avec l'histoire de l'urbanisation des villes (cf. Chapitre 1.2), que le véritable développement des matériaux de construction a commencé avec la révolution industrielle.

3.1.2. Date de construction

L'âge de la toiture est une donnée nécessaire dans notre étude, en effet l'émission d'un contaminant dans les eaux pluviales varie en fonction de l'âge du matériau (Odnevall Wallinder *et al.*, 1998; Robert-Sainte *et al.*, 2009). Or, un matériau de construction a une durée de vie (MSI, 2006). Par exemple le zinc a une durée de vie entre 40 et 50 ans alors que le plomb a une durée de vie qui peut aller jusqu'à 200 ans (MSI, 2006). Une fois cette durée atteinte, le matériau doit être changé, par le même matériau ou par un autre. Ce renouvellement dépend d'une part du propriétaire qui a envie de changer l'aspect de sa toiture ou des contraintes réglementaires ou de l'époque (ex : effet de mode). Certains matériaux n'existent plus sur le marché, d'autres ont été interdits ou encore participent à un effet de mode (des matériaux nouveaux très commercialisés). En croisant la durée de vie du matériau, la période de construction de la toiture et en repérant les réglementations dans la zone d'étude, nous pouvons estimer la probabilité que les toitures aient été rénovées ou non.

3.2. Dimension typologique

Les travaux menés à l'échelle des bassins versants montrent que les émissions de contaminants dans les réseaux d'assainissement dépendent énormément du mode d'occupation du sol. En effet, pour les contaminants métalliques (Zn, Cu, Pb, etc.) leurs émissions sont plus importantes dans une zone industrielle ou commerciale que dans une zone résidentielle (Wong *et al.*, 2000; Joshi et Balasubramanian, 2010). Ces différences peuvent s'expliquer principalement par les caractéristiques du mode d'occupation du sol en termes des fonctions qu'il abrite et par les types de bâtiments. Dans notre cas d'étude, la source d'émission est la toiture d'un bâtiment donné. Dans un mode d'occupation de sol donné nous

aurons une typologie particulière de bâtiments et donc des émissions de contaminants spécifiques.

En effet, le bâtiment est une structure architecturale qui a comme fonction principale d'abriter des personnes et/ou des activités ou des produits. Cette fonction du bâtiment influe fortement sur sa conception et sa construction. De ce fait, les bâtiments sont généralement classés par rapport à leurs fonctions (Beltrán et al., 2010). Cette classification des bâtiments peut être très générale comme elle peut être très détaillée en fonction de ses objectifs. Un premier niveau de classification conduit à énumérer des fonctions globales comme : logements, bâtiments d'activités, des équipements etc. Un deuxième niveau de classification sert à décomposer les premières classes en sous-classes en différenciant les bâtiments par d'autres critères. Par exemple, les logements comportent des habitats collectifs et des maisons individuelles alors que les équipements comportent des bâtiments de santé, d'enseignement... Ainsi une grande variété de bâtiments aux fonctions variées se présente.

Chaque type de bâtiment présente une structure particulière qui engendre des toitures sous différentes formes (inclinée, plate, voûte...). Par exemple, les bâtiments religieux présentent des toitures particulières sous formes de voûte. Les installations de sport ont aussi des couvertures particulières sous forme de coupole ou autre. Les maisons individuelles ont généralement une toiture inclinée. De ce fait, l'utilisation des matériaux de toitures dépendra énormément de la typologie du bâtiment. Ceci est confirmé par l'étude de marché (MSI, 2006). Ainsi, les tuiles en terre cuite sont principalement utilisées pour la couverture de logements individuels. Les couvertures métalliques en acier sont principalement utilisées pour des bâtiments industriels et bâtiments tertiaires.

3.3. Dimension réglementaire

Cette dimension s'intéresse à l'ensemble des mesures légales, règlements, lois qui influencent l'utilisation des matériaux de toit au niveau du bâtiment, à l'échelle de la ville, à l'échelle nationale et à l'échelle internationale sachant que ce corpus évolue dans le temps.

A l'échelle internationale, des réglementations interdisent l'utilisation de certains matériaux. Ainsi, l'amiante a été interdite à cause de ses effets nocifs sur la santé. En 1997, la France rejoint les 7 autres pays européens (Allemagne, Italie, Danemark, Suède, Pays-Bas, Norvège et Suisse) pour l'interdiction de toute fabrication, importation ou commercialisation de l'amiante. D'autres réglementations s'intéressent aux exigences thermiques ou écologiques

des matériaux. Nous citons les normes internationales de l'ISO (International Standard for Organisations) qui fournissent des principes généraux qui guident les déclarations et les étiquetages environnementaux, ISO 14 020 (Wignacourt, 2009).

A l'échelle nationale, nous trouvons comme normes pour les matériaux de couvertures les DTU accompagnés des Avis Techniques et les normes AFNOR qui attestent la conformité des produits aux exigences réglementaires européennes (cf. Chapitre 1.1 et Chapitre 1.3). Les industriels s'appuient sur ces normes pour produire les matériaux et essayer d'être en conformité avec elles. La nouvelle réglementation thermique (RT 2012) a pour objectif de limiter les consommations énergétiques des bâtiments neufs qu'ils soient pour de l'habitation (résidentiel) ou pour tout autre usage (tertiaire)⁶⁵.

A l'échelle urbaine, le PLU peut représenter une contrainte réglementaire importante dans le choix des matériaux. Il comporte une description des projets de construction, le découpage en zones qui peut induire une urbanisation spécifique et donc des matériaux de toiture imposés (ex : ZUP : zone à urbaniser en priorité, ZAC : zone d'aménagement concerté), les quartiers, le contexte d'aménagement...

D'après l'étude de marché des matériaux de couverture (MSI, 2006), l'utilisation de la terre cuite a été favorisée par l'action des collectivités locales qui ont incité, dans certaines régions, le recours à des toitures inclinées au lieu de toitures-terrasses. De plus, les aménageurs peuvent exiger ou inciter à l'utilisation d'un matériau de couverture pour des objectifs divers.

A l'échelle du bâtiment, au niveau du projet de construction, certaines mesures sont prescrites par le client ou l'architecte pour utiliser un matériau donné dans le cahier des charges défini par le maître d'ouvrage (Tornay, 2010).

3.4. Dimension esthétique architecturale

L'esthétique est un critère de choix du matériau. En effet, le toit avec ses différents éléments doit être en harmonie avec les autres composantes du bâtiment (ex : façade). De plus, le bâtiment doit être intégré dans son environnement extérieur et doit être en cohérence avec les bâtiments existants. Cette cohérence peut se définir par un matériau unique ou une couleur unique. Par exemple dans certaines zones (région, commune...), un même matériau est utilisé pour préserver l'image de la zone, c'est le cas de la Bretagne (France) où les toitures sont en ardoise. De plus, un type de matériau peut être imposé dans un projet pour être en harmonie

⁶⁵ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Chapitre-I-La-reglementation.html> (consulté le 22/01/2014)

avec les bâtiments voisins (par exemple exiger un matériau ou une couleur unique pour les toits d'un quartier). Ceci s'intègre généralement dans le cadre du paysage dessiné pour la ville. En effet, au début du 20^{ème} siècle les nouveaux mouvements architecturaux et urbanistiques imposent une esthétique nouvelle qui met en interaction la ville et ses éléments (ex : bâtiments, jardin, route...). Il s'agit de créer une harmonie entre les différentes composantes de la ville du point de vue structure, couleur, organisation...(Estienne-Duval, 2010).

3.5. Dimension : qualités écologiques

Nous assistons aujourd'hui à une tendance à respecter l'environnement (Fourrier et Monique, 2006), soit par des matériaux non nocifs, appelés alors éco-matériaux (Wignacourt, 2009), soit par la nouvelle tendance des toitures végétalisées qui pourraient contribuer à un milieu plus sain par exemple par la réduction du réchauffement climatique (Kokogiannakis et al., 2011). Cette démarche environnementale fait apparaître de nouveaux critères dans le choix des matériaux de construction (Bornarel, 2003) qui se déclinent en trois catégories : économie de ressources, maîtrise des risques sur l'environnement et maîtrise des risques sur la santé. Parmi ces critères nous pouvons citer, sans exhaustivité la prise en compte de l'empreinte énergétique, la consommation de ressources, la pollution, les déchets, etc. (Wines, 2000; Gauzin-Müller, 2001).

3.6. Dimension : caractéristiques du matériau

Cette dimension englobe les caractéristiques du matériau influençant son utilisation sur une toiture. Il s'agit des caractéristiques économiques et techniques.

3.6.1. Caractéristiques économiques

Le choix des matériaux de couverture dépend souvent en grande partie de son coût. Ce dernier se décline en différentes composantes (Wignacourt, 2009; Fernandez, 2010; Tornay, 2010) :

- prix du matériau : certains matériaux sont chers par rapport à d'autres (ex : zinc par rapport à l'acier) ;
- prix du transport : pour les matériaux non locaux, leurs frais de transport en augmentent le coût ;

- prix de la pose : les coûts de main d'œuvre peuvent être élevés lorsque le matériau est difficile à poser. Par exemple les toitures métalliques sont plus faciles à mettre en œuvre que les tuiles car elles se présentent sous la forme de grands panneaux et non en petits éléments (MSI, 2006) ;
- frais d'entretien : certains matériaux (ex : tuile terre cuite) nécessitent un entretien ce qui peut être moins apprécié par rapport d'autres pour lesquels ce n'est pas le cas.

D'une manière générale, tout projet est soumis à une enveloppe budgétaire qui fait apparaître le critère économique dans le choix des matériaux (Tornay, 2010). Il s'agit d'un critère particulièrement complexe (fluctuation économique, impact du coût de la mise en œuvre, variation des tarifs, etc.) qui fait l'objet d'études spécifiques. Par exemple, si le budget est limité, le matériau le moins cher est privilégié. D'après les experts de la couverture, les matériaux tel que : acier galvanisé, ardoise fibre ciment, bardeaux bitumineux, tuile métallique, sont classés dans la catégorie matériaux économiques.

3.6.2. Caractéristiques techniques

Le choix du matériau de couverture dépend aussi de la forme et des accidents du toit (ex : toiture inclinée, terrasse), ce qui oriente généralement vers des matériaux faciles à mettre en œuvre. En fait, les toitures-terrasses sont préférées par certains architectes notamment pour les habitats collectifs (source : entretien avec les architectes⁶⁶) vu la facilité de leur mise en œuvre. Les toitures inclinées ou qui présentent une forme particulière posent plus de problèmes. La pente du toit nécessite un matériau facile à mettre en œuvre.

Ce critère technique comprend différentes composantes (Wignacourt, 2009; Fernandez, 2010):

- la performance technique : en termes de résistance mécanique, thermique et acoustique ;
- la durabilité : un matériau qui présente une longue durée de vie et résistance à l'usure donc une nécessité de renouvellement limité par exemple tous les 50 ans ;
- les propriétés physiques : nous pouvons citer sans exhaustivité la densité, la diffusivité, la conductivité thermique, la capacité thermique, le coefficient de résistance à la vapeur d'eau, la résistance à l'écrasement, l'affaiblissement acoustique, etc. ;

⁶⁶ Entretiens effectués dans le cadre d'un stage de master M1 en géographie : d'Allens, P., et Prigent, P. (2012) Stratégies de choix des matériaux de toitures dans la ville de Créteil LEESU.

- la qualité architecturale : un matériau qui offre une facilité de façonnage pour s'adapter à différentes formes de toit (ex : les métaux) ;
- la facilité d'entretien : un matériau qui ne nécessite pas un entretien régulier et de produits d'entretiens coûteux.

Par cette étude bibliographique, nous avons repéré plusieurs critères influant sur le choix d'un matériau de toiture. A ce niveau la question qui se pose est : *Comment ces critères peuvent-ils nous aider à mieux identifier et quantifier les matériaux utilisés sur les différents éléments de toiture à l'échelle urbaine ?*

4. Principes de découpage de l'échelle urbaine en entités homogènes

D'après les travaux décrits dans la littérature (cf. [Sections 1 et 2](#)), les critères identifiés dans la [Section 3](#) nécessitent un travail d'analyse et d'interprétation de manière à ressortir des moyens ou des outils d'identification des matériaux de toitures opérationnels à l'échelle urbaine. De plus, il faudra effectuer un repérage des bases de données urbaines permettant de près ou de loin d'accéder à une quantification des matériaux de toitures. Notons que nous avons organisé des entretiens avec les experts des matériaux de toitures dans le but d'obtenir des règles de quantification des matériaux de toiture, objectif du [Chapitre 2.4](#). Ces entretiens ont été une source d'informations très riches qui nous ont permis d'alimenter l'interprétation des critères de choix des matériaux de toiture. Les différents experts interrogés ainsi que les entretiens seront présentés et détaillés dans le [Chapitre 2.4](#).

Donc, l'exploitation des bases de données urbaines repérées croisée avec l'analyse des données bibliographiques du [Chapitre 1.2](#) et les données des entretiens nous ont permis de ressortir des *principes* permettant de découper l'échelle urbaine en entités homogènes en termes de répartition des matériaux de toitures. Il s'agit de grouper les bâtiments par rapport à leur matériau de toiture selon un ensemble de principes. Ainsi, trois types de critères ont été identifiés :

- *des critères qui aboutissent à des principes généraux, c'est-à-dire applicables à toute échelle urbaine ;*
- *des critères donnant des principes spécifiques à l'échelle urbaine étudiée ;*

- *des critères spécifiques non objectivables* : ce sont des critères ayant un caractère singulier, c'est-à-dire qui ne peuvent pas être transposés à grande échelle et donc ne donnent lieu à aucun principe.

4.1. Principes généraux

Deux principes généraux, applicables à toute échelle urbaine, ont été identifiés :

- *A chaque période historique correspond une répartition spécifique de matériaux de toitures ;*
- *A chaque classe de bâtiment correspond une répartition spécifique des matériaux de toitures.*

4.1.1. A chaque période historique correspond une répartition spécifique de matériaux de toitures

Dans le [Chapitre 1.2](#), nous avons montré que les matériaux de couverture se développent au fil du temps : des matériaux apparaissent, d'autres disparaissent et d'autres évoluent. Ce mouvement historique influence énormément leurs utilisations sur les toitures. Néanmoins, cette évolution historique a été caractérisée par les experts – Mme Texier (Historienne), M. Normand (Ingénieur au CSTB), M. Boisseau (Syndicat des entreprises de couverture) et M. Vaillant (Historien urbaniste) – comme « *lente* » que ce soit au niveau du développement des matériaux ou au niveau de leur mise en œuvre sur la toiture.

Au niveau de leurs propriétés (résistance, durabilité, couleur...), les matériaux évoluent progressivement dans le temps. Par exemple, l'acier devient de plus en plus performant et résiste mieux à la corrosion. Ainsi, pour les matériaux métalliques la composition des alliages est de plus en plus maîtrisée pour obtenir des produits plus résistants aux variations de la température notamment. La technologie de fabrication du plastique a évolué progressivement, sa composition a changé ainsi que ses caractéristiques (résistance à la température, aux rayons UV...).

Au niveau de la mise en œuvre, nous constatons un décalage entre l'apparition d'un matériau et sa réelle mise en œuvre sur les toitures. Par exemple, le zinc est apparu en 1810 mais il a commencé à être vraiment utilisé en couverture vers la fin du 19^{ème} siècle pendant la période Haussmannienne. A cette époque, le zinc était utilisé sur les immeubles et rarement sur les pavillons vu son coût élevé.

Le domaine de la couverture est décrit comme « *un domaine traditionnel* ». En effet, les couvreurs gardent généralement leurs habitudes dans leurs métiers et ils prennent du temps pour intégrer les nouveautés dans leurs savoir-faire. Ainsi, les eaux pluviales sont majoritairement collectées avec des gouttières/chéneaux en zinc. Les chéneaux peuvent être en cuivre particulièrement dans les zones montagneuses où la dilatation thermique est importante.

Pour conclure, le monde de la couverture n'évolue pas très vite, l'évolution des matériaux reste stable, les grandes familles des matériaux existent toujours. Aujourd'hui, il y a beaucoup plus de produits disponibles en termes de quantités mais la composition des matériaux n'évolue pas beaucoup. Les nouveaux produits constituent des niches correspondant à des usages très spécifiques comme les tuiles en plastique. Les innovations restent ponctuelles et ne représentent pas de grandes surfaces par rapport aux autres matériaux. Aujourd'hui, ce qui peut impacter l'apparence des toitures c'est l'installation des systèmes photovoltaïques pour la production de l'électricité ou des panneaux solaires pour la production de l'eau chaude, mais cela mettra encore plus de temps surtout pour les habitats collectifs. En effet, il est plus facile de mettre ces systèmes sur les toitures des maisons individuelles que sur celles des habitats collectifs. Pour la rénovation des toitures nous ne notons pas une perturbation du paysage français.

L'analyse des entretiens et le croisement de l'histoire du paysage urbain français (cf. [Chapitre 1.2](#)) ainsi que l'évolution des matériaux de toiture (cf. [Chapitre 1.2](#)) nous ont permis de ressortir les grandes périodes d'urbanisation qui ont marqué les matériaux de toiture. Ces périodes sont liées aux événements historiques et économiques et aux progrès techniques. Le choix des matériaux des toitures et leurs formes est très dépendant des mouvements architecturaux. En effet, avec le mouvement moderniste dans l'entre-deux-guerres, la toiture a été considérée comme « la cinquième façade ». Le Corbusier, en particulier, exprime une critique radicale du toit à double pente. Ainsi, les toitures-terrasses s'imposaient dans le paysage urbain dans les nouvelles constructions. Ensuite, la toiture-terrasse a été mise en cause par les apprentis architectes en 1968 et donc un retour de la toiture inclinée qui s'affiche. Les mouvements architecturaux ont été encouragés par les acteurs de la ville en particuliers les maires qui ont mis en œuvre les idées des architectes dans leurs villes.

Les grands moments historiques sont résumés, à partir de l'analyse du [Chapitre 1.2](#), comme suit (Pitte, 1984; Roncayolo, 2001; Roncayolo, 1982; Loupiac *et al.*, 1997; Abram et Monnier, 1999; Monnier, 2000; Lucan, 2001) :

a. Avant la révolution industrielle (avant 1850)

Avant la révolution industrielle le paysage urbain est caractérisé par des matériaux traditionnels (ardoise et tuile en terre cuite) encore utilisés aujourd'hui.

b. La révolution industrielle (1850-1918)

Cette révolution a introduit des progrès techniques qui ont généré des programmes de construction novateurs au début du 20^{ème} siècle. Il s'agit des constructions basées sur les matériaux métalliques et du béton armé qui commence au début du 20^{ème} siècle. Ainsi, le paysage urbain change avec l'utilisation des matériaux métalliques et l'apparition de nouvelles structures avec de nouvelles fonctionnalités telles que le chemin de fer et les infrastructures particulières comme les gares et les usines. La révolution industrielle a permis d'introduire les matériaux métalliques dans le marché de la couverture qui ont concurrencé les matériaux traditionnels (tuile en terre cuite et ardoise).

c. Après la première guerre mondiale (1918-1945)

Les recherches hygiéniques et les besoins en termes de logements en particulier collectifs surgissent et génèrent des programmes et des formes nouvelles faisant appels à des matériaux nouveaux et induisent l'apparition des matériaux économiques. Ainsi, les nouvelles constructions sont en béton dans les années 1920 pour tous types de bâtiments (culturels, religieux, usines...). De plus, les villes connaissent une nouvelle organisation séparant les zones industrielles de la banlieue. Pendant cette époque les toitures-terrasses font leur apparition par un coup d'envoi de le Corbusier (Pitte, 1984). Dans les années 1930, l'architecture est caractérisée par les bâtiments en briques mais des toitures-terrasses ou en tuiles en fonction de la région.

d. Les trente glorieuses après la deuxième guerre mondiale (1945-1974)

Après la seconde guerre mondiale, qui a détruit une bonne partie du paysage urbain, un besoin énorme pour reconstruire ou construire des bâtiments est apparu : c'est le grand *boom de la construction*. Les matériaux manquent. Les producteurs d'ardoise ne pouvant répondre à la demande, de l'ardoise d'Espagne est importée mais aussi du Canada. Dans ce cadre, de nouveaux matériaux pas chers (bardeaux bitumineux, tuile béton, les étanchéités terrasse, fibre ciment, tuile métallique ...) et faciles à mettre en œuvre font leurs apparition sur le marché. De plus, la préfabrication (méthode de construction plus rapide et économiques) a pris son essor par la prise de conscience du coût de la main d'œuvre et du potentiel gain économique se trouvant dans l'organisation des chantiers. Cette période de construction

massive s'est étendue sur trente ans de 1945 à 1974, connue comme « *Les trente glorieuses* » (Roncayolo, 2001 ; Roncayolo, 1982 ; Loupiac *et al.*, 1997 ; Abram et Monnier, 1999 ; Monnier, 2000 ; Lucan, 2001). Le paysage urbain est caractérisé par des tours de plusieurs étages avec des toitures-terrasses assurant un maximum de logements. Ce paysage des logements dans des grands immeubles, a pris plus son poids avec la décision de 1965 visant à créer 9 villes nouvelles. Ce paysage avec des toitures-terrasses et des matériaux économiques (bardeaux bitumineux, tuile béton...) continuait à être développé jusqu'à la fin des années 1970.

Durant cette période et plus précisément après 1968, l'évolution formelle de l'urbanisation se fait sentir dans la formation des architectes. En effet, en 1968 les formations des architectes, qui provenaient tous de l'école des beaux-arts, ont subi une révolution. De grandes écoles d'architecture ont été créées en 1969 tels que l'école nationale supérieure d'architecture. C'est une période de réflexion sur tout ce qui a été fait pendant la guerre en essayant de savoir les erreurs qui ont été faites et quelles sont les réponses que les architectes peuvent apporter pour résoudre ces erreurs en matière de logement.

e. Entre 1974 et 2000

L'apparition des nouvelles écoles d'architecture produit de nouveaux courants de recherche et des nouvelles pensées avec des nouvelles et différentes réponses architecturales et une ouverture vers l'étranger. Il s'agit de donner à la ville une nouvelle forme architecturale. Ainsi, l'Etat fait appel à une valorisation des villes nouvelles comme Marne la Vallée et Saint-Quentin-en-Yvelines (Pitte, 1984). Une incitation des architectes à proposer de nouvelles formes et architecture en exploitant divers matériaux comme le béton, le métal le verre et même les matériaux artificiels (Roncayolo, 2001). Les villes ne sont plus des bâtiments de logement mais les équipements (préfecture, mairie, centre culturel...) y sont intégrés. Au niveau des formes, les bâtiments sont de plus en plus esthétiques avec une poussée des techniques de construction en métal et en verre pour avoir plus de transparence. Nous citons comme exemple, le Centre national d'art et de culture Georges-Pompidou situé entre le quartier des Halles et le quartier du Marais à Paris.

Au niveau des matériaux des toitures, il y a un retour vers les matériaux traditionnels (ardoise et tuile) car l'on s'aperçoit que les matériaux économiques ne sont généralement pas durables. Ainsi, le paysage urbain est une mixité des toitures-terrasses et des toitures inclinées avec des matériaux traditionnels (tuile et ardoise) et des matériaux métalliques (zinc, acier...).

f. Entre 2000-2013

A partir des années 2000, la notion de l'écologie est de plus en plus mise en avant avec la conception des bâtiments durables HQE avec un choix de matériaux qui s'inscrivent dans une démarche HQE, des dispositifs particuliers en façades comme des pergolas ou des brise-soleil pour protéger de la chaleur ou fixer de la végétation. Dans ce cadre, certains fabricants de matériaux se sont engagés dans une approche HQE pour leurs produits en établissant des Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires FDES ou des Déclarations Environnementales de Produits (DEP). Comme nous l'avons vu dans le [Chapitre 1.3](#), quelques fabricants de matériaux de toiture ont effectué cette démarche volontaire, tels que VMZINC et RHEINZINK pour les matériaux en zinc et CEMBRIT et ETERNIT pour l'ardoise en fibres ciment.

Les toitures végétalisées prennent une place croissante dans le paysage des toitures. A partir de 2007 la vente des matériaux des toitures végétalisées s'envole et continue d'augmenter jusqu'en 2011, avec 1,46 millions de m² vendus ([MSI, 2012](#)).

Enfin, le marché des matériaux de toiture des 11 dernières années (2001-2011) décrit dans le [Chapitre 1.1](#), montre bien une *stabilité* de l'évolution de l'utilisation des matériaux traditionnels de toiture. Les grandes familles des matériaux (ardoise, tuile, acier, zinc...) sont toujours présentes et gardent bien leurs mêmes positions. Les matériaux économiques sont aussi présents mais ont une faible part de marché.

g. Croisement de l'histoire du paysage urbain français avec l'évolution des matériaux de toiture

Le croisement de l'histoire du paysage urbain français ainsi que l'évolution des matériaux de toiture montre que chaque période historique est caractérisée par une répartition spécifique des matériaux de toiture. Pour résumer :

- *Période n°1 : Avant la révolution industrielle (avant 1850) : un paysage de toitures caractérisé par des matériaux traditionnels (ardoise et tuile en terre cuite).*
- *Période n°2 : La révolution industrielle (1850-1918) : un paysage de toitures majoritairement en matériaux métalliques qui ont concurrencé les matériaux traditionnels (tuile en terre cuite et ardoise).*
- *Période n°3 : Après la première guerre mondiale (1918-1945) : introduction des toitures-terrasses dans le paysage urbain (des étanchéités bitumineuses).*
- *Période n°4 : Les trente glorieuses après la deuxième guerre mondiale (1945-1974) : un paysage urbain mixte : des toitures-terrasses de plus en plus construites et apparition des*

matériaux économiques (bardeaux bitumineux, tuile béton, fibre ciment, tuile métallique ...) qui se substituent en partie à la place des tuiles en terre cuite et des ardoises.

- 1974- 2000 : le paysage urbain est une mixité des toitures-terrasses et des toitures inclinées avec des matériaux traditionnels (tuile et ardoise) et des matériaux métalliques (zinc, acier...).

Les matériaux économiques ne sont plus appréciés.

- Entre 2000-2013 : Il s'agit d'un paysage mixte comme celui de la période précédente mais avec une augmentation de la mise en œuvre des toitures végétalisées.

Enfin, l'identification des matériaux existants dans chaque période se fait à partir du tableau historique développé dans le [Chapitre 1.2](#). Ce tableau est un *tableau général* applicable à toute échelle urbaine. Ce découpage général des périodes urbaines ainsi que tableau historique des matériaux, devront être croisés avec l'histoire de l'urbanisation de l'échelle urbaine ([cf. Paragraphe 4.2.1](#)).

4.1.2. A chaque classe de bâtiment correspond une répartition spécifique des matériaux de toiture

Comme décrit dans le [Paragraphe 2.3](#), dans la littérature, la définition de la typologie des bâtiments a été utilisée avec différents objectifs tels que l'évaluation du potentiel de la récupération de l'eau de pluie et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments. Mais il n'existe pas d'étude spécifique proposant une typologie de bâtiment au regard de la question de l'utilisation des matériaux de toitures. Par contre, l'analyse des études récentes du marché des matériaux de toiture ([MSI, 2006](#); [MSI, 2012](#)) nous a permis de conclure que *l'utilisation des matériaux de toiture dépend de la typologie du bâtiment*. Les entretiens menés avec les experts de la couverture confirment bien la dépendance du choix des matériaux de toiture en fonction de la typologie des bâtiments.

Dans ce cadre, nous proposons de créer une nouvelle typologie de bâtiments appelée « *classe de bâtiments* » caractérisée par une même « *signature d'utilisation de matériau de toit* ». Par signature nous entendons une répartition spécifique de matériaux de toiture. Par exemple la signature des toitures des habitats individuels est définie par : 90% en tuiles en terre cuite et 10% en autres matériaux.

Pour définir les bonnes typologies de bâtiments, nous allons procéder en deux niveaux, le premier est basé sur l'exploitation de la base de données existante de mode d'occupation de sol MOS de l'IAU-IDF. Le deuxième niveau est basé sur l'analyse des entretiens. Le croisement de ces deux approches permettra d'obtenir les « *classes de bâtiments* ».

a. Exploitation de la base MOS de l'IAU-IDF

- Présentation de la base

Pour l'Île-de-France nous disposons de la base *MOS de l'IAU-IDF*. L'IAU-IDF vient de terminer sa mise à jour en 2008. Cette base est très détaillée : 81 MOS pour la totalité dont 54 MOS pour les bâtiments : il s'agit de la base la plus détaillée en France (cf. Chapitre 2.1). Ainsi, le travail à partir de cette base nous permettra de créer de nouvelles typologies de bâtiments par rapport à l'utilisation des matériaux de couverture applicables à toutes les échelles urbaines.

Les 81 MOS de cette base sont le résultat de 5 niveaux hiérarchiques (cf. Figure 77). Un descriptif de chaque poste apporte des renseignements précis sur la nature de l'occupation du sol (bois, activité, habitat collectif...), illustrés par une photographie. Pour chaque MOS nous disposons de sa surface.

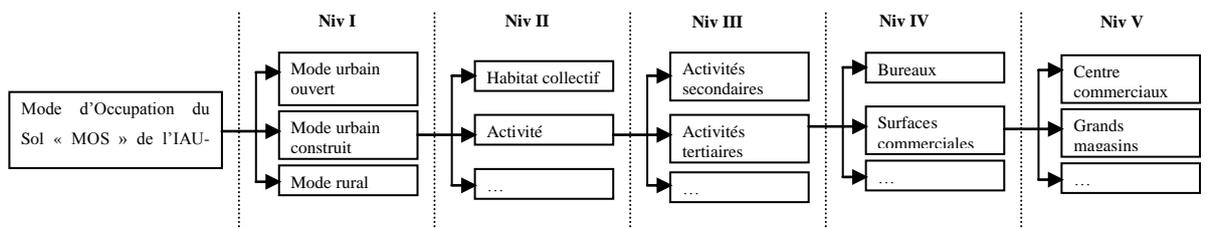


Figure 77 : Structuration des 5 niveaux hiérarchiques de la base MOS de l'IAU-IDF (Belmeziti, 2012)

La base MOS est une base très précise qui permet de visualiser et d'analyser en détail les évolutions de l'occupation du sol régional : extension de l'urbanisation, mutation des tissus urbains, transformation des espaces ruraux... Pour cela, pour notre étude, nous allons effectuer un *premier niveau de choix* de données par rapport à notre objectif (cf. Tableau 22):

- les données qui nous intéressent sont celles des bâtiments représentés dans la base MOS dans le niveau I par le *mode urbain construit (MUC)* ;
- nous avons supprimé un certain nombre de ces « MOS-bâtiment » qui ne présentent pas des toitures (ex : cimetières, chantiers...).

Tableau 22 : Les MOS retenus pour notre étude

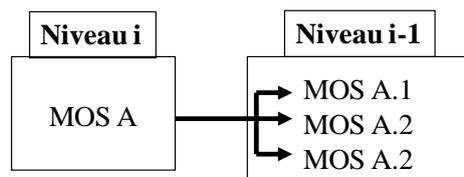
| | Niveau I | Niveau II | Niveau III | Niveau IV | Niveau V |
|--|---|---|---|--|--|
| Mode d'Occupation du Sol « MOS » Contient 81 MOS | Mode Urbain Construit « MUC » Contient 54 MOS | 5 catégories : Habitat individuel, Habitat collectif, Activité Equipement, Transport | 11 catégories : Activités secondaires, habitat autre, Grand équipements... | 18 catégories : habitat continu bas, surfaces commerciales... | 38 catégories : Centres commerciaux, Enseignement 1 ^{er} degré... |

- Réorganisation de la base : notion de regroupement

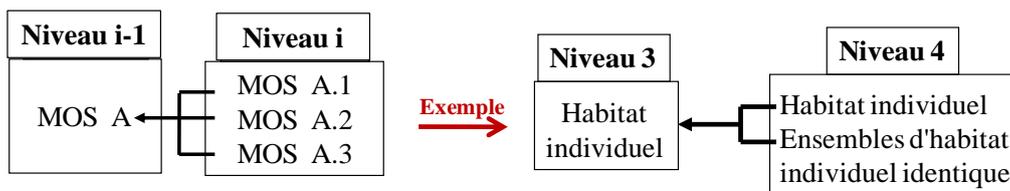
Pour exploiter au mieux la base MOS nous allons effectuer une réorganisation de cette base en partant du niveau le plus détaillé contenant 38 MOS bâtis pertinents (parmi les 54 initiaux). La logique que nous allons suivre est une logique de *regroupement de MOS* par rapport à une même « signature d'utilisation de matériau de toit ». Cette logique a été appliquée pour créer une nouvelle typologie de bâtiments ayant un comportement analogique au regard de la récupération l'eau de pluie dans le cadre de la thèse de [Belmeziti \(2012\)](#).

L'idée de ce regroupement est de reprendre les différents MOS à partir du niveau V et nous remontons au fur et à mesure vers les niveaux supérieurs. A chaque fois il s'agit de comparer les MOS du même niveau et de se poser la question s'ils présentent une même « signature d'utilisation de matériau de toit », si oui ils seraient regroupés dans le niveau le plus haut dans un même MOS si non chaque MOS sera conservé tant que tel.

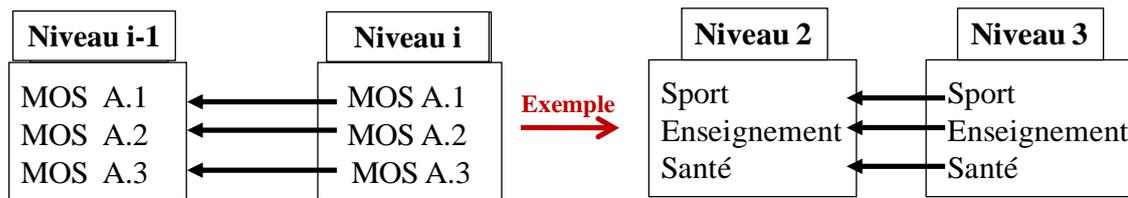
Les opérations de regroupement se feront à partir du niveau V et remontera au fur et à mesure vers les niveaux supérieurs. La réorganisation se fait comme suit pour un niveau (i) donné (i varie de 5 à 2) :



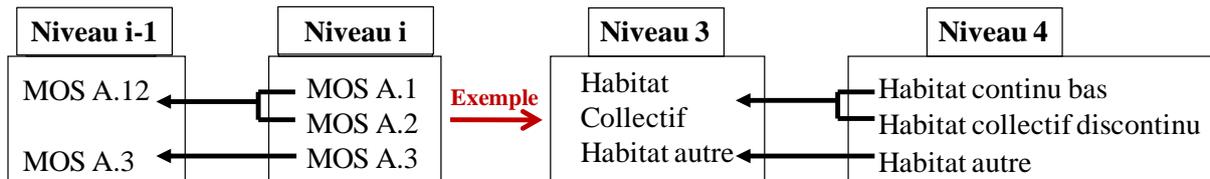
- Si tous les MOS de ce niveau (i) ont une même signature d'utilisation de matériau de toit ils seront rassemblés sous le MOS du niveau supérieur (i-1).



- Si chaque MOS du niveau (i) a une signature spécifique d'utilisation de matériau de toit alors ces MOS seront remontés tel qu'ils sont au niveau (i-1).



- Si certains MOS du niveau (i) ont une même signature d'utilisation de matériau de toit tandis que le reste a une autre signature. Dans ce cas, nous faisons remonter au niveau (i-1), chaque ensemble de MOS qui ont la même signature en un seul MOS.



Afin d'illustrer ce processus, nous prenons l'exemple des habitats collectifs (cf. [Tableau 23](#)). Le niveau V comporte : habitat continu bas, habitat collectif continu haut, habitat collectif discontinu, prisons et habitat autre (maison de retraite, hôtel, auberge...), la question qui se pose est ce que tous ces MOS ont deux à deux une même signature d'utilisation des matériaux de toiture ou non. Les MOS : habitat continu bas, habitat collectif continu haut et habitat collectif discontinu se différencient par leur nombre d'étages ainsi que leur disposition urbaine. *A priori* nous pouvons considérer que cette différenciation n'affecte pas le choix des matériaux de toiture entre les différents MOS et donc ils peuvent être regroupés directement dans le MOS habitat collectif du niveau III. Pour les MOS prison et habitat autre nous pouvons les regrouper dans le MOS habitat autre. En effet, le MOS habitat autre comporte des bâtiments ayant différentes fonctions qui peuvent avoir différents types de toiture et donc une mixité de matériaux de toit (d'après les experts de la couverture). De plus, la prison est un bâtiment spécifique qui n'est pas toujours présent dans toute zone urbaine (commune, département...) et lui accorder une classe spécifique semble être trop détaillé par rapport à notre objectif d'évaluation à grande échelle. Ainsi, il est plus logique de regrouper le MOS prison avec le MOS habitat autre qui est déjà mixte et donc cette opération n'affecte pas vraiment la répartition des matériaux de toiture dans ce MOS.

Tableau 23 : Les MOS pour l'habitat collectif

| Niveau II | Niveau III | Niveau IV | Niveau V |
|-------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Habitat collectif | <i>Habitat collectif*</i> | Habitat continu bas | Habitat continu bas |
| | | Habitat collectif continu haut | Habitat collectif continu haut |
| | | Habitat collectif discontinu | Habitat collectif discontinu |
| | <i>Habitat autre*</i> | Habitat autre | Prisons |
| | | | Habitat autre |

**MOS retenu*

Pour accomplir ce travail de regroupement et de création des classes de bâtiments nous avons besoin d'autres informations. Il s'agit d'exploiter les avis des experts ainsi que l'étude de marché des matériaux de couverture pour pouvoir décider si deux MOS ont une même signature d'utilisation des matériaux de toiture ou non.

b. Analyse des entretiens et de l'étude de marché

D'après les experts (M. Boisseau, M. Normand, M. Perez (responsable « norme » de la société Nicoll), Bissery (VMZINC)) de la couverture, la typologie du bâtiment impose une contrainte technique importante dans le choix du matériau de toiture. Dès qu'on a des contraintes techniques du bâtiment donc le choix de la couverture est généralement orienté, la solution technique est quasiment imposée par le type de bâtiment. Ainsi, les familles des matériaux de couverture sont conçues pour répondre à ces besoins techniques. Pour M. Normand (Ingénieur au CSTB), les couvertures des grands équipements (enseignement, bureau...) sont basées sur l'utilisation du bac acier (tôle d'acier nervuré : le grand classique des toitures industrielles) et pour les toitures-terrasses c'est les revêtements d'étanchéité qui sont utilisés. Pour les ardoises, le marché est plutôt orienté vers les habitats individuels et collectifs (ETERNIT (Fabricant d'ardoise en fibres ciment) et M. Bourgoïn (couvreur)).

L'étude du marché de couverture effectuée dans le [Chapitre 1.1](#) montre un découpage des familles de matériaux en petits et grands éléments de couverture. Les petits éléments (les tuiles, les ardoises et les bardeaux) sont utilisés pour les habitations (individuels, collectif...), la nature du matériau dépendra d'autres facteurs réglementaire, tradition régionale... Les grands éléments de couverture (métalliques, plaques d'éclairage, plaques bitumineuses et les plaques en fibres ciment) répondent aux besoins des bâtiments ayant des surfaces de toiture très grandes avec de faibles pentes tels que les bâtiments industriels, les grands équipements (enseignement, administration...). Les toitures-terrasses jouent le rôle des grands éléments de couverture pour les grands bâtiments. Ils sont même plus appréciables, car ils sont moins chers et offrent un avantage, la possibilité d'exploitation de la toiture pour mettre

du matériel par exemple. Ainsi, les bâtiments industriels, ou des bâtiments très élevés en hauteur ont plutôt des toitures-terrasses dans le but d'optimiser leurs volumes.

Voici quelques exemples d'utilisation préférentielle de matériau de toiture par type de bâtiment (MSI, 2006) :

-« Les tuiles en terre cuite resteront le matériau traditionnellement installé en couverture dans le secteur résidentiel (collectif et individuel) de par leurs caractéristiques ».

-« Les couvertures en aluminium trouvent leur principale application dans le secteur non-résidentiel, notamment pour des bâtiments liés à la culture, aux sports et aux loisirs ».

-« Les couvertures métalliques en acier sont principalement utilisées pour des bâtiments industriels et bâtiments tertiaires ».

D'après les experts, pour les bâtiments prestigieux (les médiathèques, les centres culturels, etc.) les matériaux nobles et chers (cuivre, zinc, inox...) sont généralement favorisés comme illustré pour la ville de Créteil dans la Figure 78. D'après Mme Texier (historienne), la couverture des édifices prestigieux est généralement en métal. Il n'y a que quelques édifices prestigieux avec couverture en Plomb, car même au moyen âge c'était un matériau cher.



Figure 78 : A Créteil (a) Toiture en aluminium de la Conservatoire de musique Marcel Dadi; (b) Toiture en zinc du Centre Socioculturel Madeleine Rebérioux

c. Classes de bâtiments retenues

Dans cette section nous allons croiser le travail de regroupement de MOS avec les avis des experts et l'étude de marché des matériaux de couverture.

Pour les habitats individuels, le MOS habitat rural du niveau V est exclu car il appartient aux zones rurales (cf. Tableau 24). Les MOS habitat individuel et ensembles d'habitat individuel identique du niveau V seront regroupés dans le MOS habitat individuel du niveau II. En effet, les experts considèrent les habitats individuels comme une seule typologie de bâtiments caractérisée par des toitures en petits éléments de couverture. Le matériau majoritairement utilisé est la tuile mécanique (terre cuite et béton) suivie de l'ardoise.

Tableau 24 : Les MOS pour l'habitat individuel

| Niveau II | Niveau III | Niveau IV | Niveau V |
|----------------------------|--------------------|--|--|
| <i>Habitat individuel*</i> | Habitat individuel | Habitat individuel | Habitat individuel |
| | | Ensembles d'habitat individuel identique | Ensembles d'habitat individuel identique |
| | | Habitat rural | Habitat rural |

**MOS retenu*

Le regroupement effectué pour les MOS habitat collectifs et le MOS habitat autre (cf. [Tableau 23](#)) a été validé. En effet, les bâtiments de l'habitat collectif sont plus grands que ceux individuels mais permettent la mise en œuvre des petits éléments. Les matériaux les plus souvent utilisés sont le zinc et l'ardoise (Paris et Banlieue) puis les toitures-terrasses. Pour l'habitat autre la couverture a un caractère industriel avec utilisation des matériaux comme l'acier laqué. Elle reste une classe très diversifiée hétérogène, nous y trouvons aussi des terrasses comme le cas des prisons (matériaux qui résistent au feu et aux dégradations).

Les MOS pour l'activité sont illustrés dans le [Tableau 25](#). Les MOS activités en tissu urbain mixte et zones ou lotissement affectés aux activités seront regroupés dans le MOS du niveau III : activité secondaire. En effet, la différence entre ces deux MOS c'est uniquement leur localisation soit en zone urbaine soit en zone spécifique pour les activités. Ainsi, la signature de l'utilisation des matériaux de toiture sera la même. Les experts (M. Boisseau, M. Normand, M. Perez, Bissery) affirment que dans ce type de bâtiments l'utilisation des matériaux économiques est privilégiée. Il s'agit en premier lieu de l'acier laqué ensuite les plaques fibrociment pour les bâtiments anciens avec présence de l'amiante et enfin des toitures-terrasses.

Les MOS du niveau V : centres commerciaux, hypermarchés, grands magasins, stations-service et autres commerces peuvent être regroupés dans le MOS surfaces commerciales du niveau IV. Il s'agit de très grands bâtiments avec de grande superficie faisant appel à la même technologie et même type de conception de toiture (couverture avec grand élément). Ils présentent un caractère plus au moins industriels donc ils peuvent être en toitures-terrasses ou avec des toitures industrielles (plaques acier laqué, fibrociment). Le MOS bureau doit être conservé de manière indépendante car il s'agit généralement des immeubles avec des toitures-terrasses. Ainsi, trois classes de bâtiments ressortent : activité secondaire, surfaces commerciales et bureaux. Nous nous arrêtons à ce niveau de regroupement car nous considérons que ces trois classes sont différentes entre elles et peuvent avoir des signatures d'utilisation des matériaux de toitures différentes.

Tableau 25 : Les MOS pour l'activité

| Niveau II | Niveau III | Niveau IV | Niveau V | |
|-----------|-----------------------------|---|---|---------------------|
| Activités | <i>Activité secondaire*</i> | Activités en tissu urbain mixte | Activités en tissu urbain mixte | |
| | | Zones ou lotissement affectés aux activités | Zones ou lotissement affectés aux activités | |
| | Activité tertiaires | <i>Surfaces commerciales*</i> | | Centres commerciaux |
| | | | | Hypermarchés |
| | | | | Grands magasins |
| | | | | Stations-service |
| | | | | Autres commerces |
| | <i>Bureaux*</i> | Bureaux | | |

**MOS retenu*

Les MOS pour les équipements sont illustrés dans le [Tableau 26](#). Les MOS du niveau V : installations sportives couvertes et piscines couvertes sont regroupés dans le MOS du niveau III : sport (construit). En effet, les toitures des bâtiments sportifs peuvent être des toitures-terrasses, des toitures avec des formes particulières courbes ou autres pour donner un prestige au bâtiment. Les MOS du niveau V : enseignement de premier degré, enseignement secondaire, enseignement supérieur et enseignement autre sont regroupés dans le MOS du niveau III : équipements d'enseignement. En effet, quel que soit le type d'enseignement la typologie des toitures ne sera pas affectée. D'après les experts, il s'agit généralement des immeubles avec des toitures-terrasses.

Les MOS hôpitaux, cliniques et autres équipements de santé sont regroupés dans le MOS du niveau III : équipements de santé car ils ont généralement des toitures-terrasses d'après les experts.

Les MOS du niveau V : lieux de culte et grands équipements culturels peuvent être regroupés dans le MOS du niveau IV : équipement culturel. En effet, dans ce type de bâtiments les toitures sont majoritairement des terrasses. Mais aussi certains bâtiments culturels contemporains et prestigieux avec des formes architecturales courbes présentent des couvertures métalliques diverse (zinc, cuivre...). Les MOS du niveau V : mairies, équipements de proximité, sièges d'administrations territoriales, équipements de missions de sécurité civile, et administrations autres sont regroupés dans le MOS Autres équipements locaux, administrations qui est renommé en « équipement administratif ». Nous trouvons la même signature d'utilisation des matériaux de toiture. Généralement, il s'agit des toitures-terrasses mais pour quelques exceptions comme des mairies prestigieuses les toitures sont métalliques. Enfin, les MOS du niveau V : production d'eau, assainissement, électricité, gaz, pétrole et infrastructures autres seront regroupés dans le MOS grands équipements. Il s'agit des bâtiments d'entrepôt logistiques qui auront des toitures en matériaux économiques

particulièrement il s’agit des terrasses. Nous appellerons cette classe de bâtiments « Entrepôts logistiques » qui seront plus explicite que le mot grands équipements.

Tableau 26 : Les MOS pour les équipements

| Niveau II | Niveau III | Niveau IV | Niveau V |
|------------------------|---|---|--|
| Equipements | <i>Sport (construit)</i> | Bâtiments ou installations de sport | Installations sportives couvertes |
| | | | Piscines couvertes |
| | <i>Equipements d'enseignement</i> | Etablissements d'enseignement | Enseignement de premier degré |
| | | | Enseignement secondaire |
| | | | Enseignement supérieur |
| | | | Enseignement autre |
| | <i>Equipement de santé</i> | Etablissements de santé | Hôpitaux, cliniques |
| | | | Autres équipements de santé |
| | <i>Autres équipements locaux, administrations</i> | <i>Equipement culturel</i> | Lieux de culte |
| | | | Grands équipements culturels |
| | | Grandes administrations, organismes officiels | Mairies |
| | | | Equipements de proximité |
| | | | Sièges d'administrations territoriales |
| | | | Equipements de missions de sécurité civile |
| | | | Administrations autres |
| | | | |
| | <i>Grands équipements Entrepôt logistique</i> | Equipements pour eau, assainissement, énergie | Production d'eau |
| | | | Assainissement |
| | | | Electricité |
| | | | Gaz |
| Pétrole | | | |
| Infrastructures autres | | | |

*Nouveau nom retenu pour le MOS concerné ; ~~MOS~~ : Ancien nom du MOS

Le transport comporte un seul MOS que nous allons garder tel qu’il est. Les bâtiments de transport comportent les gares et les dépôts de bus. Les toitures ont un caractère industriel avec majoritairement des toitures-terrasses ou des toitures en acier laqué ou du fibrociment.

d. Classes de bâtiments retenues

Ce travail d’exploitation de la base MOS de l’IAU-IDF et de l’analyse des entretiens et de l’étude de marché nous a permis de ressortir les 13 « classes de bâtiments » suivante :

1. Habitat individuel « HI »
2. Habitat collectif « HC »
3. Habitat autre « HA » (prison, auberge...)
4. Activité secondaire « A » (industrielle)
5. Surface commerciale « SC » (magasin, hypermarché, station de service...)

6. Bureau « B »
7. Sport (construit) « S »
8. Equipement d'enseignement « EE » (secondaire, supérieur...)
9. Equipement de santé « ES » (hôpital, clinique...)
10. Equipement culturel « EC » (centre de congrès, bibliothèque...)
11. Equipement administratif « EA » (mairie, préfecture...)
12. Entrepôt logistique « EL » (gaz, électricité...)
13. Transport « T » (gares...)

D'après les experts certaines classes peuvent être regroupées. Par exemple, la classe équipement logistique, la classe surfaces commerciales et la classe transport peuvent être regroupées en une seule classe. En effet, il s'agit de grands bâtiments avec des toitures grandes faisant appel à la même conception de toiture (majoritairement des terrasses ou des toitures en acier).

Néanmoins, même si certaines classes présentent les mêmes types de toitures, au niveau de la distribution des matériaux de toiture nous supposons que nous aurons une différence nette. Par exemple, les surfaces commerciales et les activités secondaires ont des bâtiments de très grandes surfaces mais en termes de matériaux de toiture il est possible qu'un matériau est dominant dans une classe par rapport à une autre (ex : acier dominant dans les activités). Donc, nous avons décidé de garder les 13 classes de bâtiments tant que telles. L'objectif sera de voir à la fin de la modélisation si nous aurons des similitudes dans la distribution des matériaux entre certaines classes et ceci nous permettra de conclure sur la possibilité de procéder à une réduction du nombre de classes.

4.2. Principes spécifiques à l'échelle urbaine étudiée

Trois principes spécifiques à une échelle urbaine donnée ont été identifiés :

- *L'évolution urbaine spatiale et chronologique de l'échelle urbaine influence l'utilisation des matériaux de toiture ;*
- *Le cadre réglementaire, dans une échelle urbaine autorise/préconise des matériaux de toiture ;*
- *Le renouvellement d'une toiture, à une échelle urbaine, influence l'identification de l'âge du matériau.*

4.2.1. L'évolution urbaine spatiale et chronologique de l'échelle urbaine influence l'utilisation des matériaux de toiture

Les grandes périodes d'urbanisation (cf. Chapitre 1.2) sont générales à toute la France. Néanmoins, chaque zone urbaine (région, ville, département...) présente des spécificités. D'après les experts de la couverture, l'utilisation des matériaux de toiture est quasiment imposée par le contexte régional et l'accès au matériau. En fonction de la région, il y a des matériaux qui sont dominants par rapport à une autre région. Ainsi, chaque région présente un paysage spécifique de toitures. Par exemple, à Angers, la présence de carrières d'ardoise a conduit à l'utilisation de ce matériau, qui, ensuite, a été imposé en couverture par des règlements. L'ardoise est utilisée massivement aussi en Bretagne, en Savoie et au pays de la Loire. A Paris, le zinc domine le paysage urbain depuis la période haussmannienne. Dans le sud-ouest, le sud et le nord de la France, la tuile en terre cuite est le matériau le plus utilisé, par contre sa couleur est différente d'une région à une autre.

Au niveau de la typologie urbaine, d'une période historique à une autre, les mouvements architecturaux en France se sont généralisés dans tout le pays. Néanmoins, nous pouvons trouver des architectures qui sont plus développées dans une ville que dans une autre, y compris au sein d'une même région. Ainsi, l'architecture des années 1930 caractérisée par des bâtiments en brique est très marquée dans la ville de Maisons-Alfort par rapport à la ville de Créteil qui ne possède que l'hôpital intercommunal en briques (M. Vaillant). L'architecture postmoderne des années 1960 avec des tours est plus développée à Evry qu'à Maisons-Alfort. Ainsi, l'importance d'une architecture d'une période varie d'une ville à une autre.

Pour conclure, il est important d'étudier l'évolution historique de la zone urbaine considérée. Il s'agit donc, d'élaborer une carte de spatialisation chronologique de l'urbanisation de la région d'étude permettant de la découper en zones urbaines homogènes temporellement. Ce découpage historique permettra, en le croisant avec le tableau chronologique des matériaux, d'associer à chaque zone urbaine les différents potentiels matériaux de couvertures existants. Ce type de carte peut être existant et facile à avoir à partir des Mairies qui possèdent des cartes historiques accessibles sur leur site ou dans les archives. Le PLU (Plan Local d'Urbanisme) d'une ville pourra également présenter une telle carte. En cas d'absence de ce type de carte, il conviendra de la produire à partir des informations historiques sur l'urbanisation de la ville, ces informations étant à rechercher dans les bibliothèques, les archives des mairies...

4.2.2. Le cadre réglementaire, dans une échelle urbaine autorise/préconise des matériaux de toiture

Dans les [Chapitres 1.1 et 1.3](#), nous avons vu que les matériaux de toiture sont régis par un ensemble de réglementations de mise en œuvre tels que les DTU et les Avis techniques et les normes de composition des matériaux tels que les normes AFNOR. Cette constatation a été confirmée par les experts de couvertures (M. Normand et M. Boisseau).

A une échelle urbaine donnée, certains textes réglementaires, comme le PLU (Plan Local d'Urbanisme) et les règles d'aménagement, représentent une contrainte réglementaire importante dans le choix des matériaux. Par exemple, à Paris, il est inconcevable de dénaturer architecturalement les bâtiments Haussmanniens pour faire un bâtiment avec des formes contemporaines. De plus, en France la loi n°1930-05-02 du 2 mai 1930⁶⁷ a été mise en place et complétée par la loi Malraux Loi n° 62-903 du 4 août 1962⁶⁸ sur la protection du patrimoine historique et esthétique de la France et tendant à faciliter la restauration immobilière. Elle touche certains quartiers qui présentent un caractère historique, esthétique ou de nature à justifier la conservation ([Pite, 1984](#)). En particulier, la ville de Paris est délimitée par un périmètre de 500 m classé autour des monuments historiques (ce périmètre est imposé par la loi pour tout quartier historique), ce qui implique l'intervention des architectes des bâtiments de France pour donner leurs avis sur les modifications d'aspect des toitures. Donc, aucun changement d'aspects des toitures ou des façades des bâtiments parisiens ne peut être effectué sans en référer à l'autorité. Ainsi, toute intervention sur les bâtiments de Paris doit être soumise à l'avis des architectes des bâtiments de France ou des monuments historiques.

Une nouvelle réglementation thermique RT 2012 vient d'être approuvée. D'après les experts de couverture, cette réglementation influencera énormément le paysage des toitures en imposant des contraintes. Cette RT est imposée pour les nouvelles constructions depuis 2013 et exigeait de concevoir une enveloppe de bâtiment plus résistante et plus performante que celle du passé. Il faut que les bâtiments soient autonomes en termes de production d'énergie.

Ainsi, la couverture doit être plus durable surtout au niveau de la mise en œuvre. Par exemple, une gouttière en zinc mal posée diminue sa durée de vie. Donc, il faut avoir un savoir-faire dans la pose et la conception du système d'évacuation d'eau de pluie (la bonne prise en

⁶⁷ Loi n°1930-05-02 du 2 mai 1930 ayant pour objet de réorganiser la protection des monuments naturels et des sites de caractère artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque

⁶⁸ Loi n° 62-903 du 4 août 1962 –dite loi Malraux – « complétant la législation sur la protection du patrimoine historique et esthétique de la France et tendant à faciliter la restauration immobilière

compte de la dilatation, la réalisation des soudures...) ce qui fait partie de la qualité finale du produit. Ce principe s'applique à tous les matériaux. Il faut noter que la recherche d'économie fait qu'il y a des métiers moins qualifiés, moins de savoir-faire et donc des durabilités plus faibles. Aujourd'hui, une maison individuelle pourra difficilement respecter les exigences et les critères de la RT 2012 sans pouvoir produire une partie de l'énergie nécessaire au fonctionnement de la maison (chauffage, eau chaude qui représente 35% de la consommation énergétique de la maison...) (M. Boisseau). Dans ce cadre il y a des fabricants de matériaux qui développent aujourd'hui et potentiellement des produits pour être en conformité avec la RT en termes de résistance des matériaux.

Pour conclure, il est indispensable de consulter et étudier les différentes réglementations spécifiques à la zone d'étude pour faire ressortir les contraintes influençant l'utilisation des matériaux de couverture. Ces données permettront d'identifier les matériaux de toitures interdits ou préconiser dans la zone d'étude. Il s'agit de créer un filtre aidant à cerner les matériaux mis en œuvre.

4.2.3. Le renouvellement d'une toiture, à une échelle urbaine, influence l'identification de l'âge du matériau

L'âge de la toiture est une donnée nécessaire dans notre étude, en effet l'émission d'un contaminant dans les eaux pluviales varie en fonction de l'âge du matériau (Robert-Sainte, 2009). Or, une toiture subit dans sa vie en œuvre des transformations (entretien, rénovation...) que nous cherchons à estimer. Le renouvellement d'une toiture dépend de sa durée de vie. Pour déterminer la possibilité et le taux de renouvellement d'un matériau il suffit de croiser l'âge du matériau et sa durée de vie. D'après (MSI, 2006), nous possédons des informations sur la durée de vie des matériaux de couverture. Par exemple le zinc a une durée de vie de 50 ans (cf. Chapitre 1.1).

D'après les experts des toitures, le renouvellement ou le changement d'aspect d'une toiture dépend des contraintes réglementaires et des circonstances dans lequel le bâtiment se trouve comme dans le cas des bâtiments Parisiens.

Le changement d'un matériau n'est plus guidé par les mêmes considérations souvent économiques que lors de la construction du bâtiment (M. Boisseau). En effet, vers les années 1960 après la guerre il y avait un grand besoin de construire rapidement et de façon économique ce qui a induit au développement des couvertures bitumineuses. Vers les années 1980 apparaît la nécessité de renouveler ces couvertures qui se sont révélées non durables. La période entre les années 1980 et 1990 est ainsi caractérisée par le remplacement des bardeaux

bitumineux par des couvertures plus durables tel que le zinc. Ce qui fait qu'aujourd'hui il n'y a plus des couvertures en bardeaux.

Pour conclure, l'information sur l'âge d'un matériau donné sera identifiée en tenant compte de son potentiel renouvellement et de sa durée de vie. Ainsi, à partir de la carte de spatialisation chronologique de l'urbanisation de l'échelle d'étude, nous pouvons évaluer l'âge d'un matériau localisé dans une zone urbaine bien datée. Par exemple, sachant que la durée de vie d'une tuile en terre cuite est de 100 ans (MSI, 2006), une maison en tuile en terre cuite localisée dans une zone urbaine datée de 1950 est âgée au plus de 63 ans : en conséquence, aucun renouvellement n'aura probablement été effectué.

4.3. Critères spécifiques non objectivables

Les critères issus des dimensions caractéristiques du matériau, dimension esthétique et qualités écologiques (cf. Chapitre 2.3) sont des critères très variables et ne peuvent pas être transposés en principes d'utilisation d'un matériau à l'échelle urbaine. Si l'on considère le critère esthétique, ce dernier est très relatif, car il dépend du choix de l'architecte et/ou du client : un tel choix ne peut pas être généralisé à grande échelle et reste limité à un bâtiment donné. Les critères techniques comme la durabilité et la facilité d'entretien du matériau dépendent énormément du projet de construction : le budget alloué, l'importance accordée au toit par l'architecte...Donc, ces critères sont aussi singuliers, subjectifs et spécifiques au bâtiment. Rappelons que notre objectif de recherche est de développer une méthode pour identifier la répartition des matériaux de couverture à l'échelle de la ville sans avoir recours à déterminer toutes les toitures (ce qui reste un travail fastidieux).

4.4. Vers un découpage de l'échelle urbaine en entités homogènes en termes de répartition des matériaux de toiture

Nous avons identifié deux types de principes. Des principes généraux applicables à toute échelle urbaine. Par exemple, pour chaque époque historique nous avons une répartition spécifique des matériaux de toiture. Un autre principe général c'est que pour chaque classe de bâtiment nous avons une répartition spécifique des matériaux de toiture. D'autres principes sont spécifiques au terrain d'étude. Par exemple, l'évolution urbaine spatiale et chronologique de l'échelle urbaine influence l'utilisation des matériaux de couverture. Il s'agit de découper

l'échelle urbaine en zones historiques. Le croisement de ces principes permet de mieux identifier et dater les matériaux de toiture. Ainsi, en croisant les données du tableau historique des matériaux de toiture avec les périodes historiques de l'urbanisation de l'échelle urbaine, nous pouvons identifier l'existence ou l'absence d'un matériau donné. Par exemple, si une zone urbaine a été construite pendant les trente glorieuses, caractérisées par la construction des grands ensembles (des immeubles de plusieurs étages), donc la majorité des toitures des habitats collectifs sont des terrasses.

Enfin, le croisement de tous les principes précédents permet de découper l'échelle urbaine en zones homogènes appelées *entités* définies comme suit : «A chaque classe de bâtiments localisée historiquement et spatialement à une échelle urbaine donnée correspond une répartition propre des matériaux de toiture».

Ce découpage permet, dans un premier temps d'identifier les familles de matériaux de toiture (tuile, acier, zinc...) à l'échelle urbaine. Pour qu'elles soient opérationnelles, nous avons proposé une démarche de cartographie de ces principes développés dans le [Chapitre 3.2](#). Il s'agit à l'aide des SIG de créer des cartes concrétisant les principes qui seront croisées. Ainsi, pour une échelle urbaine donnée nous établissons une carte historique de son urbanisation et une carte des classes de bâtiments, l'intersection de ces deux cartes crée une sorte de couche caractérisée par une classe de bâtiments dans une zone historique. Cette démarche sera détaillée dans le [Chapitre 3.2](#).

La quantification de ces familles de matériaux sera effectuée à partir d'une approche statistique. Ensuite, à partir d'autres règles de passage de la famille de matériau au matériau de l'élément de toit nous pouvons quantifier les matériaux des différents éléments de toit (gouttière, noue...) (cf. [Chapitre 2.4](#)).

Chapitre 2.4. Elaboration des règles empiriques d'identification et de quantification des matériaux des différents éléments de toit à l'échelle urbaine

Dans le [Chapitre 2.3](#), nous avons montré que les méthodes automatiques de quantification des matériaux de toiture à partir des images aériennes sont insuffisantes pour l'évaluation des dimensions des différents éléments de toit à l'échelle urbaine. En effet, elles permettent uniquement l'évaluation des matériaux de rampant, elles présentent des problèmes de confusion entre certains matériaux, l'âge du matériau n'est pas renseigné et enfin elles se limitent à quantifier les matériaux définis par l'opérateur en entrée du modèle. Nous avons ainsi proposé de développer une nouvelle méthode globale de quantification des dimensions des matériaux des différents éléments de toiture à l'échelle urbaine. Il s'agit d'exploiter et de transposer les approches utilisées dans la littérature pour modéliser à l'échelle urbaine des phénomènes différents mais engageant une échelle locale, et plus particulièrement celle du bâtiment. Une première étape a été effectuée (cf. [Chapitre 2.3](#)). Elle a permis de découper l'échelle urbaine en entités définies comme suit *«A chaque classe de bâtiment localisée historiquement et spatialement à une échelle urbaine donnée (entité) correspond une répartition propre des matériaux de toiture»*.

La deuxième étape consiste à créer un moyen permettant d'avoir des données quantitatives sur la répartition des matériaux des différents éléments du toit pour chaque entité. Notre approche va consister à exploiter des données existantes à l'échelle urbaine en les interprétant au regard de notre problématique et à compléter cette information à l'aide d'une enquête auprès des professionnels des matériaux de toiture (industriels, syndicats...). Ainsi, il nous sera possible de transformer ces données en un ensemble d'outils opérationnels d'identification et de quantification des matériaux de toitures à l'échelle urbaine. Dans ce chapitre nous allons présenter les règles empiriques définies comme un moyen opérationnel d'exploitation des données existantes pour identifier et quantifier les matériaux de toitures à l'échelle urbaine.

1. Principes d'élaboration des règles

En analysant les bases de données existantes à l'échelle urbaine présentées dans le [Chapitre 2.1](#), en particulier les bases d'images aériennes et les bases de mode d'occupation de sol, nous remarquons que la seule opération possible est la quantification des familles de matériaux de rampant. Si, à l'aide d'un SIG, nous croisons la BD-TOPO, qui donne la surface projetée de chaque bâtiment, avec une image aérienne, nous pouvons identifier visuellement la famille de matériau de rampant d'un bâtiment donné et évaluer à partir de la BD-TOPO sa surface projetée. L'image aérienne ne permet pas d'aller plus loin dans l'identification visuelle de la nature du matériau de rampant⁶⁹ ni de la nature des matériaux des autres éléments de toit. Dans la [Figure 79](#), les rampants des bâtiments repérés par la BD-TOPO sont en tuile. La tuile est reconnue visuellement par sa couleur ainsi que sa texture. En revanche, à partir de cette image nous ne pouvons pas distinguer entre tuile en terre cuite et tuile béton et les autres éléments de toit (gouttière, noue, descente, etc.) ne sont pas détectables. De plus, l'information sur l'âge des matériaux n'est pas non plus disponible. Notons que l'approche statistique développée dans le [Chapitre 3.2](#) se limite à quantifier les familles des matériaux de rampant et les longueurs de gouttières et de noues associées. Cette approche n'a pas pu être étendue à l'évaluation des matériaux des différents éléments de toiture faute de moyens (images aériennes performantes) et la complexité qu'il y a à effectuer des échantillonnages permettant de renseigner tous les matériaux de toitures : cela requiert un travail minutieux de terrain qui reste très coûteux. Nous avons donc besoin de trouver d'autres moyens pour accéder aux informations manquantes.



Figure 79 : Croisement BD-TOPO et image aérienne (données 2008)

⁶⁹ Notons toutefois une exception dans le cas de l'acier : une image aérienne de bonne qualité permet de distinguer entre acier laqué (coloré par peinture), acier galvanisé (traces plus ou moins marqué de rouille) et acier inoxydable (forme du profilé et brillance). Dans ce cas il n'est pas nécessaire de recourir à une règle pour quantifier les matériaux en acier sur une zone donnée.

1.1. Finalité des règles empiriques

Il s'avère indispensable de commencer par évaluer les différentes *familles de matériaux de rampants* présentes à une échelle urbaine donnée. Comme l'échelle urbaine a été découpée en *entités* dans le [Chapitre 2.3](#), donc il faudra développer une méthode de quantification des familles des matériaux de rampants au niveau d'une entité donnée. Ensuite, si nous connaissons les familles de matériaux de rampants existantes à chaque entité, nous chercherons à déduire par des *méthodes dérivées* – basées sur des *règles définies empiriquement* - les autres matériaux des différents éléments de toit. Le principe retenu dans ce travail est d'attribuer à chaque famille de matériau de rampant une répartition hiérarchique des matériaux des éléments de toit (cf. [Figure 80](#)). En d'autres termes, si nous voulons, par exemple, quantifier les éléments d'étanchéité en plomb, nous allons déterminer la probabilité d'avoir ces éléments pour chaque famille de matériau de rampant. Par exemple, d'après les DTU les éléments d'étanchéité sur une toiture en zinc sont en zinc uniquement.

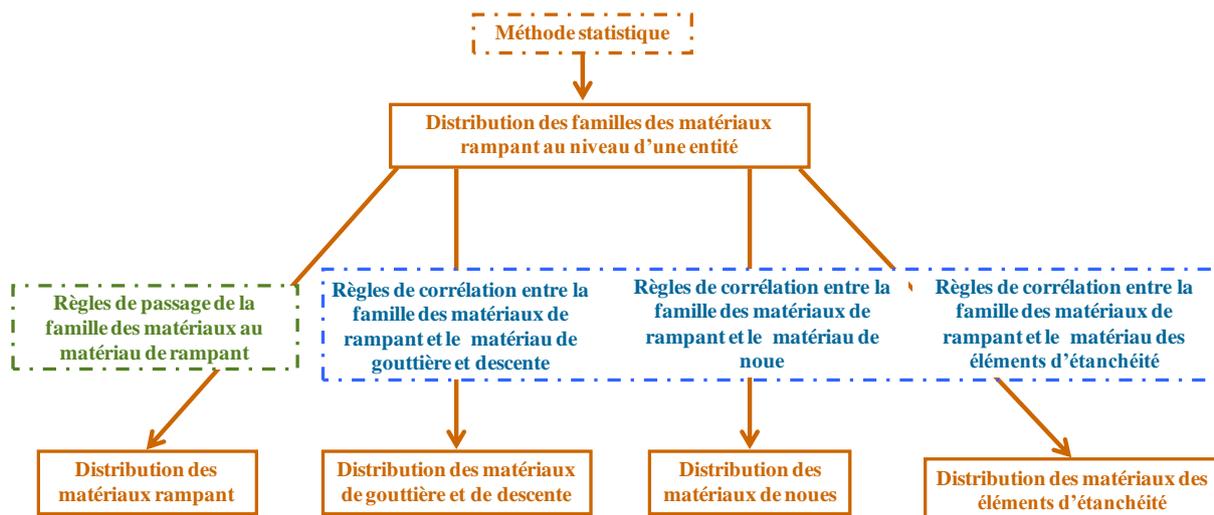


Figure 80 : Etapes de la quantification des matériaux des différents éléments de toit pour une entité donnée

La quantification des familles des matériaux de rampant se base sur une méthode statistique croisée avec l'interprétation des images aériennes. Ce travail sera effectué dans le [Chapitre 3.2](#). En effet, le développement de la méthode statistique nécessite un terrain d'étude, ce qui n'est pas le cas de *l'élaboration des règles empiriques*, objet de ce chapitre. En effet, ces règles empiriques devront être opérationnelles, prêtes à être utilisées et appliquées pour tous cas d'étude et permettre l'identification et la quantification des matériaux des différents éléments de toit à l'échelle urbaine. Elles sont élaborées par un travail d'exploitation et de

croisement des données bibliographiques des [Chapitre 1.1](#) et [Chapitre 1.2](#) avec les résultats des entretiens et de l'enquête auprès des experts des matériaux de toitures.

Les règles empiriques présentées dans ce chapitre sont ordonnées en deux groupes selon leur nature (cf. [Figure 80](#)). Le premier groupe de règles porte sur le *passage* d'une famille de matériaux de rampant aux matériaux de rampant. Par exemple, en France, pour les bâtiments construits entre 2000 et 2011 les toitures en ardoises sont réparties entre 71,75% d'ardoise naturelle contre 28,25% d'ardoise en fibres ciment. Le second groupe établit une série de *corrélations* entre la famille de matériaux de rampant et les matériaux des autres éléments de toiture⁷⁰. Ces règles de corrélation se subdivisent elles-mêmes selon la nature de l'élément de toiture considéré : gouttière ou descente ; noue ; élément d'étanchéité. On peut citer comme exemple la règle suivante (corrélation entre le rampant en tuile et le matériau de la gouttière) : entre les années 1980 et 2000, pour les toitures en tuile, les matériaux de gouttières sont répartis entre 70% zinc naturel, 20% PVC, 5% Aluminium laqué et 5% matériaux autres (cuivre, acier inoxydable et acier galvanisé).

1.2. Collecte de données pour l'élaboration des règles

Pour établir ces règles, nous nous sommes basés de manière privilégiée sur des données collectées spécifiquement dans le cadre de cette thèse auprès des acteurs du domaine. En pratique, nous avons mené des *entretiens* avec plusieurs experts (représentants de syndicats professionnels, universitaires, historiens, industriels leaders, évaluateurs) que nous avons complété par une *enquête* plus ciblée auprès de fabricants (commerciaux, industriels) et d'artisans (essentiellement des couvreurs).

L'étude bibliographique relative à l'histoire des matériaux ([Chapitre 1.2](#)) et la présentation des matériaux de toitures ([Chapitre 1.1](#), et plus particulièrement l'étude du marché MSI) ont permis en amont, de préparer les guides d'entretien et, en aval des informations collectées, de participer à certains ajustements pour formuler les règles.

⁷⁰ Certaines règles de corrélation se font entre le matériau de rampant (et non la famille de matériaux) et le matériau de l'élément de toiture. Par exemple, pour une toiture en anthra-zinc, la gouttière est en anthra-zinc.

1.2.1. Entretiens

A partir de notre étude bibliographique (cf. [Chapitre 1.1](#), [Chapitre 1.2](#) et [Chapitre 2.3](#) (sur les critères de choix des matériaux)), nous avons pu émettre un ensemble d'hypothèses concernant les règles d'identification ou de quantification des matériaux de toiture à l'échelle urbaine. Ces hypothèses ont été ensuite présentées sous la forme d'un questionnaire évolutif et en partie ouvert sur la base d'une liste globale de questions (cf. [Annexe 6](#)) à différents experts des matériaux de toiture. Nous avons ainsi mené des entretiens⁷¹ semi-directifs⁷². Les deux premiers entretiens, avec M. Normand (Ingénieur au CSTB) et M. Boisseau (Syndicat des entreprises de couverture), ont débouché sur des informations très riches mais essentiellement qualitatives. Les cinq entretiens suivants ont eu comme objectif de faire ressortir des données quantitatives en se fixant des contraintes et des formulations particulières. Obtenir des données quantitatives sur les matériaux au niveau du patrimoine bâti n'était pas évident, car la plupart des interviewés ont une vision du marché et ce type de données est généralement confidentiel. Donc, nous avons eu pour stratégie de présenter les questions sous forme d'informations qualitatives tout en poussant progressivement la personne interrogée à donner sa vision quantitative. Chaque entretien a été retranscrit et analysé sous la forme d'une synthèse organisée en thématiques et renvoyée à l'interviewé pour validation (cf. [exemple dans l'Annexe 7](#)). Les résultats de ces analyses ont permis d'avoir une vision intéressante sur les matériaux des différents éléments de toiture. Ainsi, nous avons pu ressortir un ensemble de règles quantitatives et qualitatives.

1.2.2. Enquête

L'objectif de cette enquête est de confirmer, infirmer et même enrichir les différentes règles identifiées à partir des entretiens. Le questionnaire destiné aux industriels des matériaux se présente sous la forme d'une liste provisoire des règles que les personnes interrogées doivent valider ou invalider, et, dans la mesure du possible préciser en termes de données quantifiées (cf. [Annexe 8](#)). Pour rencontrer le maximum de personnes interrogées, nous avons saisi l'opportunité du salon BATIMAT 2013. Ainsi, nous avons proposé le sujet des règles à un projet de master mené par trois étudiants⁷³. Ces étudiants et moi-même nous sommes

⁷¹ Les entretiens ont été effectués soit dans les bureaux des experts soit par téléphone.

⁷² Les entretiens semi-directifs ont été basés sur des questions générales ouvertes et adaptées en fonction de l'acteur et avaient également vocation à nourrir l'étude historique du Chapitre 1.2.

⁷³ Jeanne, L., Mohamed Yassin, Y., Tarazona, S. (2013). « Emissions de contaminants de toitures : validation de règles de passage et de corrélation dans la mise en œuvre des matériaux ». Rapport projet multidisciplinaire du master SGE SAGE. 49 p.

présentés aux exposants de BATIMAT avec des questions précises. Les étudiants ont enrichi les données collectées lors de BATIMAT en contactant les magasins de vente des matériaux (Point P) et en rencontrant des artisans couvreurs.

Les différentes informations ont été collectées, interprétées et comparées pour pouvoir ressortir des règles « stabilisées » (cf. [Paragraphe 1.4.2](#)).

1.3. Profils des personnes interrogées

Notre échantillon de personnes interrogées, que ce soit à travers des entretiens ou de l'enquête, était volontairement hétérogène. Nous avons essayé d'avoir des profils différents afin de pouvoir confronter différents points de vue et solidifier au maximum notre travail.

1.3.1. Experts interrogés par entretiens

Des experts de profils différents ont été sollicités :

- *Philippe Boisseau* : Conseiller technique auprès des entreprises de couverture de Paris et petite couronne du syndicat des entreprises de génie climatique, de couverture - plomberie et de fumisterie (GCCP). Il anime des commissions techniques avec les professionnels de la couverture, de la plomberie et il traite les questions de la prévention technique des professionnels pour l'ensemble des métiers. Il a un recul historique des matériaux de couverture utilisés à Paris et en banlieue.

- *Cédric Normand* : Ingénieur Etudes et Recherche du Département Climatologie–Aérodynamique – Pollution – Epuration (CAPE) au CSTB de Nantes. Il a travaillé entre 2000 et 2004 sur l'instruction des Avis Techniques de la couverture en tant qu'Ingénieur de Département Enveloppe et Revêtements (DER) au CSTB de Champs-sur-Marne. Il est spécialiste des réglementations des matériaux de toiture.

- *Fabien Perez* : Responsable Normes dans la société NICOLL (un des leaders européens des produits en matériaux de synthèse (ex : PVC) pour le bâtiment). Il est spécialiste du matériau PVC : son histoire, son domaine d'application et son marché en particulier pour les évacuations des eaux de pluie.

- *Cécile Roland* : Responsable Applications environnementales de la société VMZINC (leader du zinc en France). Elle a une vision actuelle des matériaux de couverture en zinc en particulier par rapport à leurs caractéristiques environnementales.

- *Christophe Bissery* : Directeur du département R&D et Applications environnementales de la société VMZINC. Occupant ce poste depuis de nombreuses années, il est spécialiste des

matériaux de couverture en zinc : il maîtrise les données de marché, il connaît l'utilisation des différents produits de zinc sur les différents éléments de toit et il a également une vision historique de l'évolution du zinc tant d'un point de vue technique que réglementaire et même de marché.

- *Annick Texier* : Chercheuse et responsable du pôle métal dans le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH). Elle est spécialisée dans l'étude des couvertures métalliques (plomb, cuivre, zinc...) très anciennes datant du moyen âge jusqu'au 19^{ème} siècle. Elle a un recul historique de l'utilisation des matériaux de toiture.

- *Simon Vaillant* : Chargé de recherches au Centre d'archives d'architecture du 20^{ème} siècle. Il est un historien spécialisé dans l'histoire de l'urbanisation du 20^{ème} siècle. Il est également guide de parcours architectural et urbain de la ville de Créteil pour le compte de la Mairie. Il a une bonne connaissance de l'évolution des formes urbaines au 20^{ème} siècle qui a influencé l'utilisation des matériaux de toiture.

1.3.2. Acteurs interrogés à travers l'enquête

- *Deux couvreurs* ont pu être interrogés :

- Christophe Bourgoïn : Couvreur opérant depuis 30 ans, aujourd'hui formateur des Compagnons couvreurs. Il a une bonne connaissance de l'utilisation des matériaux de couverture, et plus particulièrement, les matériaux de haut de gamme (tuile, ardoise, zinc...). Il travaille sur des bâtiments d'habitations et des bâtiments prestigieux ;

- Antonio Fernandes : Couvreur professionnel actif depuis 20 ans. Il a une connaissance des matériaux de toitures construits du patrimoine bâti.

- *Des commerciaux* de plusieurs entreprises différentes ont été rencontrés au cours du salon BATIMAT 2013. Les entreprises sont spécialisées dans les matériaux suivants :

- *Acier*: ARCELOR-MITTAL (leader de l'acier en France), BACACIER;

- *Aluminium* : PREFA⁷⁴, GUTTER FRANCE, DAL'ALU (initiateur en Europe du concept de gouttière en aluminium laqué fabriquée en continu sur chantier) ;

- *Bardeaux bitumineux* : FIRESTONE, CULTISOL, HOLZPLAST, BTM et IKO⁷⁵ ;

⁷⁴ PREFA est en activité depuis 60 ans en Autriche et en France. L'entreprise a un bon recul historique. Elle est fortement implantée dans la région Rhône-Alpes et concentre son activité essentiellement sur les habitats collectifs et individuels.

⁷⁵ IKO est spécialisé dans les bardeaux bitumés de toiture, c'est la marque leader avec un réseau de distribution dans plus de 50 pays. Cette entreprise a commencé la pose de bardeaux au Canada en 1954. Donc, elle a un recul historique de l'utilisation des bardeaux.

- *PVC* : FIRST PLAST (deuxième entreprise dans la fabrication des éléments d'évacuation des eaux de pluie en PVC après NICOLL) ;
- *Ardoises en fibres ciment* : ETERNIT⁷⁶ (leader de la fabrication des ardoises en fibres ciment en France) ;
- *Zinc* : RHEINZINK (seconde grande entreprise de fabrication des couvertures en zinc après VMZINC), GENECOS, ELZINC ;
- *Tuile* : ERLUS⁷⁷. Monier et Imerys les leaders français de la tuile n'ont pas été présents à BATIMAT 2013.
- *Une représentante du Syndicat de l'acier* : Le syndicat de l'acier a pour objectif la promotion de l'acier. *A priori*, il dispose de données solides sur le sujet et est détenteur de données de marché mais aussi des données de patrimoine car le syndicat existe depuis 1889 ;
- *Les commerciaux de deux magasins Point P (situés à Ivry et Alfortville)*⁷⁸: Vendeurs de matériaux de construction utilisés par les artisans et les particuliers. Ils fournissent des données du marché des matériaux de toitures.

1.4. Démarche de formulation des règles

Les règles empiriques que ce soit les règles de passage ou les règles de corrélation que nous allons développer se traduisent par des règles qualitatives d'identification et des règles de quantification des matériaux de toitures.

Les règles d'identification sont issues d'une interprétation des données qualitatives des experts ainsi que l'étude bibliographique des [Chapitres 1.1 et 1.2](#). Leur objectif est d'orienter l'appréhension des matériaux des différents éléments de toit. Ainsi, elles seront déduites à partir d'une analyse des discours des experts. Elles seront décrites et introduites au fur et à mesure de l'étude d'un élément de toit dans ce chapitre.

Par contre, l'élaboration des règles quantitatives nécessite une stratégie spécifique puisqu'il s'agit de produire des données quantitatives. Ainsi, la démarche de formulation de ces règles se base tout d'abord, sur un travail de classification des experts interrogés ainsi qu'un travail

⁷⁶ ETERNIT est une entreprise industrielle française créée en 1922, producteur n°1 d'amiante-ciment, jusqu'à l'interdiction de l'amiante en 1997, remplacée depuis par les fibres ciment. C'est donc le principal fournisseur d'ardoise en fibres ciment. Il a une vision historique du marché des ardoises en fibres ciment.

⁷⁷ ERLUS est l'une des entreprises allemandes leaders dans la fabrication de matériaux de couverture en tuile, son marché est centré sur la région d'Alsace. Les réponses données par ce commerçant sont basées sur son expérience dans le marché français donc on en tiendra compte.

⁷⁸ Point P : une entreprise de vente des matériaux de construction depuis 1979

de classification des règles. Ensuite, par rapport à ces classifications une analyse des données collectées sera effectuée en appliquant un arbre de décision permettant d'aboutir aux règles quantitatives.

1.4.1. Classification des experts interrogés et de leurs informations associées

En fonction de leurs activités et de leurs connaissances par rapport aux matériaux de toitures, quatre types d'experts interrogés ressortent de cette étude (cf. Tableau 27) :

- **Type I** : il s'agit des experts internes aux fabricants industriels leaders du matériau. Ces personnes sont des spécialistes du marché et ont un recul historique de leurs produits.
- **Type II** : les experts de cette classe sont des professionnels de la mise en œuvre ou de la commercialisation, moins directement en lien avec la fabrication. Ils ne sont pas spécialistes d'un matériau spécifique, ils ont un profil plus au moins général par rapport à plusieurs matériaux de toitures ainsi qu'une vision de marché ou de patrimoine.
- **Type III** : il s'agit des experts des fabricants non leaders du matériau. Ce sont la plupart du temps des commerciaux d'entreprises nouvelles ou moins anciennes que les leaders. Ils ont une vision du marché d'un matériau spécifique.
- **Type IV** : il s'agit des représentants professionnels et évaluateurs. Ils ont un recul historique et réglementaire des matériaux de toiture utilisés à Paris et en banlieue. Leurs discours ont servi principalement pour élaborer les règles d'identification car ils n'ont pas de recul pour fournir des données quantitatives.

Tableau 27 : Typologie des différentes personnes interrogées à travers les entretiens et l'enquête

| Type I | Type II | Type III | Type IV |
|---|---|---|--|
| - M. Perez (Nicoll) - FIRST PLAST - Bissery et Roland (VMZINC) - RHEINZINK - ARCELOR-MITTAL - GUTTER France - DAL'ALU - ETERNIT - IKO ; ERLUS | - Bourgoin (couvreur) - Fernandes (couvreur) - Point P - Syndicat de l'acier | - BACACIER - PREFA - GENECOS - ELZINC - FIRESTONE - CULTISOL - HOLZPLAST - BTM | - Mme Texier - M. Boisseau - M. Normand - M. Vaillant |

Si cette typologie permet de qualifier les experts, elle n'indique en revanche rien sur la fiabilité des informations fournies. Ainsi, nous avons décidé de reclasser ces experts par rapport à la nature de l'information qu'ils fournissent. En effet, l'objectif du travail est d'obtenir des données quantitatives des matériaux de toiture au niveau du patrimoine bâti. Or, en fonction du profil de l'interviewé nous disposons soit de données de patrimoine soit de

données du marché actuel. Comme nous l'avons précisé dans la [Partie 1](#), les données du patrimoine bâti consistent à décrire ce qui est réellement mis en œuvre sur les toitures d'une manière globale sur un territoire donné (ce qui inclut généralement matériaux anciens et matériaux récents) alors que les données du marché donnent une vision ponctuelle des ventes des matériaux de toitures pour une période précise. Ainsi, dans la [Partie 1](#), nous avons analysé l'étude du marché MSI entre 2001 et 2011 (cf. [Chapitre 1.1](#)) ainsi que l'histoire des matériaux de toiture (cf. [Chapitre 1.2](#)). De plus, en analysant les discours des experts nous remarquons que les données fournies peuvent être qualitatives ou quantitatives. Donc, pour ressortir des règles quantitatives opérationnelles au niveau du patrimoine nous allons interpréter et croiser toutes les informations récoltées (entretiens, enquête, bibliographie), nous chercherons notamment à transformer des données de marché en données de patrimoine.

La première étape de l'élaboration des règles se base sur la classification des experts. Ainsi, selon l'expérience de l'expert et sa compétence nous essayons d'accorder un poids à son discours et à l'information qu'il nous fournit. Par exemple M. Bourgoin est un couvreur qui a travaillé dans des habitations et des bâtiments prestigieux : il pourra avoir tendance à sous-évaluer la répartition des matériaux des constructions économiques (les aciers, les bardeaux...). M. Fernandes a probablement un meilleur recul par rapport aux matériaux réellement mis en œuvre même pour les matériaux économiques car il n'est pas intervenu uniquement sur des chantiers prestigieux. De leur côté, les commerciaux peuvent avoir tendance à valoriser leurs produits et insister sur les points faibles des matériaux de leurs concurrents. Par exemple, les vendeurs des gouttières en aluminium affirment que leurs produits sont durables et faciles à mettre en œuvre. Les vendeurs du PVC insistent sur le fait que les gouttières en aluminium sont chères et nécessitent l'intervention d'une entreprise pour sa mise en œuvre alors que les gouttières en PVC peuvent être mises en œuvre par le propriétaire de la maison. Ainsi, nous remarquons que les producteurs des gouttières en PVC nous informent sur le prix des gouttières en aluminium et l'obligation de l'intervention d'une entreprise pour la mise en œuvre, dressant une réalité sensiblement différente de ce qui a été décrit par les vendeurs d'aluminium.

Dans ce cadre, nous proposons la classification suivante des experts. Tout d'abord, la classe expert type IV est gardée en tant que telle puisque ces experts nous fournissent essentiellement des données qualitatives. Nous considérons que leurs données qualitatives sont fiables du fait que nous avons mené avec eux un entretien semi-directif d'une durée minimale d'une heure. Ainsi, nous avons pu aborder avec eux plusieurs aspects sur les

matériaux de toitures permettant d'identifier les domaines où ils apparaissent compétents. Les informations liées à ces domaines sont considérées comme fiables. Ces données serviront pour résoudre quelques ambiguïtés lors de la formulation des règles.

Pour les autres experts, une nouvelle catégorisation est proposée. La fiabilité de la donnée fournie est classée en très fiable, moyennement fiable et peu fiable. Pour attribuer cette catégorisation trois critères sont pris en compte : le profil de l'expert, le cadre de la collecte de l'information et la famille des matériaux dont l'expert parle (en fonction de la famille des matériaux en question l'expert interrogé est plus ou moins apte à fournir une donnée fiable du fait de son profil). Ainsi, pour chaque famille de matériau il y a eu de constituer un tableau spécifique de catégorisation des experts.

Trois catégories d'experts ressortent :

- **Catégorie 1 : Expert fiable**: Il s'agit forcément d'experts du type I (des fabricants « leaders » du matériau) avec lesquels nous avons mené, comme pour les experts type IV, un entretien semi-directif d'une durée minimale d'une heure au cours de laquelle il nous a été possible d'apprécier leur expérience et leur profonde connaissance du matériau considéré, notamment au travers de leur parcours professionnel antérieur et/ou au sein de leur poste actuel. Ils disposent d'une bonne vision à la fois historique et technique du matériau. Nous considérons que les données quantitatives fournies dans un entretien auprès d'un expert de cette catégorie sont totalement pertinentes pour le matériau fabriqué par sa société.

- **Catégorie 2 : Expert moyennement fiable** : Cette catégorie comporte trois cas de figures. Tout d'abord, un expert type I avec lequel nous avons mené un entretien peut fournir des données sur les matériaux concurrents au matériau fabriqué par sa société. Ensuite, un expert type I que nous l'avons rencontré au salon BATIMAT fournit des données moins pertinentes qu'un expert de la catégorie 1 pour le matériau fabriqué par sa société. En effet, dans la plupart des cas les professionnels de BATIMAT ont été rencontrés par les étudiants et donc nous ne disposons que d'une appréciation et d'une information indirecte. Il ne nous a donc pas été possible d'exercer notre jugement quant à la crédibilité de l'interlocuteur.

Enfin, un expert type II peut être de catégorie 2 lorsqu'il a un recul par rapport à un matériau donné soit au niveau de la mise en œuvre (un artisan qui installe souvent ce matériau), soit au niveau de la commercialisation (un commerçant qui connaît bien le marché du matériau).

- **Catégorie 3 : Expert peu fiable** : Deux cas de figures se présentent. Tout d'abord, il s'agit d'un expert type III. Les informations recueillies de ces experts sont incertaines car lors de l'enquête nous avons omis de demander le profil et l'expérience de la personne interrogée ce

qui ne permet pas de bien juger la fiabilité de ses propos de plus le salon BATIMAT est un cadre spécifique de commercialisation des produits et du coup les entretiens ont été rapides par rapport aux entretiens semi-directifs effectués avec les autres experts. Enfin, un expert type II peut être de catégorie 3 lorsque son discours est douteux par rapport à un matériau donné (ex : M. Bourgoïn sous-estime la répartition des matériaux économiques (ex : bardeaux) car ils ne les installent pas). Ainsi, les informations de cette catégorie d'experts sont utilisées lorsqu'elles rapportent de nouvelles informations distinctes de celles avancées par les experts des autres catégories : elles sont alors utilisées « à défaut de mieux ».

1.4.2. Incertitude et classification des règles

La formulation des règles se base sur des données quantitatives fournies par les experts. Par exemple, Point P affirme que les toitures en ardoise sont réparties entre 90% de l'ardoise naturelle contre 10% de l'ardoise en fibres ciment. Pour formuler, une règle nous effectuons une analyse des données par rapport aux catégories des experts interrogés et en rajoutant des informations issues de l'étude bibliographique des [Chapitres 1.1 et 1.2](#).

En sciences sociales, la validation de la production d'une donnée ne requiert pas nécessairement ou impérativement une grande enquête ou beaucoup d'entretiens, rendant possible l'application de méthode statistique. Par exemple, [Alex Mucchielli \(1991\)](#) propose une validation à travers la définition de la *notion de saturation*⁷⁹ qu'il présente comme suit : « une recherche qualitative satisfait au critère de saturation lorsque les techniques de recueil et d'analyse des données utilisées sur le problème considéré ne fournissent plus aucun élément nouveau à la recherche ».

Dans notre cas d'étude, nous allons nous inspirer de cette notion en cherchant à trouver une démarche pour qualifier et valider les règles que nous produisons.

Nous décidons de classer les règles en *certaine*, *probable* et *incertaine*. Cette classification dépend de la nature de l'information et de la catégorie de l'expert.

Notons que les règles d'identification ne sont pas soumises à cette classification car ce sont des règles qualitatives permettant uniquement de mieux appréhender l'utilisation des matériaux de toiture.

⁷⁹ Cette notion est exploitée dans les travaux de [de Gouvello \(1999\)](#) comme guide, en ce sens, où il s'est arrêté au bout d'un certain nombre d'entretiens (variant entre trois et la dizaine selon le cas de figure), dès lors qu'il a eu la sensation d'avoir *grosso modo* « fait le tour » de la question considérée.

a. Règle « certaine » (classe A)

Cette règle est définitive, elle est suffisamment solidement établie pour ne pas avoir à être remise en question. Une règle est considérée certaine lorsque l'une au moins des conditions suivantes est respectée :

- la donnée quantitative est fournie par un expert de catégorie 1. Par exemple, M. Bissery de VMZINC précise qu'à partir de 1980 pour la rénovation des bâtiments anciens, 90% du zinc naturel est utilisé contre 10% du zinc prépatiné.
- la règle est issue d'une information historique permettant de traduire directement une donnée qualitative en donnée quantitative. Par exemple, avant 1960, les toitures en tuile sont 100% de la tuile en terre cuite. En effet, les autres variétés de la tuile sont apparues en toiture à partir des années 1960.
- il s'agit d'une donnée provenant de l'étude du marché de couvertures MSI⁸⁰ (2001-2011) décrites dans le [Chapitre 1.1](#) En conséquence, elle fournit des règles de patrimoine pour les bâtiments construits entre 2000 et 2011. Par exemple, en France, les toitures en ardoise construites entre 2000 et 2011 sont réparties entre 71,75% d'ardoise naturelle contre 28,25% d'ardoise en fibres ciment.

b. Règle « probable » (classe B)

C'est une règle opérationnellement acceptable. Elle est issue du croisement d'informations fournies par différents experts. Il conviendrait de la valider. Ce type de règle se manifeste comme suit :

- la règle est élaborée par la combinaison des données cohérentes issues de plusieurs experts de catégorie 2 de profils différents (cf. [Figure 81](#)).
- la règle est élaborée par la combinaison des données cohérentes issues des experts de catégorie 2 et des experts de catégorie 3 de profils différents (cf. [Figure 81](#)).

c. Règle « incertaine » (classe C)

Cette règle est issue d'informations de qualités faibles et elle est utilisée à défaut d'autres information sur le sujet et de manière provisoire. En d'autres termes, elle peut être remise en question de manière plus ou moins radicale. Ainsi, il conviendrait de la confirmer. Cette règle se manifeste comme suit :

⁸⁰ Notons que les données du marché se transforment en règles uniquement pour la période 2001-2011. Par contre, pour les autres périodes elles peuvent servir comme un moyen d'ajustement des données fournies par les experts.

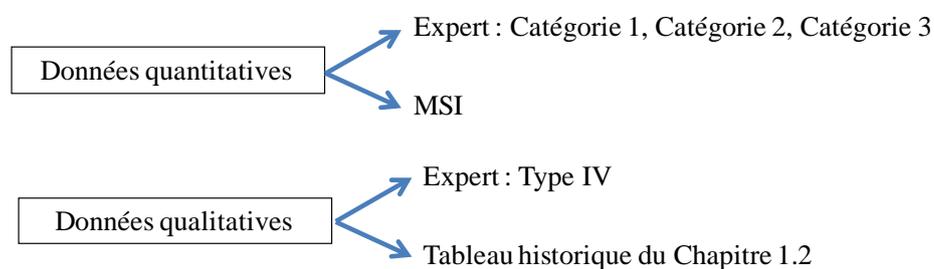
- la règle est une donnée fournie soit par un seul expert de catégorie 2 soit par un seul expert de catégorie 3 (cf. Figure 81).
- la règle est élaborée par la combinaison des données cohérentes issues des experts de catégorie 3 uniquement (cf. Figure 81).

Comme nous sommes dans une démarche d'obtention des résultats quantifiables, nous utiliserons ce type de règle dans notre modèle comme une première approche car nous n'avons pas d'autres moyens pour accéder à une information quantifiée. Nous ressortons comme règle : depuis les années 1980 pour les bardeaux bitumineux les matériaux de gouttières sont répartis entre 70% de zinc et 30% de PVC. Cette règle est issue de l'analyse des données du marché de deux fabricants de bardeaux bitumineux (HOLZPLAST et BTM de catégorie 3) (cf. Figure 81).

1.4.3. Etapes de formulation des règles quantitatives

Ayant la classification des experts et la classification des règles, nous décrivons dans ce paragraphe les différentes étapes à mener pour formuler une règle quantitative.

Tout d'abord, notons que quatre sources de données sont disponibles pour formuler les règles de quantification des matériaux de toiture. Ces sources sont classées par rapport à la nature de l'information fournie.



Les données qualitatives interviennent dans la formulation des règles pour résoudre certaines ambiguïtés ou encore enrichir les données quantitatives. Les experts type IV peuvent fournir des données qualitatives mais orientées vers la quantification. Par exemple, M. Boisseau (expert type IV) affirme que l'acier galvanisé est plus utilisé dans les régions montagneuses alors qu'en Île-de-France, son utilisation est marginale.

Ensuite, nous avons besoin à chaque fois de décider à partir de toutes les données disponibles la valeur et la classe que nous devons attribuer pour obtenir une règle quantitative. Pour résoudre cette problématique nous nous sommes inspirées des démarches d'aide à la décision utilisées dans différents domaines tels qu'en hydrologie urbaine (Carsten von der Ohe *et al.*, 2011) ou en informatique (Rakotomalala, 2005). Plus précisément, nous nous sommes

inspirés en termes sémiotiques et de la logique sous-jacente de ces études. Ainsi, pour résoudre un problème complexe, ces démarches utilisent un *arbre de décision*. Il s'agit de présenter sous forme graphique l'ensemble des tâches ou étapes à suivre permettant d'aboutir à différents résultats selon les conditions et les cas. Dans notre cas d'étude nous allons élaborer un arbre de décision, que nous appelons *arbre de définition et de classification des règles*, permettant à partir de l'interprétation des données disponibles d'obtenir les règles quantitatives et de les classer.

Enfin, pour élaborer des règles de quantification d'un matériau d'un élément de toit, nous allons procéder en trois temps. Tout d'abord, il faut choisir la famille de matériaux de rampant. Ensuite, un travail de repérage et de classification des experts doit être effectué. Enfin, il s'agit d'appliquer l'arbre de définition et de classification des règles.

1. *Choix de la famille de matériaux de rampant*

Comme nous l'avons montré dans le [Paragraphe 1](#), il est indispensable de commencer par évaluer les différentes familles de matériaux de rampants présentes à une échelle urbaine donnée (entité), objet du [Chapitre 3.2](#). Ensuite, pour chaque famille de matériaux nous quantifions les matériaux des différents éléments de toit (rampant, gouttière, noue...). Ainsi, *la formulation des règles se fera pour chaque famille de matériaux de rampants*.

2. *Repérage et classification des experts*

Il s'agit d'identifier les experts qui ont fourni des informations quantitatives sur la famille de matériaux de rampant (ainsi que ses éléments de toiture associés) en question. Ensuite, les experts sont classés en catégorie 1, 2 et 3.

3. *Application de l'arbre de définition et de classification des règles (cf. Figure 81)*

Tout d'abord, nous avons défini une *procédure d'ajustement* permettant d'attribuer à une règle quantifiée une distribution unique à partir des données cohérentes⁸¹ fournies par au moins deux experts (de même catégorie ou de catégories différentes hors catégorie 1). La procédure d'ajustement se base sur deux étapes. La première consiste à effectuer une opération de moyenne entre les données cohérentes. La deuxième étape vise à approximer la valeur moyenne obtenue par une valeur multiple de 5%. En effet, l'analyse des entretiens et de l'enquête montre que les valeurs attribuées par les experts sont au mieux des multiples de 5%. Ainsi, nous ne trouvons pas des chiffres du type 11%, 29% ou 83 %, etc. Dans ce cas, il est inutile de garder une estimation inférieure à l'ordre de 5%. En d'autres termes, dans les

⁸¹ Nous entendons par des données cohérentes lorsque les chiffres sont proches. Par exemple, M. Bourgoin estime que 70% des toitures en tuile sont en terre cuite contre 30% en béton. M. Fernandes affirme que 80% des toitures en tuile sont en terre cuite contre 20% en béton.

opérations de moyenne que nous allons effectuer, nous approximations les valeurs obtenues par des valeurs à pas de 5%. Par exemple si l'opération effectuée donne une valeur de 82%, il est plus légitime de l'approximer par 80% ou 85% en rajoutant d'autres informations. Ainsi, nous aurons recours aux informations issues soit d'une donnée historique soit d'une précision fournie par un expert type IV.

Notons une exception pour l'inox et la tuile métallique pour lesquels nous trouvons des valeurs inférieures à 5%. Dans ces cas la valeur évoquée est 1% : elle l'est pour souligner l'importance très marginale du produit en question à l'échelle de la ville.

La première étape de l'application de cet arbre consiste à vérifier si un expert de catégorie 1 a fourni des données quantitatives par rapport à la famille de matériau en question. Ainsi, deux cas se présentent :

Le premier cas est lorsqu'un expert de catégorie 1 (EC1) existe. Alors toutes les données quantitatives de cet expert (notées DEC1) se transforment en règles de classe A. Ensuite, nous regardons les experts de catégorie 2 (EC2). Si les données fournies par ces experts (DEC2) sont du même sujet⁸² que celles fournies par EC1, alors elles seront rejetées. En effet, nous considérons que les informations DEC1 sont certaines et donc suffisantes pour figer la règle. Les données DEC2 portant sur des sujets non abordés par l'EC1 seront traitées en fonction du nombre d'experts EC2 et par rapport à la présence des experts de catégorie EC3. Si aucun EC3 n'existe alors les données d'EC2 seront traitées comme suit : une donnée fournie par un seul expert EC2 aboutira à une règle de classe C. Si nous disposons de plusieurs EC2 alors soit ils fournissent des données cohérentes soit non. Dans le premier cas, ces données subiront la *procédure d'ajustement* permettant d'obtenir une règle de classe B. Dans le deuxième cas (DEC2 non cohérentes), nous analysons la donnée de chaque expert EC2 en la comparant à une donnée d'un expert type IV ou en rajoutant une précision historique. Ainsi, si l'une des DEC2 est cohérente avec l'histoire et DET4 alors elle aboutira à une règle C et l'autre DECE sera rejetée. Si les deux DEC2 incohérentes seront rejetées.

⁸² Nous entendons par « même sujet » la distribution des matériaux d'un élément de toit (rampant, gouttière, noue...) pour une famille de matériau de rampant spécifique dans des conditions bien précises (période historique (ex : entre 1980 et 2000), zone urbaine (ex : banlieue). Ainsi, deux experts peuvent fournir des valeurs différentes pour une même distribution. Par exemple, Arcelor précise que dans les zones agressives (montagne et littoral) l'acier est réparti entre 80% d'acier laqué contre 20% de l'acier galvanisé. Point P estime qu'en banlieue, les toitures en acier sont réparties entre 99% acier galvanisé contre 1% du laqué. M. Fernandes affirme qu'en banlieue, les toitures en acier sont réparties entre 90% acier galvanisé contre 10% du laqué. Dans ce cas M. Fernandes et Point P donnent des chiffres pour un même sujet « distribution des matériaux des toitures en acier en banlieue » alors qu'Arcelor parle d'un autre sujet « distribution des matériaux des toitures en acier dans les zones agressives ».

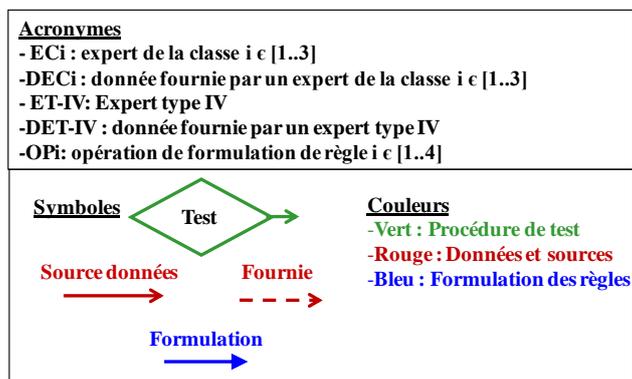
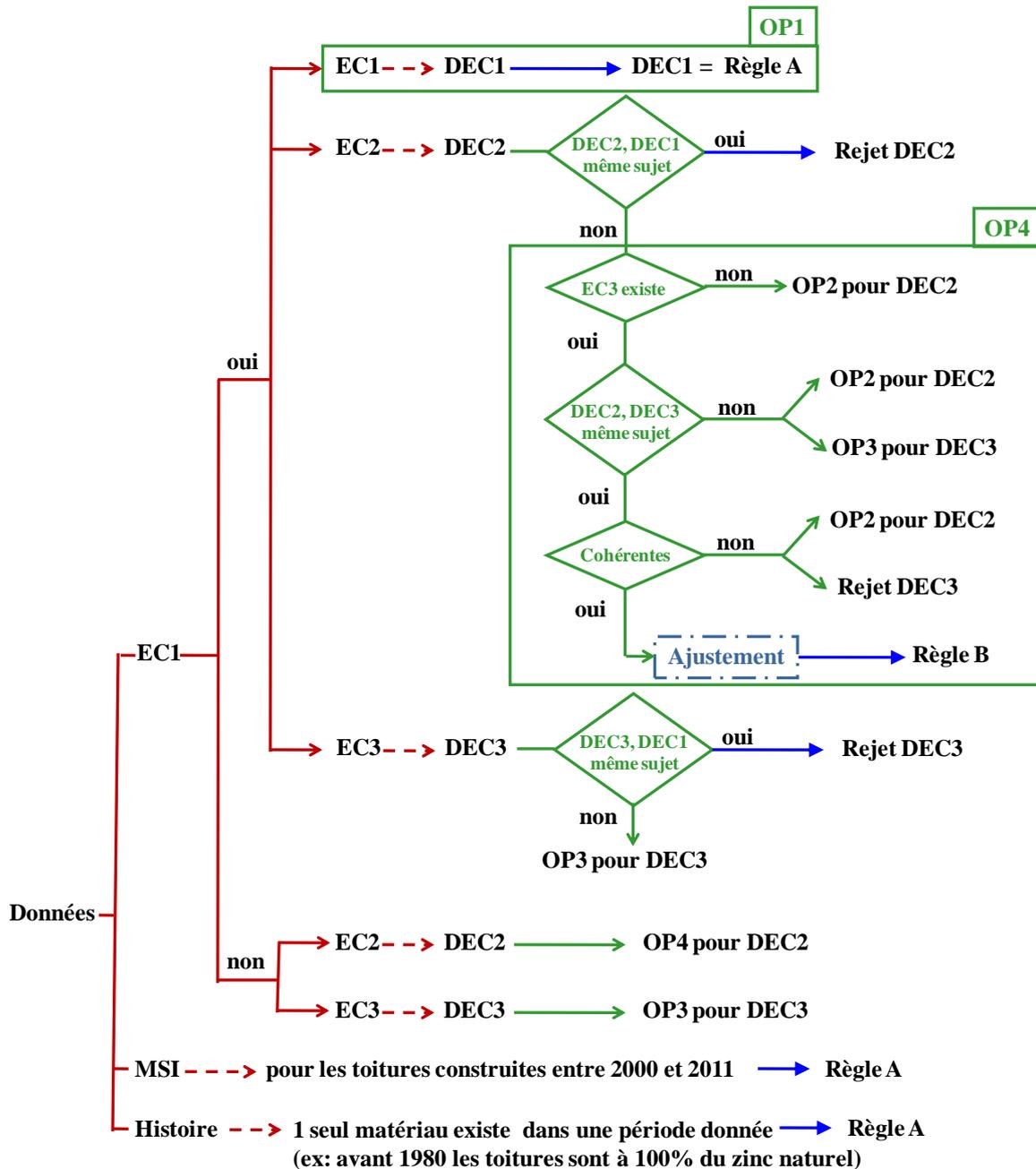
Dans le cas où au moins un expert EC3 existe alors soit sa donnée DEC3 est du même sujet et cohérente avec la donnée DEC2, dans ce cas nous effectuons une procédure d'ajustement permettant d'obtenir une règle de classe B. Sinon, la DEC3 non cohérente avec DEC2 sera rejetée. Si DEC3 et DEC2 n'ont pas le même sujet, alors nous appliquons la procédure précédente lorsqu'on a que des EC2 pour les experts EC2 et EC3.

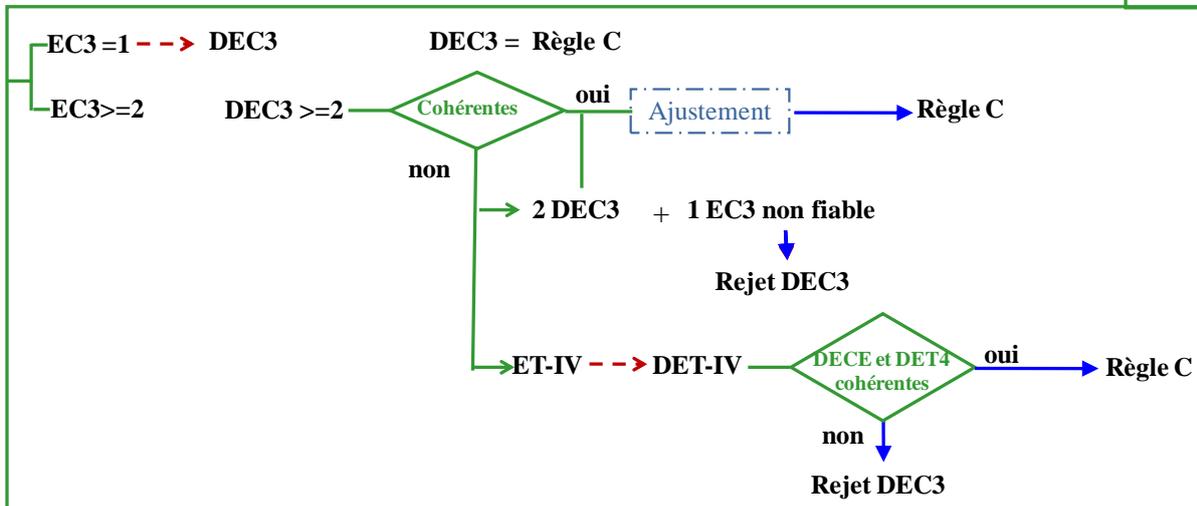
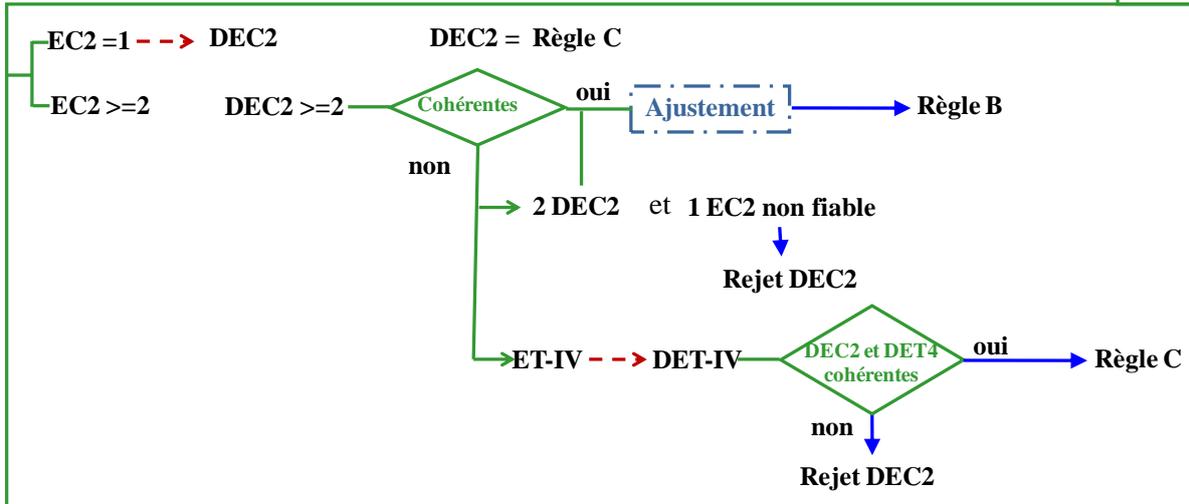
Dans le cas où nous avons uniquement EC1 et EC3, alors nous rejetons les DEC3 portant sur le même sujet que celles fournies par EC1. Pour les éventuelles DEC3 restantes, nous appliquons les procédures précédentes comme dans le cas d'un EC2 seul.

Le deuxième cas est lorsque les experts EC1 n'existent pas, dans ce cas toutes les étapes précédentes seront appliquées sauf le test des données avec les données DEC1.

Enfin, les données de marché MSI se transforment en données de patrimoine pour la période 2000-2001 et donc une règle de classe A. Certaines données historiques permettent aussi d'obtenir des règles de classe A lorsqu'il s'agit d'un matériau unique qui existe dans une période historique précise.

Figure 81 : Arbre de définition et de classification des règles





Procédure d'ajustement

- Opération de moyenne entre les données cohérentes
 - Ajustement de la valeur moyennée à un pas de 5%
 - Histoire
 - DET-IV
 - Histoire + DET-IV
- avec DET-IV : donnée fournie par un expert type IV

L'arbre de décision s'avère un outil très efficace pour aboutir à de nouvelles règles quantitatives qualifiées (certaine, probable et incertaine) à partir de données issues des experts des matériaux de toiture. Cette démarche est appliquée dans l'élaboration de toutes les règles de quantification des matériaux des différents éléments de toitures : les règles de passage de la famille des matériaux de rampant au matériau de rampant et les règles de corrélation entre le matériau du rampant et le matériau de l'élément du toit (gouttière, noue, descente...). Dans la

suite nous allons expliciter l'application de la méthode à quelques exemples : cas des règles de quantification des matériaux de rampants en zinc, des règles de quantification des matériaux rampants en tuile et des règles de quantification (de corrélation) des matériaux de gouttières pour les rampants en tuile), les autres sont décrits en [Annexe 9](#) et [Annexe 10](#).

2. Règles de passage de la famille de matériaux de rampant aux matériaux de rampant

L'analyse et l'exploitation des résultats des entretiens et de l'enquête, croisées avec les données bibliographiques de la Partie 1 ([Chapitre 1.1](#) et [Chapitre 1.2](#)), ont permis d'élaborer des règles d'identification et de quantification des matériaux de rampant.

Ainsi, pour chaque famille de matériaux de rampant nous avons identifié deux types de règles :

- Règles d'identification des matériaux de rampant

Ce sont des règles qui permettent de donner des informations qualitatives sur l'utilisation de du matériau de rampant. Par exemple, le zinc naturel est utilisé pour la rénovation des toitures en zinc ancien.

- Règles de quantification pour le passage de la famille des matériaux de rampant au matériau de rampant

Ce sont des règles qui permettent d'avoir des données quantitatives sur les matériaux de rampant. La classe de ces règles sera indiquée, cela a été comme décrit dans le [Paragraphe 1.4.2](#) (classe A, B ou C).

Comme décrit dans le [Paragraphe 1](#), l'identification visuelle des matériaux de toiture n'est pas possible, nous pouvons distinguer entre famille de zinc et famille de tuiles mais nous ne pouvons pas identifier si le zinc est prépatiné ou naturel. Cette information est indispensable puisque l'émission de contaminant dépend du matériau auquel nous avons associé une situation-type d'émission spécifique comme décrit dans le [Chapitre 2.2](#).

Ainsi, les règles de quantification pour le passage de la famille des matériaux de rampant au matériau de rampant permettent d'attribuer une répartition des matériaux de rampant au sein d'une même famille de matériaux totalisant une certaine surface au niveau d'une entité de l'échelle urbaine. Par exemple, dans les zones agressives (montagne et littoral), la famille des matériaux en acier se répartie entre 80% d'acier laqué et 20% d'acier galvanisé.

Nous allons présenter ces règles par familles de matériaux de rampant et nous allons détailler l'élaboration des règles pour la famille zinc et la tuile. Pour les autres familles de matériaux, l'analyse est expliquée dans l'[Annexe 9](#).

2.1. Famille de matériaux en zinc

La famille des matériaux en zinc comprend : le zinc naturel (Zn-Cu-Ti), le zinc naturel avec cadmium, le zinc prépatiné, le zinc bi-laqué, et le zinc coloré en masse. Les acteurs interrogés pour cette famille de matériaux sont : Mme Texier (Historienne), M. Boisseau (Syndicat des entreprises de couverture), M. Normand (Ingénieur au CSTB), M. Fernandes (Couvreur), M. Bourgoïn (Couvreur), Point P (Vendeur de matériau), Mme Roland et M. Bissery (VMZINC), M. Girard (commercial de RHEINZINK) et M. Le Breton (commercial chez GENECOS).

2.1.1. Règles d'identification des matériaux en zinc

Dans notre étude nous avons remarqué que le zinc est un matériau bien documenté. Les différents acteurs interrogés ont des connaissances larges sur l'utilisation du zinc en couverture. Ceci s'explique principalement par un facteur historique lié à l'utilisation du zinc pendant la période Haussmannienne ([cf. Chapitre 1.2](#)).

Entre 1800 et 1850 le zinc en rampant de pavillon est quasiment absent (entretien Mme Texier).

D'après les acteurs de VMZINC, entre 1960 et 1983 (date de normalisation de la composition du zinc ([cf. Chapitre 1.2](#))), certaines sociétés n'ont jamais utilisé de cadmium dans la composition du zinc alors que d'autres l'ont fait. VMZINC n'utilisait pas du cadmium dans ses alliages. Ainsi, il est difficile de savoir à l'époque quelle part de marché a été alimentée par le zinc avec cadmium par rapport au zinc sans cadmium. Par exemple, sur Paris il est très difficile de distinguer entre ces deux alliages de zinc.

Tous les acteurs affirment que les nouvelles gammes du zinc (prépatiné apparu en 1978 et coloré en masse apparu en 2005) sont purement esthétiques sans aucune modification des propriétés techniques du matériau. Le choix d'une variété de zinc peut être effectué dans un cadre réglementaire. Par exemple, dans le cas de la rénovation d'un bâtiment impliquant son changement d'aspect, il faudra alors, quasiment et systématiquement en référer à un architecte des Bâtiments de France qui va voir si c'est admissible dans l'environnement où se place le bâtiment. Dans la réalité terrain, les experts affirment que le zinc naturel est le matériau de la

famille zinc très majoritairement employé en couverture. Il occupe la plus grande part de marché.

Au niveau de sa durabilité, nous avons remarqué une contradiction entre les dires des industriels et le marché des matériaux de couverture. Les professionnels de VMZINC affirment que la qualité du zinc est constante dans le temps et que c'est l'atmosphère qui a changé et est devenue moins agressive avec des vitesses de corrosion divisées par 3, 4 et même 5 donc une durée de vie multipliée par 3, 4 et même 5. Ce sont les caractéristiques métallurgiques du zinc de pureté 99,995% qui font qu'il est aussi durable. Sa résistance au vieillissement est intrinsèque depuis son apparition.

Selon le marché de couverture (MSI, 2006), la durée de vie du zinc se situe entre 40 et 50 ans : elle serait donc moins importante que ce que les industriels ont avancé (100 ans pour VMZINC et RHEINZINK). Ceci s'expliquerait d'une part par la tendance des industriels à surestimer la performance de leurs produits et, d'autre part, par le fait que le marché de couverture donne une vision des pratiques réelles de rénovation des toitures. Donc, il est plus légitime de garder les valeurs du marché de couverture, ainsi nous considérons que la rénovation d'une toiture en zinc se fait tous les 50 ans. Cette donnée a été confirmée par GENECOS et ELZINC.

D'après VMZINC, l'utilisation du zinc s'est élargie à d'autres applications. Il y a eu une grande période (les années 1980-1990) de remplacement de bardeaux bitumineux, qui se sont révélées non durables, par des couvertures en zinc.

De cette analyse découlent les règles suivantes :

| | |
|---|---|
| <p>Règles d'identification du matériau : zinc naturel, zinc prépatiné, zinc bi-laqué et le zinc coloré en masse (RIMZ)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - RIMZ 1 : Le cadmium existait dans le zinc naturel produit entre 1960 et 1983. - RIMZ 2 : La rénovation d'une toiture en zinc se fait tous les 50 ans. - RIMZ 3 : Le zinc naturel est utilisé pour la rénovation des toitures en zinc ancien. - RIMZ 4 : Le zinc prépatiné est plus utilisé dans les nouvelles constructions. - RIMZ 5 : Le quartz zinc gris est plus utilisé que l'antra-zinc gris foncé. |
|---|---|

2.1.2. Règles de quantification des matériaux en zinc

L'application des étapes de la formulation des règles est comme suit :

- 1- Famille de matériaux de rampant en zinc
- 2- Classification des experts :

| Catégorie 1 : EC1 | Catégorie 2 : EC2 | Catégorie 3 : EC3 | Type IV : ET-IV |
|--------------------|---|--|---|
| - Bissery (VMZINC) | - M. Girard (commercial de RHEINZINK) - Bourgoin (couvreur) - Fernandes (couvreur) - Point P | - M. Le Breton (commercial chez GENECOS) | - Mme Texier - M. Boisseau - M. Normand |

3- Application de l'arbre de définition et de classification des règles

En termes de répartition des différentes variétés du zinc nous avons eu les données résumées dans le [Tableau 28](#).

Tableau 28 : Synthèse des données sur la répartition des matériaux en zinc

| Expert | Précision | Zinc naturel | Zinc prépatiné | Zinc coloré en masse (apparue en 2005) |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---|--|--|
| M. Bissery de VMZINC | Pour la rénovation | 90% | 10% | - |
| | Bâtiments neufs | 30% | 70% | - |
| M. Girard | Part de marché de RHEINZINK | 80% | 15% | 5% |
| | Bâtiments neufs | 70% | 30% « zinc gris foncé type anthra » | - |
| M. Le Breton | Part de marché de GENECOSS | 5% | 95% | - |
| M. Fernandes | Répartition à Paris | 90% | 10% | - |
| M. Bourgoin | Répartition à Paris | 90% | 10% | - |
| | Répartition en banlieue parisiennes | 70% | 30% « zinc gris clair type quartz » | - |
| Point P (Alfortville et Ivry) | Répartition en banlieue parisiennes | 80% | 20% | - |
| | Répartition à Paris | - | - | - |
| MSI | Répartition en France | Entre 2001 et 2011 les ventes du zinc représentent 3% des matériaux de toiture. | | |
| Histoire | Avant 1980 | 100% | - | - |

(-) Données non fournies

Pour ressortir des règles quantitatives nous avons appliqué l'arbre de définition et de classification des règles (cf. [Figure 81](#)).

L'information historique, validée par tous les acteurs, affirmant qu'avant 1980 les toitures en zinc sont du zinc naturel, du fait que le zinc prépatiné est apparue en 1978, ce qui permet de ressortir une règle de classe A.

- D'après M. Bissery EC1 :

- les bâtiments neufs la répartition des matériaux en zinc est de 70% du zinc prépatiné et 30% du zinc naturel. Il s'agit donc d'une règle de classe A⁸³.

- à partir de 1980 pour la rénovation des bâtiments anciens, en particulier à Paris, 90% du zinc naturel est utilisé contre 10% du zinc prépatiné. Il s'agit d'une règle A⁸⁴.

- D'après M. Girard EC2 :

Vu que le zinc coloré en masse est apparu en 2005 alors en termes de patrimoine bâti ce matériau peut être négligé. Les données de M. Girard sont des données de marché mais elles peuvent être transformées en données de patrimoine et nous pouvons ainsi faire ressortir la règle suivante :

- Pour les bâtiments construits à partir de 2005 les toitures en zinc sont réparties entre 80% du zinc naturel, 15% du zinc prépatiné et 5% du zinc coloré en masse. C'est une donnée unique impliquant une règle de classe C.

- M. Bourgoin, Point P et M. Girard : 3EC2

- Les données fournies par ces trois experts sont cohérentes pour la distribution des matériaux en zinc en banlieue. Ainsi, dans la banlieue parisienne le zinc en toitures est réparti entre 72% de zinc naturel et 28% du zinc prépatiné (surtout quartz). Après ajustement (en donnant plus de poids au zinc naturel qui reste le plus utilisé d'après M. Bissery, M. Normand et M. Boisseau) nous gardons la distribution suivante : dans la banlieue parisienne le zinc en toitures est réparti entre 75% de zinc naturel et 25% du zinc prépatiné (surtout quartz). Il s'agit d'une règle de classe B.

- Données MSI :

Entre 2001 et 2011 les ventes du zinc représentent 3% des matériaux de toiture. Il s'agit donc d'une règle de classe A.

⁸³ Il convient de noter que d'après le Tableau 28 nous remarquons que cette répartition est confirmée aussi par RHEINZINK et le couvreur M. Bourgoin.

⁸⁴Cette répartition est confirmée aussi par M. Bourgoin.

De cette analyse les règles de patrimoine qui en ressortent sont :

| Classe de Règle | Les règles de passage de la famille des matériaux en zinc au matériau zinc naturel, zinc prépatiné, zinc bi-laqué et le zinc coloré en masse (RQMZ) |
|-----------------|--|
| Règles classe A | <ul style="list-style-type: none"> - RQMZ-A 1: Avant 1980, les toitures en zinc sont à 100% du zinc naturel - RQMZ-A 2 : A partir de 1980 pour la rénovation des toitures anciennes en zinc, 90% de zinc naturel est utilisé contre 10% du zinc prépatiné. - RQMZ-A 3: Les toitures neuves en zinc sont réparties entre 70% du zinc prépatiné et 30% du zinc naturel. |
| Règles classe B | <ul style="list-style-type: none"> - RQMZ-B 2: Dans la banlieue parisienne, les toitures en zinc sont réparties entre 75% de zinc naturel et 25% du zinc prépatiné (surtout quartz). |
| Règles classe C | <ul style="list-style-type: none"> - RQMZ-C 1 : Pour les bâtiments construits à partir de 2005 les toitures en zinc sont réparties entre 80% du zinc naturel, 15% du zinc prépatiné et 5% du zinc coloré en masse. |

2.2. Famille de matériaux en tuiles

La famille des matériaux en tuile comporte : les tuiles en terre cuite (engobée, émaillée et siliconée), les tuiles béton, les tuiles métalliques et les tuiles en plastique. Les acteurs interrogés pour cette famille de matériaux sont : M. Boisseau, M. Normand, M. Fernandes, les vendeurs de Point P, M. Bourgoin et les commerciaux d'ERLUS et UBBINK.

2.2.1. Règles d'identification des matériaux en tuiles

Les acteurs affirment que les tuiles en terre cuite sont les plus anciennes et restent les plus utilisées par rapport aux autres types de tuiles. Les critères de choix d'une variété de tuile par rapport à une autre sont le prix et la durabilité. Les tuiles sont plus utilisées dans les habitats individuels et collectifs. Le marché des matériaux de couverture (cf. Chapitre 1.1), étudie les ventes des tuiles béton, des tuiles métalliques et des tuiles en terre cuite sans différencier entre engobée, émaillée et siliconée. D'après les acteurs, les tuiles en plastiques représentent de nouveaux produits très limités en termes de marché et cela va prendre du temps pour qu'elles soient installées sur des toitures réelles. Donc, dans la suite nous allons négliger les tuiles en plastique. La tuile en béton est apparue dans à la fin du 19^{ème} siècle mais son utilisation était alors marginale. Dans l'Île-de-France, la tuile béton est de plus en plus utilisée dans les constructions neuves. Par contre, à Paris, on ne trouve que de la tuile en terre cuite dans les

zones pavillonnaires qui restent limitées. La tuile métallique est un matériau très économique, qui existe plus dans les régions du Nord, coté Belgique et est quasiment absent en Île-de-France. En effet, elles sont utilisées surtout en montagne car elles sont bien adaptées aux conditions climatiques en montagnes. Le deuxième marché des tuiles métalliques, c'est le remplacement des bardeaux (shingle). En fait les toitures en bardeaux ont des pentes relativement faibles et les tuiles métalliques peuvent se mettre en place directement sur les bardeaux. En d'autres termes le renouvellement des toitures en bardeaux se fait par un ajout d'un lattage sur les bardeaux existant (sans les enlever) puis on met les tuiles métalliques au-dessus. Globalement, l'utilisation de la tuile métallique dans la région parisienne est marginale moins de 1% en termes de surface.

Pour le renouvellement de toiture en tuile, on dispose uniquement des durées de vie des matériaux (cf. Chapitre 1.1), 100 ans pour la tuile en terre cuite et 50 ans pour la tuile béton.

De cette analyse découle les règles suivantes :

| | |
|---|--|
| <p>Règles d'identification du matériau : tuile en terre cuite, tuile béton, tuiles métallique et tuile en plastique (RIMT)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - RIMT 1 : Les tuiles béton sont utilisées sur les constructions neuves de l'Île-de-France. - RIMT 2 : Les tuiles métalliques sont plutôt utilisées dans les régions montagneuses. - RIMT 3 : Le renouvellement d'une toiture en tuile en terre cuite se fait au moins tous les 100 ans. - RIMT 4 : Le renouvellement d'une toiture en tuile béton se fait tous les 50 ans. |
|---|--|

2.2.2. Règles de quantification des matériaux en tuiles

L'application des étapes de la formulation des règles est comme suit :

- 1- Famille de matériaux de rampant en tuile
- 2- Classification des experts :

| Catégorie 2 : EC2 | Type IV : ET-IV |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - ERLUS⁸⁵ - Bourgoin (couvreur) - Fernandes (couvreur) - Point P | <ul style="list-style-type: none"> - M. Boisseau - M. Normand |

- 3- Application de l'arbre de définition et de quantification des règles

En termes de répartition des différentes variétés du zinc nous avons collectées les données présentées dans le [Tableau 29](#).

⁸⁵ ERLUS est un des leaders des matériaux en tuile, son expert est classé EC2 car il a été rencontré à BATIMAT.

Tableau 29 : Synthèse des données sur la répartition des matériaux en tuile

| Expert | Précision | Tuile en terre cuite | Tuile béton | Tuile métallique |
|------------------------------|--|-----------------------------|--------------------|-------------------------|
| Erlus | Valeurs de ventes de cette entreprise | 80% | 20% | 1% |
| M. Bourgoin | Répartition en banlieue parisienne | 70% | 30% | 1% |
| | Répartition à Paris | | | |
| M. Fernandes | Répartition à Paris | 80% | 20% | 1% |
| Point P (Alfortville) | Répartition en banlieue parisienne | 95% | 5% | 1% |
| Point P (Ivry) | Répartition à Paris | 80% | 20% | 1% |
| MSI | Marché des matériaux de couverture en France sur 11 années (2001-2011) | 89,9% | 9,2% | 0,9% |
| Histoire | Avant les années 1960 | 100% | - | - |

Toutes les personnes interrogées confirment qu'à l'échelle de la ville l'utilisation de la tuile métallique est marginale : moins de 1% en termes de surface. Ainsi, dans une ville les tuiles métalliques représentent moins de 1% des matériaux de toiture est une règle de classe A.

Tous les experts fournissant des données quantitatives sont de catégorie 2. Les informations recueillies (de marché et de patrimoine) sont cohérentes ce qui nous permet de définir des règles B. Cette cohérence vient du fait que la tuile est un matériau très stable dans le temps.

Ainsi, pour avoir la répartition entre la tuile béton et la tuile en terre cuite nous appliquons la procédure d'ajustement (cf. Figure 81). Le calcul de la moyenne des valeurs donne, qu'en banlieue, les toitures en tuile sont réparties entre 82% des tuiles en terres cuites et 18% en béton. Alors qu'à Paris les toitures en tuile sont réparties entre 77% des tuiles en terres cuites et 23% en béton. Pour ajuster les valeurs à 5%, nous allons croiser le résultat obtenu avec des informations historiques. Ainsi, à partir des années 1960 (cf. Tableau 8 du Chapitre 1.2), la tuile béton devient une nouvelle référence en matière de couverture moderne, en France, pour des raisons économiques surtout la période entre 1960-1980. Aujourd'hui, son utilisation a régressé. En effet, elle souffre d'une image négative puisqu'elle vieillit plus rapidement que la tuile en terre cuite, elle n'est utilisée plus que dans les constructions économiques (M. Boisseau et M. Normand). Ainsi, en termes de patrimoine, la proportion de la tuile béton est plus importante que celle attribuée par les données du marché. Ainsi, nous majorons la proportion trouvée en passant de 18, 33% à 20% et donc 80% pour les tuiles en terre cuite. De même pour les valeurs à Paris.

- A partir de 1960, que ce soit en banlieue et à Paris, les toitures en tuiles sont réparties entre 80% des tuiles en terres cuites et 20% des tuiles béton. Il s'agit d'une règle de classe B

- Données MSI :

Entre 2001 et 2011, les toitures en tuiles sont réparties entre 89,9% de tuile en terre cuite, 9,2% de tuile béton et 0,9% de tuile métallique. Soit donc une règle classe A.

De cette analyse les règles de patrimoine qui en ressortent sont :

| Classe de Règle | Les règles de quantification pour le passage de la famille des matériaux en tuiles au matériau tuile en terre cuite, tuile béton, tuiles métallique et tuile en plastique (RQMT) |
|------------------------|--|
| Règles classe A | <ul style="list-style-type: none"> - RQMT-A 1 : Dans une ville les tuiles métalliques représentent moins de 1% des matériaux de toiture. - RQMT-A 2 : Avant les années 1960, 100% des toitures en tuiles sont en terre cuite. - RQMT-A 3 : En France, pour les bâtiments construits entre 2000 et 2011 les toitures en tuiles sont réparties entre 89,9% de tuile en terre cuite, 9,2% de tuile béton et 0,9% de tuile métallique. |
| Règles classe B | <ul style="list-style-type: none"> - RQMT-B 1 : A partir de 1960, en Île-de-France, les toitures en tuiles sont réparties entre 80% des tuiles en terres cuites et 20% des tuiles béton. |

2.3. Synthèse des règles d'identification des matériaux de rampant

Le [Tableau 30](#) résume les règles d'identification des matériaux de rampant. L'analyse de ces règles montre qu'il s'agit dans la plupart du temps des règles de renouvellement du matériau de toiture. Parfois, pour les matériaux d'une même famille les taux de renouvellements sont différents (ex : tuile béton et tuile en terre cuite) et dans d'autres cas le taux de renouvellement est le même pour tous les matériaux de la famille (ex : famille acier).

Tableau 30 : Synthèse des règles d'identification des matériaux de rampants

| Famille des matériaux | Règles d'identification |
|---|--|
| Acier | <ul style="list-style-type: none"> - RIMA 1 : L'acier galvanisé et l'acier laqué peuvent être utilisés pour les bâtiments annexes d'une maison (ex : garage, un abri de jardin). - RIMA 2 : Le renouvellement d'une toiture en acier se fait tous les 100 ans. |
| Aluminium | <ul style="list-style-type: none"> - RIFAI 1 : Le renouvellement d'une toiture en aluminium se fait tous les 100 ans. |
| Ardoise | <ul style="list-style-type: none"> - RIMAr 1 : Le renouvellement d'une toiture en ardoise se fait avec le même matériau initial. - RIMAr 2 : Le renouvellement d'une toiture en ardoise naturelle se fait tous les 100 ans. - RIMAr 3 : Le renouvellement d'une toiture en ardoise en fibres ciment se fait tous les 50 ans. |
| Bardeaux bitumineux | <ul style="list-style-type: none"> - RIB 1 : Le renouvellement d'une toiture en bardeaux bitumineux se fait tous les 25 ans. |
| Cuivre | <ul style="list-style-type: none"> - RIFC 1 : Le cuivre est un matériau noble et très cher, il est utilisé dans quelques bâtiments publics dans des cas très exceptionnels. - RIFC 2 : Le cuivre est renouvelé au minimum tout les 100 ans. |
| Étanchéités des toitures-terrasses | <ul style="list-style-type: none"> - RIFT 1 : Entre 1955 et 1980 les étanchéités bitumineuses sont en bitume oxydé. - RIFT 2 : Depuis les années 1980 le bitume oxydé est remplacé par le bitume modifié. - RIFT 3 : Les membranes bitumineuses ont une durabilité comprise entre 20 et 40 ans. - RIFT 4 : Le renouvellement des membranes synthétiques est tous les 30 ans. |
| Plomb | <ul style="list-style-type: none"> - RIP 1 : Le renouvellement d'une toiture en plomb se fait tous les 200 ans. - RIP 2 : Les couvertures en plomb sont utilisées sur les bâtiments très anciens et prestigieux. |
| Tuile | <ul style="list-style-type: none"> - RIMT 1 : Les tuiles béton sont utilisées sur les constructions neuves de l'Île-de-France. - RIMT 2 : Les tuiles métalliques sont plutôt utilisées dans les régions montagneuses. - RIMT 3 : Le renouvellement d'une toiture en tuile en terre cuite se fait au moins tous les 100 ans. - RIMT 4 : Le renouvellement d'une toiture en tuile béton se fait tous les 50 ans. |
| Zinc | <ul style="list-style-type: none"> - RIMZ 1 : Le cadmium existait dans le zinc naturel produit entre 1960 et 1983. - RIMZ 2 : La rénovation d'une toiture en zinc se fait tous les 50 ans. - RIMZ 3 : Le zinc naturel est utilisé pour la rénovation des toitures en zinc ancien. - RIMZ 4 : Le zinc prépatiné est plus utilisé dans les nouvelles constructions. - RIMZ 5 : Le quartz zinc gris est plus utilisé que l'antra-zinc gris foncé. |

L'information sur le renouvellement du matériau permettra d'identifier son âge dans une entité. D'autres règles d'identification permettent de préciser le mode d'utilisation du matériau de toiture (ex : règle RIMZ 3). Ces règles qualitatives seront utilisées pour faciliter la quantification des matériaux de rampant au niveau d'une entité d'une échelle urbaine donnée.

2.4. Synthèse des règles de quantification pour le passage de la famille de matériaux au matériau de rampant

L'élaboration des règles pour les familles des matériaux : acier, ardoise et étanchéité- terrasse sont détaillées dans l'[Annexe 9](#). Pour les familles de matériaux : plomb, cuivre, aluminium et bardeaux bitumineux aucune règle de quantification pour le passage de la famille des matériaux au matériau de rampant n'a pu être élaborée. D'une part, le plomb et les bardeaux bitumineux existent en une seule variété. D'autre part, le plomb, le cuivre et l'aluminium sont des matériaux négligeables à l'échelle de la ville avec une proportion moins de 1% validée par tous les experts.

Le [Tableau 31](#) résume les règles de quantification pour le passage de la famille des matériaux au matériau de rampant. Au total 9 règles classe A, 3 classe B et 5 classe C ont pu être élaborées. Ainsi, la majorité des règles sont certaines montrant que la démarche employée pour obtenir des règles de quantification à partir des enquêtes est prometteuse.

Tableau 31 : Synthèse des règles de quantification pour le passage de la famille des matériaux de rampant au matériau du rampant

| Famille des matériaux | Classe de règles | | |
|---|--|---|--|
| | Classe A | Classe B | Classe C |
| Ardoise | <p>- RQMar-A 1 : En France, pour les bâtiments construits entre 2000 et 2011 les toitures en ardoises sont réparties entre 71,75% d'ardoise naturelle contre 28,25% d'ardoise en fibres ciment.</p> <p>- RQMar-A 2 : Avant les années 1950, 100% des toitures en ardoise sont en ardoise naturelle</p> | - | <p>- RQMar-C 1 : En banlieue parisienne, les toitures en ardoise sont réparties entre 80% d'ardoise naturelle 20% en ardoise en fibres ciment.</p> <p>- RQMar-C 2 : A Paris, les toitures en ardoise sont réparties entre 90% d'ardoise naturelle et 10% d'ardoise en fibres ciment.</p> |
| Acier | - | <p>- RQMA-B 1 : La famille des aciers est répartie entre 85% de l'acier galvanisé, 10% de l'acier laqué et 5% de l'acier inoxydable.</p> | <p>- RQMA-C 1 : Dans les zones agressives (montagne et littoral), 80% d'acier laqué est utilisé contre 20% d'acier galvanisé.</p> |
| Étanchéités des toitures-terrasses | <p>- RQMT-A 1 : En France, pour les bâtiments construits entre 2000 et 2011 les étanchéités terrasse sont réparties entre 58,4% de membranes bitumineuses modifiées SBS, 14,6% de membranes bitumineuses modifiées APP, 18% pour les membranes synthétiques, 7% pour l'asphalte et 2 pour les étanchéités liquides.</p> | - | <p>- RQMT-C 1 : Les membranes bitumineuses sont réparties entre 90% membranes bitumineuses modifiées et 10% membranes bitumineuses oxydées.</p> |

| Famille des matériaux | Classe de règles | | |
|-----------------------|---|---|---|
| | Classe A | Classe B | Classe C |
| Tuile | <p>- RQMT-A 1 : Dans une ville les tuiles métalliques représentent moins de 1% des matériaux de toiture.</p> <p>- RQMT-A 2 : Avant les années 1960, 100% des toitures en tuiles sont en terre cuite.</p> <p>- RQMT-A 3 : En France, pour les bâtiments construits entre 2000 et 2011 les toitures en tuiles sont réparties entre 89,9% de tuile en terre cuite, 9,2% de tuile béton et 0,9% de tuile métallique.</p> | <p>- RQMT-B 1 : A partir de 1960, en Île-de-France, les toitures en tuiles sont réparties entre 80% des tuiles en terres cuites et 20% des tuiles béton.</p> | - |
| Zinc | <p>- RQMZ-A 1: Avant 1980, les toitures en zinc sont à 100% du zinc naturel</p> <p>- RQMZ-A 2 : A partir de 1980 pour la rénovation des toitures anciennes en zinc, 90% du zinc naturel est utilisé contre 10% du zinc prépatiné.</p> <p>- RQMZ-A 3: Les toitures neuves en zinc sont réparties entre 70% du zinc prépatiné et 30% du zinc naturel.</p> | <p>- RQMZ-B 1: Dans la banlieue parisienne, les toitures en zinc sont réparties entre 75% de zinc naturel et 25% du zinc prépatiné (surtout quartz).</p> | <p>- RQMZ-C 1 : Pour les bâtiments construits à partir de 2005 les toitures en zinc sont réparties entre 80% du zinc naturel, 15% du zinc prépatiné et 5% du zinc coloré en masse.</p> |

3. Règles de corrélation famille de matériaux de rampant / matériaux de gouttière

Ayant la distribution des familles des matériaux de rampant (cf. [Chapitre 3.2](#)), il s'agit d'attribuer à chaque famille la distribution des matériaux de gouttières. Pour cela, nous allons élaborer un ensemble de règles de corrélation permettant de créer un lien entre la famille de matériaux de rampant et les matériaux de gouttières.

L'analyse des données fournies par les experts ainsi que l'étude bibliographique de la Partie 1 nous a permis de formuler les règles suivantes :

- *Règles d'identification des matériaux de gouttières.* Par exemple, dans un centre ancien (classé historiquement), les gouttières sont en cuivre ou en zinc.
- *Règles de corrélation entre la famille de matériaux ou matériau de rampant et le matériau de la gouttière.* Nous distinguons :
 - Règles de corrélation entre les rampants non métalliques et les matériaux de gouttière.
 - Règles de corrélation entre les matériaux économiques de rampant et les matériaux de gouttière.
 - Règles de corrélation entre les matériaux métalliques nobles de rampant et les matériaux de gouttières.

Notons que les règles de corrélation peuvent s'appliquer soit directement entre un matériau de rampant et un matériau de gouttière ou entre une famille de matériaux de rampant et un matériau de gouttière. Dans le dernier cas, la règle de corrélation est valide pour tous les matériaux de la famille. Par exemple, les règles de corrélation entre les rampants en tuile et les matériaux de gouttières s'appliquent pour les tuiles en terre cuite et les tuiles béton.

3.1. Les règles d'identification des matériaux de gouttières (RIG)

D'après le [Chapitre 1.1](#), les matériaux de gouttières sont : zinc (naturel, prépatiné), cuivre, acier inoxydable, PVC, aluminium laqué et acier galvanisé. Dans ce paragraphe nous allons présenter les critères de choix des matériaux de gouttières décrits par les experts de la couverture. Ces critères spécifiques aux gouttières n'ont pas pu être repérés dans la littérature comme pour les rampants (cf. [Chapitre 2.3](#)). Ce travail nous permettra de ressortir les règles d'identification des matériaux de gouttières.

D'après M. Boisseau, la gouttière est un élément de transition entre le matériau de couverture et le matériau de façade. C'est un élément qui n'est pas très esthétique. Ainsi, dans la construction les constructeurs essaient de dissimiler au mieux une gouttière qui souligne le bord du toit.

D'après les experts de la couverture, le choix d'un matériau de gouttière dépend de plusieurs critères. Le critère économique tout d'abord : le prix d'une gouttière en cuivre pourra aller jusqu'à 5 fois celui d'une gouttière en PVC. Aussi, pour un budget limité, le recours à une gouttière en PVC sera privilégié. Un autre critère pour le choix du matériau de gouttière est sa durabilité. Enfin, le choix des gouttières dépend aussi de la personne qui va l'installer. En effet, selon M. Normand et M. Boisseau le milieu de la couverture est assez traditionnel donc les couvreurs restent généralement attachés à des matériaux classiques. Généralement un couvreur professionnel évite de mettre une gouttière en PVC vue sa fragilité. Mais elle peut être mise par le propriétaire lui-même pour des raisons économiques.

D'après Mme Texier, le critère social, en particulier le métier des habitants (maraîchers, ouvrier, industrie...) est important pour identifier les matériaux de gouttière, surtout pour les maisons construites avant les années 1950. Par exemple si les habitants étaient des industriels ils peuvent prendre des matériaux modernes de l'époque. Alors que les ouvriers (maraîchers...) ne se permettent pas d'utiliser des gouttières en cuivre.

Les gouttières en cuivre sont très chères et de moins en moins utilisées. D'après M. Boisseau, les gouttières en cuivre sont plus utilisées dans les régions montagneuses ou sur les monuments ou des constructions nobles ou encore par des particuliers qui préfèrent investir dans une gouttière la plus durable.

Les gouttières en acier inoxydable sont durables mais chères. D'après M. Boisseau, l'acier inoxydable est utilisé dans des cas particuliers. Il s'agit des gouttières ou des chenaux très longs. En effet, l'acier inoxydable présente un coefficient de dilatation deux fois inférieur à celui du zinc. Mais cette situation reste très marginale.

D'après VMZINC, en France d'une manière générale les gouttières en zinc sont majoritairement en zinc naturel, sauf pour des toitures en ardoise où les gouttières peuvent être en zinc prépatiné anthra (gris foncé). Sachant que le rampant a une durée de vie de 50 ans et que celle des gouttières est inconnue donc nous considérons qu'elle est la même que le rampant. Le renouvellement de gouttières en zinc, d'après VMZINC, est plus contraint surtout pour les bâtiments traditionnels patrimoniaux où les gouttières sont considérées comme des

éléments de décor. D'après les experts, pour un bâtiment construit avant les années 1980, le renouvellement d'une gouttière en zinc se fera avec du zinc.

Entre les années 1970 et aujourd'hui, le zinc a perdu beaucoup de son domaine d'utilisation car c'est un matériau cher. La mise en œuvre de ce matériau nécessite un savoir-faire et ainsi un recours à des artisans. Avec la situation de la crise et le manque d'artisans (couvreurs, zingueur) le PVC a pris une importante place du marché des éléments d'évacuation d'eau de pluie.

La durée de vie du PVC est toujours inférieure à 30 ans, il vieillit rapidement (M. Perez, FIRST PLAST et M. Normand). Mais la durabilité d'une gouttière dépend de l'environnement : dans une zone très ensoleillée, la gouttière dure moins. En effet, les gouttières en PVC sont fragiles et présentent des problèmes de décoloration. Le PVC trouve son marché sur les ouvrages économiques vu la facilité de son utilisation.

D'après M. Perez et M. Boisseau, la gouttière en aluminium existait depuis longtemps mais elle n'était pas très appréciée à cause de la difficulté de sa mise en œuvre, notamment en matière de soudure. Depuis 2000, les gouttières en aluminium ont pénétré le marché de gouttière à cause d'une nouvelle technique de mise en œuvre très pratique basée sur le façonnage des feuilles en aluminium sur place, technique ne nécessitant pas de soudure (DAL'ALU). Aujourd'hui, il y a une forte concurrence entre les gouttières en zinc, en aluminium et en PVC.

De cette analyse découlent les règles d'identification des matériaux de gouttières suivantes :

- **RIG 1** : Avant les années 1980 les matériaux de gouttières sont majoritairement en zinc et un peu de cuivre.
- **RIG 2** : Le renouvellement des gouttières des bâtiments construits avant les années 1980 se fait majoritairement avec le même matériau.
- **RIG 3** : La gouttière en cuivre est plutôt utilisée dans les régions montagneuses, sur les monuments et les constructions nobles.
- **RIG 4** : Les gouttières en zinc sont remplacées par le même matériau en zinc.
- **RIG 5** : Dans une toiture en ardoise naturelle, le matériau de gouttière est remplacé par le même matériau.
- **RIG 6** : La plupart des renouvellements de gouttières des toitures en tuile sont faits par le même matériau.
- **RIG 7** : La durée de vie d'une gouttière en zinc est de 50 ans.

- **RIG 8** : Aujourd'hui le choix des matériaux de gouttière s'oriente vers le moins cher dans la construction économique.
- **RIG 9** : Avant les années 2000 l'aluminium n'est utilisé en gouttières.
- **RIG 10** : Avant les années 1980 le PVC n'est utilisé en gouttières.
- **RIG 11** : Le matériau aluminium utilisé en gouttière est de l'aluminium laqué.
- **RIG 12** : Les gouttières en PVC et en aluminium laqué sont majoritairement utilisées dans des ouvrages économiques.
- **RIG 13** : L'acier inoxydable est utilisé en gouttière/chéneau très long à la place du zinc (cas marginaux).
- **RIG 14** : La durée de vie d'une gouttière en PVC est comprise entre 10 ans et 30 ans ; il s'agit du matériau de gouttière le plus fragile.

3.2. Règles de corrélation entre la famille de matériaux ou matériau du rampant et le matériau de gouttière

Les experts de la couverture ont tous affirmé que l'utilisation du matériau de gouttière dépend du matériau de rampant. Ainsi, ils ont classé les matériaux de rampant en matériaux métalliques nobles (zinc (naturel et prépatiné), cuivre, plomb, acier inoxydable, aluminium (naturel et laqué)), matériaux économique (bardeaux bitumineux, ardoises en fibres ciment, acier laqué, acier galvanisé, plaque en plastique, plaque en fibres ciments et plaque bitumineuses) et matériaux non métallique (tuile (en terre cuite et béton) et ardoise naturelle). La démarche de formulation des règles se fait comme pour les matériaux de rampant. Ainsi, pour une famille de matériau ou matériau de rampant choisi nous identifions les experts qui ont fourni des données quantitatives sur la distribution des matériaux de gouttière pour cette famille de matériau ou matériau de rampant ensuite nous appliquons l'arbre de définition et de classification des règles (cf. [Figure 81](#)). Dans la suite, nous détaillons le cas de l'élaboration des règles de corrélation entre les rampants en tuiles et les matériaux de gouttières, les autres cas sont détaillés dans l'[Annexe 10](#).

3.2.1. Les règles de corrélation entre les rampants en tuiles et les matériaux de gouttière (RCGT)

Ces règles sont spécifiques à la famille de matériaux de rampant en tuile, appliquées quelle que soit la nature de la tuile (en terre cuite, béton).

L'application des étapes de la formulation des règles est comme suit :

- a. Famille de matériaux de rampant en tuile
- b. Classification des experts :

| EC2 : Catégorie 2 | EC3 : Catégorie 3 | ET-IV : Type IV |
|---|-------------------|-------------------------------|
| - Dal'Alu - Erlus - FIRST PLAST - M. Fernandes | - GutterFrance | - Mme Texier - M. Boisseau |

- c. Application de l'arbre de définition et de classification des règles (cf. Figure 81).

En termes de répartition des différents matériaux de gouttière nous avons eu les données résumées dans le [Tableau 32](#).

Tableau 32 : Synthèse des données sur la répartition des matériaux de gouttière pour les rampants en tuile

| Expert | Précision | Zinc | Cuivre | Autres matériaux (cuivre, acier...). | Aluminium laqué | PVC |
|---|--|------|--------|--------------------------------------|-----------------|------|
| FIRST PLAST GUTTER FRANCE ERLUS DAL'ALU⁸⁶ | Les toitures en tuiles construites avant les années 1950 | 95% | 5% | - | - | - |
| | Les toitures construites entre 1950 et 1980 | 60% | - | 40% | - | - |
| FIRST PLAST et ERLUS | Les toitures construites entre 1980 et 2000 | 60% | - | 5% | 15% | 20 % |
| M. Fernandes | Les toitures construites entre 1980 et 2000 | 90% | - | - | - | 10% |

- FIRST PLAST, GUTTER FRANCE, ERLUS, DAL'ALU : 3EC2 et 1EC3
(profils différents)

Les données de ces experts (3EC2 et 1EC3) sont cohérentes (cf. [Tableau 32](#)). Ainsi, d'après l'arbre de définition et de classification des règles nous définissons deux règles de classe B :

- les toitures en tuiles construites avant les années 1950, les matériaux de gouttières sont répartis entre 95% en zinc et de 5% en cuivre.
- les toitures construites entre 1950 et 1980 la réparation des matériaux de gouttières est de 60% en zinc et 40% en autres matériaux (cuivre, PVC, acier...).

⁸⁶ Ces quatre experts ont donnés les mêmes chiffres c'est pour cela nous les avons mis dans une même case du tableau.

- M. Fernandes FIRST PLAST et ERLUS : 3EC2 (profils différents)

Les données de ces experts sont cohérentes. En effectuant l'opération d'ajustement débutée par une moyenne, pour la période 1980-2000, nous obtenons la répartition suivante : 70% du zinc, 16,67% du PVC, 10% de l'aluminium laqué et 3,33% matériaux autres. Pour arrondir ces valeurs à des multiples de 5%, nous allons rajouter une information historique. Ainsi, d'après l'histoire des matériaux de gouttières, depuis 2000, les gouttières en aluminium laqué se sont développés sur le marché des gouttières. Avant cette époque son utilisation est très limitée. Par contre, le PVC apparu au début des années 1980 a été fortement utilisé surtout sur les constructions économiques et donc en termes de patrimoine nous avons décidé de majorer la proportion du PVC à 20%. Ainsi, nous obtenons la règle de classe B suivante : Entre les années 1980 et 2000, pour les toitures en tuile, les matériaux de gouttières sont répartis entre 70% zinc naturel, 20% PVC, 5% aluminium laqué et 5% matériaux autres (cuivre, acier inoxydable et acier galvanisé).

De cette analyse, nous ressortons les règles de corrélation de classe B.

| | |
|------------------------|--|
| Règles classe B | <p>-RCGT-B 1 : Pour les toitures en tuiles construites avant les années 1950, la répartition des matériaux de gouttières est de 95% en zinc et de 5% en cuivre.</p> <p>-RCGT-B 2 : Entre 1950 et 1980 la réparation des matériaux de gouttières, pour les toitures en tuile est 60% en zinc et 40% en autres matériaux.</p> <p>-RCGT-B 3 : Entre les années 1980 et 2000, pour les toitures en tuile, les matériaux de gouttières sont répartis entre 70% zinc naturel, 20% PVC, 5% Aluminium laqué et 5% matériaux autres (cuivre, acier inoxydable et acier galvanisé).</p> |
|------------------------|--|

3.2.2. Synthèse des règles de corrélation entre la famille de matériaux ou matériau du rampant et le matériau de gouttière

L'élaboration des autres règles de corrélation entre la famille de matériaux ou matériau du rampant et le matériau de gouttière est détaillée dans [l'Annexe 10](#). Le [Tableau 33](#) résume toutes les règles de corrélation. Au total 3 règles classe A, 4 classe B et 1 classe C ont pu être élaborées. Ainsi, la majorité des règles sont probables ce qui s'explique par le fait que l'évaluation de la distribution des matériaux de gouttières pour une famille de matériaux ou matériaux de rampants est plus délicate vu la diversité de ces matériaux pour un même rampant. Néanmoins, nous considérons que la démarche appliquée permet d'avoir des résultats satisfaisants.

Tableau 33 : Synthèse des règles de corrélation entre la famille des matériaux/matériau de rampant et les matériaux de gouttière

| Famille des matériaux/Matériau | Classe de règles | | |
|--|--|--|---|
| | Classe A | Classe B | Classe C |
| Ardoise naturelle | - | - RCGA-B 1 : A partir des années 1980, pour les toitures en ardoise les matériaux de gouttières en zinc sont répartis entre 85% du zinc naturel et 15% de zinc prépatiné en gris foncé. | - |
| Matériaux économiques : Bardeaux bitumineux, Ardoises en fibres ciment, Acier laqué, Acier galvanisé, Plaque en plastique, Plaque en fibres ciments et Plaque bitumineuses | - RCGME-A-1 : Pour les couvertures en plastique les gouttières en PVC sont toujours utilisées. - RCGME-A 2 : Depuis les années 1980, pour une couverture économique (acier laqué, acier galvanisé, bardeaux bitumineux et ardoise fibrociment) la répartition des matériaux de gouttières est de 80% en PVC et 20% en matériaux autres. | - | - RCGME-C 2 : Depuis les années 1980 pour les bardeaux bitumineux les matériaux de gouttières sont répartis entre 70% de zinc et 30% de PVC. |
| Famille ou matériaux métalliques nobles : zinc, cuivre, acier inoxydable, aluminium, plomb et cuivre | - RCGMN-A : Pour une couverture métallique noble (zinc, cuivre, acier inoxydable, aluminium, plomb et cuivre) la gouttière et tous les accessoires de la toiture sont du même matériau que le rampant. | - | - |
| Tuile | | - RCGT-B 1 : Pour les toitures en tuiles construites avant les années 1950, la répartition des matériaux de gouttières est de 95% en zinc et de 5% en cuivre. - RCGT-B 2 : Entre 1950 et 1980 la réparation des matériaux de gouttières, pour les toitures en tuile est 60% en zinc et 40% en autres matériaux. - RCGT-B 3 : Entre les années 1980 et 2000, pour les toitures en tuile, les matériaux de gouttières sont répartis entre 70% zinc naturel, 20% PVC, 5% Aluminium laqué et 5% matériaux autres (cuivre, acier inoxydable et acier galvanisé). | |

4. Autres règles de corrélation

Nous avons rassemblé ci-dessous les règles de corrélation correspondant aux autres éléments de toitures : *descente, noue et éléments d'étanchéité*. Ces règles sont en effet en nombre plus restreint.

4.1. Règles de corrélation famille de matériaux de rampant / matériaux de descente

D'après M. Boisseau le choix du matériau de descente dépend essentiellement des contraintes esthétiques. En effet, la descente est un élément qui doit être en harmonie avec la façade du bâtiment. Ainsi, les fabricants de zinc ont adopté des coloris qui permettent de fondre la descente d'eau pluviale avec le matériau d'habillage de la façade (ex : couleur brun écorce ou vert lichen). De même, les fabricants du PVC et de l'aluminium laqué présentent des gammes de descentes avec de différentes couleurs (blanc, vert, noir...).

Pour les matériaux de descente, tous les acteurs ont affirmé que le matériau de descente est le même que la gouttière. Ainsi, toutes les règles développées pour les gouttières sont applicables pour les descentes du moment qu'on considère que ce sont des éléments solidaires (à l'exception de la partie basse en fonte).

Toutefois, dans certains cas, pour solidifier la partie basse de la descente surtout lorsqu'elles sont installées dans des endroits où elles risquent de subir des chocs, une partie en fonte de 1m à 2m de longueur est rajoutée dans la partie basse de la descente.

Pour les toitures-terrasses, nous n'avons pas assez d'informations sur les matériaux de descente, nous savions qu'ils seront la plupart du temps en PVC puisqu'ils sont des éléments non apparents intégrés dans la structure des bâtiments et donc ils ne sont pas sollicités par les contraintes extérieures.

La règle qui en ressort est que le matériau de descente est le même que la gouttière. Pour la descente en fonte, nous pourrions la négliger d'une part car il ne s'agit que d'une petite partie de la descente et d'autre part car c'est la descente la « plus vulnérable » aux chocs qui sont potentiellement exposées.

-RQD-A : Le matériau de descente est le même que la gouttière.

4.2. Règles de corrélation famille de matériaux de rampant / matériaux de noue

Les noues sont des éléments constitutifs des toitures. Pour les couvertures métalliques la noue est un élément de rampant donc elle est obligatoirement façonnée en même matériau de rampant. Ainsi, la question de la noue ne se pose que pour les couvertures non métalliques telles que l'ardoise, la tuile et les bardeaux bitumineux.

D'après Mme Texier, avant 1870 il existait des noues en plomb et elles ont dû perdurer, car il s'agit d'un matériau particulièrement durable (200 ans de durée de vie).

Le matériau de noues traditionnellement utilisé sur la tuile ou de l'ardoise est le zinc naturel. Dans le cas de l'ardoise, il est possible de trouver de l'anthra-zinc si l'élément est plus apparent pour qu'il se marie mieux avec l'ardoise. Toutefois, même sur l'ardoise, le zinc naturel est majoritairement utilisé car avec le temps il va prendre sa patine et se mariera avec l'ardoise.

Pour les noues, nous avons pu formuler les règles suivantes qui ont été validées par l'ensemble des experts interrogés :

| Classe de Règle | Règles de corrélation entre le matériau du rampant et le matériau de la noue (RCRN) |
|-----------------|---|
| Règles classe A | <ul style="list-style-type: none">-RCRN-A 1 : Pour une couverture métallique la noue est du même matériau que la couverture.- RCRN-A 2 : Jusqu'à 1900 les noues des toitures non métalliques étaient en Plomb.-RCRN-A 3 : Avant les années 1980, pour les toitures en ardoise, les matériaux de noues sont à 100% en zinc naturel.-RCRN-A 4 : A partir des années 1980, pour les toitures en ardoise, les matériaux de noues sont répartis entre 90% du zinc naturel et 10% de zinc gris foncé (anthra-zinc).- RCRN-A 5 : Pour les tuiles les noues sont à 100% en zinc naturel.- RCRN-A 6 : Pour les bardeaux bitumineux les noues sont à 100% en bardeaux. |

4.3. Règles de corrélation famille de matériaux de rampant / matériaux d'élément d'étanchéité

De même que pour les noues, pour les couvertures métalliques, les éléments d'étanchéité sont obligatoirement façonnés dans le même matériau que celui du rampant. Ainsi, la question des éléments d'étanchéité se pose pour les couvertures non métalliques telles que l'ardoise, la tuile et les bardeaux bitumineux. Les matériaux des éléments d'étanchéité sont répartis

majoritairement entre zinc et plomb. D'après Mme Texier, les étanchéités en plomb sont utilisées sur des vieux immeubles et maisons. Il y a eu des tentatives pour remplacer le plomb par d'autres matériaux comme l'aluminium, mais cela n'a pas marché car, techniquement, le plomb donne le meilleur résultat à plus long terme.

Pour les proportions des matériaux des étanchéités nous n'avons pas eu beaucoup de données.

Les règles que nous avons pu tirer sont :

| Classe de Règle | Règles de corrélation ente matériau du rampant et le matériau des éléments d'étanchéité (RCRE) |
|-----------------|--|
| Règle classe A | -RCRE-A 1 : Pour une couverture métallique les éléments d'étanchéités sont du même matériau que la couverture. |
| Règles classe C | <ul style="list-style-type: none"> - RCRE-C 1 : Pour les bardeaux bitumineux les éléments d'étanchéité sont aussi en bardeaux et de temps en temps le mastic est employé pour combler certains petits trous. - RCRE-C 2 : Les matériaux utilisés pour l'étanchéité des fenêtres, cheminées et autres petits éléments des toitures non métalliques sont répartis entre 60% du zinc et 40% du plomb - RCRE-C 3 : Pour les toitures-terrasses, les éléments d'étanchéités (de la cheminée...) sont du même matériau que l'étanchéité de la toiture |

5. Des règles empiriques plus ou moins validées mais efficaces

Dans ce chapitre, nous avons essayé de fournir des données quantitatives en élaborant un ensemble de règles d'identification et de quantification des matériaux des différents éléments de toit à l'échelle urbaine. Nous voudrions mettre l'accent sur l'importance de cette approche empirique qui, certes reste non validée mais, a permis de transformer des constatations, des observations et des retours d'expériences des experts en une vision quantitative des matériaux de toiture. Les valeurs proposées peuvent poser beaucoup de questions en particulier sur leur validité. L'incertitude sur ces données est difficile à évaluer. Toutefois, nous avons essayé de donner une qualification de nos règles en les classant en règles certaines (classe A), règles probables (B) et règles incertaines (C). Ce choix nous a paru raisonnable, dans la mesure où il nous semble difficile de faire mieux sachant que ce travail s'intègre dans le développement d'une méthode d'évaluation des émissions de contaminants à l'échelle urbaine basé sur d'autres opérations d'intégration et d'exploitation d'informations et de bases de données très différentes.

Le manque d'informations, la diversité importante des matériaux de couverture fait qu'il est très difficile d'avoir une vision complète de leur distribution dans la réalité du terrain. De

plus, le facteur historique a un rôle important car une échelle urbaine donnée présente différentes périodes historiques pour lesquelles les matériaux de cette époque ont été employés. Nous remarquons bien que même l'étude de marché de couverture a fait un choix précis d'étudier certains matériaux et surtout pour les rampants, pour les autres éléments de toit aucune étude n'a été effectuée. De plus, cette étude n'arrive pas à évaluer l'incertitude sur ses données, ce qui montre bien qu'un tel travail reste difficile et nécessite plus de temps. Ainsi, nous avons décidé d'aller plus loin dans notre recherche en développant une nouvelle approche de quantification des matériaux de couvertures sur les différents éléments de toit.

A ce jour, et dans le cadre de cette thèse nous estimons avoir rempli l'objectif de notre méthode en termes de production des informations et des règles à partir des entretiens et enquête. Ce travail assez important mené par moi-même et les stagiaires est un premier pas important vers une amélioration possible des informations recueillies. Pour confirmer, solidifier et affiner ce jeu de règles, deux pistes d'approfondissement se présentent :

- Mener d'autres entretiens pour obtenir plus d'informations permettant d'appliquer des méthodes statistiques pour valider ces données. Ceci dit qu'il faut un nombre important de personnes à interroger. Le travail se limitera à une sorte d'enquête systématique de collecte d'un maximum d'informations puisque les questionnaires sont prêts avec quelques ajustements à prévoir. C'est l'une des perspectives du travail.

- Effectuer une analyse de sensibilité pour tester l'influence des règles sur le calcul total de flux de contaminants. Il s'agit d'attribuer des poids (1 ; 0,5 ; 0,9...) à chaque règle appliquée et tester la variabilité du flux global en fonction des poids attribués. Cette étude peut être croisée avec une enquête. En effet, pour les règles non validées et qui présentent une grande sensibilité sur le calcul de flux, il s'agit d'effectuer une enquête ciblée afin de solidifier et valider les règles en questions. Ce travail semble être plus efficace dans la mesure où l'enquête sera limitée aux vrais besoins, surtout que le travail d'enquête reste coûteux et lent.

Pour conclure, les règles développées restent théoriques et donc nous avons besoin de les appliquer et de les exploiter pour en tester (et, nous l'espérons, en démontrer) leur caractère véritablement opérationnel. De plus, l'échelle urbaine étant une définition assez large qui peut être attribuée à une ville, une agglomération, une région, etc., ceci complique la tâche pour pouvoir aller jusqu'au bout du développement de notre méthode. Pour cela, nous avons décidé de choisir un contaminant et de nous confronter à un terrain d'étude à partir duquel nous allons continuer à développer notre méthode de quantification des émissions issues des matériaux des différents éléments de toiture à l'échelle urbaine. En fait, la réalité du terrain

nous permettra de comprendre le processus d'utilisation des matériaux de toiture pour mieux les identifier à grande échelle. Il s'agit aussi d'appliquer les règles déjà élaborées et d'appliquer aussi la notion de situations-type au contaminant choisi dans le terrain d'étude.

Le travail à partir d'un terrain d'étude et d'un contaminant spécifique poursuit deux objectifs, d'une part concrétiser la méthode et donc obtenir une évaluation de flux d'un contaminant à l'échelle urbaine et d'autre part permettre sa généralisation à toute réalité urbaine.

PARTIE 3.

**CALCUL PRATIQUE DU FLUX D'UN CONTAMINANT A
L'ECHELLE URBAINE : LE ZINC A CRETEIL**

« Le fondement de la théorie c'est la pratique. »

Mao Tsé-Toung

La [Partie 2](#) théorique montre que nous ne pouvons aboutir à un développement complet de la méthode, car l'échelle urbaine est une définition très large et nous avons besoin de centrer la problématique tout en restant dans une approche de généralisation. Ainsi, la [Partie 3](#) se propose, à travers le développement de la méthode à partir d'un site d'étude et d'un contaminant, de concrétiser la méthode et d'avoir un résultat transposable à d'autres échelles et d'autres contaminants. Cette partie spécifique présente un aspect théorique et applicatif. Il s'agit d'une part de développer une approche statistique de quantification des dimensions des éléments de toit et d'autre part d'appliquer la notion de situation-type au contaminant choisi et les règles empiriques élaborées dans la [Partie 2](#) au terrain et ainsi montrer qu'il est possible d'aboutir à une quantification du flux du contaminant choisi à l'échelle d'étude. Le [Chapitre 3.1](#) consiste à choisir le terrain et le contaminant d'étude selon un ensemble de critères ainsi que l'application de notion de situation-types. Dans le [Chapitre 3.2](#), nous appliquons les principes de découpage de la ville en zones homogènes développés dans le [Chapitre 2.3](#) et nous développons une approche statistique de quantification des dimensions des éléments de toit à l'échelle urbaine. Le [Chapitre 3.3](#) permet de concrétiser la méthode en calculant le flux d'émission du zinc à l'échelle de la ville de Créteil. Il s'agit d'appliquer les règles développées dans le [Chapitre 2.4](#) et la méthode statistique. Enfin, le [Chapitre 3.4](#) décrit la méthode opérationnelle d'évaluation des flux de contaminants à l'échelle urbaine sous une forme générique, c'est-à-dire applicable à d'autres contaminants et d'autres terrains d'étude.

Chapitre 3.1. Contaminant et terrain d'étude : choix et identification des données

"Le nouveau Créteil est né d'une idée que j'aie eue un jour à Versailles en me promenant en compagnie du Général de Gaulle. La veille, Léopold Senghor avait comparé celui-ci, dans un discours, à Napoléon et à Louis XIV.

- [Général] de Gaulle « Je ne suis pas Napoléon, je n'ai pas fait Austerlitz. Je ne suis pas Louis XIV, je n'ai pas fait Versailles. »

- [Général] Billotte « Non seulement vous n'avez pas fait Versailles, mais vous avez laissé se construire des horreurs architecturales dans toute la France. Si vous m'appuyez, je peux tenter de construire une vraie ville à Créteil. Il y a huit cents hectares d'espaces libres. C'est le seul endroit de la banlieue parisienne où l'on peut tenter cela. »

- [Général] de Gaulle « Et bien, essayez ! »

C'est sur la base de ces trois petits mots que je me suis lancé dans cette opération. (...) Au fond, nous nous sommes dit : l'endroit est impossible, la chose est difficile, mais si nous nous attaquons vraiment au problème nous parviendrons peut-être à faire un exemple" (Billotte, 1972)

Notre objectif est de développer une méthode générale d'évaluation des flux de contaminants à l'échelle urbaine. Afin de mener à bien cette recherche, nous avons besoin de fixer le contaminant à étudier dans un terrain d'étude spécifique. En effet d'après le [Chapitre 2.2](#), l'émission d'un contaminant donné à l'échelle urbaine a été définie par la notion de situation-type. La quantification de cette émission nécessite l'évaluation de toutes les situations-types associées au contaminant. En d'autres termes évaluer les dimensions associées à chaque matériau des éléments de toit émetteurs du contaminant. Or, à l'échelle urbaine l'utilisation des matériaux de toiture est régie par un ensemble de contraintes très variables et qui restent qualitatives. Les règles élaborées dans le [Chapitre 2.4](#) sont « empiriques » et peuvent paraître éloignées de l'objectif initial : il convient donc de montrer la façon dont elles participent concrètement à l'évaluation des flux de contaminants à l'échelle urbaine.

Nous avons décidé de continuer l'élaboration de notre méthode à travers l'étude de l'émission d'un contaminant spécifique à partir d'un terrain réel. Ce travail permettra d'une part de

concrétiser la méthode et d'autre part de la généraliser à d'autres contaminants et à d'autres terrains d'études. Le choix du contaminant et du terrain d'étude devront aider à remplir ces objectifs.

Ce chapitre consiste à décrire le contaminant et le terrain d'étude choisis pour développer la méthode. Il s'agit d'une part d'étudier les caractéristiques de ces deux choix et d'autre part d'appliquer les notions développées dans la [Partie 2](#) : présentation des différentes situations-types associées au contaminant choisi et identifier les critères de choix des matériaux de toiture dans la ville choisie.

1. Choix du contaminant et du terrain d'étude

Nous avons défini un ensemble de critères de choix du contaminant et du terrain d'étude. Le choix de ces deux éléments est lié. En effet, nous avons besoin des données d'émission du contaminant dans le terrain d'étude. De plus, il est important que le site d'étude soit localisé en France pour permettre de mieux développer la méthode.

1.1. Choix du contaminant

Le contaminant à choisir devra présenter le maximum de ses situations-types d'émissions renseignées, et idéalement correspondre à un site de production de données d'émission.

D'après les [Chapitres 1.3 et 2.2](#), l'émission des contaminants métalliques est très bien étudiée dans la littérature, en particulier celles du zinc, du cuivre et du plomb. Pour choisir entre ces trois contaminants nous allons regarder leurs situations-types ainsi que leurs importances au niveau de leurs utilisations sur les différents éléments de toitures. Le [Chapitre 2.2](#), montre que dans la littérature nous avons plus de données pour les flux d'émissions du zinc que pour les autres contaminants (cuivre et plomb) et plus de situations-types renseignées. En outre, d'après le [Chapitre 1.1](#), les matériaux en zinc (zinc naturel, zinc prépatiné...) sont utilisés en tant que rampant, gouttière et noue. Le matériau cuivre (une seule variété le cuivre naturel) est utilisé en rampant et en gouttière alors que le matériau plomb (une seule variété le plomb naturel) est utilisé pour les rampants et les éléments d'étanchéité. Les rampants en plomb et en cuivre sont rarement utilisés en couverture alors que les matériaux en zinc sont largement utilisés sur les toitures de différents bâtiments ainsi qu'en gouttières et en noues. De plus, en regardant les situations-types du zinc, ce dernier présente une émission importante à partir des

aciers galvanisés qui sont des matériaux très utilisés dans les zones industrielles. Ainsi, le zinc présente une plus grande diversité de situations-types par rapport au cuivre et au plomb et ces situations-types sont susceptibles d'être rencontrées dans n'importe quel terrain d'étude français. L'avantage d'avoir un contaminant qui a beaucoup de situations-types est de pouvoir développer la méthode de quantification pour une majorité des situations-types que l'on est susceptible de rencontrer avec d'autres contaminants.

Enfin, en France, des données d'émissions du zinc pour la plupart de ses différentes situations-types ont été produites, dans le cadre de la thèse de [Robert-Sainte \(2009\)](#), pour deux villes différentes d'Ile-de-France, Champs-sur-Marne et Créteil.

Donc, nous avons choisi de développer notre méthode à travers l'évaluation du flux d'émission du contaminant **zinc** à l'échelle urbaine.

1.2. Choix du terrain d'étude

1.2.1. Critères de choix

Le choix du terrain d'étude permettra de remplir deux principaux objectifs, d'une part concrétiser et valider la méthode et d'autre part pouvoir généraliser la méthode à d'autres sites.

Le terrain d'étude que nous allons choisir doit respecter les critères dictés par les objectifs de notre recherche. De ceci découlent les contraintes suivantes :

- (a) *Données d'émission du zinc* : comme avancé dans le paragraphe précédent, la disponibilité des données d'émission du zinc est indispensable pour le choix du site d'étude.
- (b) *Diversité* : obtention d'une bonne diversité de bâtiments (maison individuelles, habitats collectifs...), activités mixtes (économique, industrielle...) et un centre ancien pour aboutir à une vision assez générale sur les émissions des contaminants ainsi qu'étudier les différents aspects d'une échelle urbaine.
- (c) *Une taille "suffisante mais raisonnable"* : une taille minimale de 50 000 habitants ce qui permet d'avoir une échelle urbaine grande avec une impossibilité d'une description détaillée toit par toit. Une taille maximale de 100 000 habitants pour faciliter le développement de la méthode et aboutir à un résultat quantifiable. Cette méthode est développée pour être appliquée à des villes plus importantes (plus de 100 000 habitants).

(d) *Disponibilités et accessibilité des données urbaines* : images aériennes, base de données de mode d'occupation de sol, histoire d'urbanisation du site, réglementations...

(e) *Accessibilité du site* : proche du laboratoire LEESU pour pouvoir faire des enquêtes sur site.

Il faudra noter que le choix du terrain d'étude ne sera pas fait par rapport à l'importance des rampants en zinc, car ce n'est pas vraiment l'objectif. Nous aurons pu prendre la ville de Paris avec une proportion importante de toitures en zinc mais cela reste un cas très particulier. En d'autres termes, notre objectif ce n'est pas uniquement d'obtenir une valeur du flux du zinc à l'échelle urbaine mais de montrer comment nous pouvons obtenir une quantification de flux pour n'importe quel contaminant à l'échelle urbaine à travers une méthode opérationnelle.

D'après le paragraphe précédent, en France nous disposons de données d'émission du zinc dans les villes de Champs-sur-Marne et de Créteil. Ainsi, la contrainte (a) est remplie par les deux villes. Les deux villes sont proches de notre laboratoire (les locaux du LEESU sont implantés sur Champs-sur-Marne et sur Créteil), la contrainte (e) est donc également remplie. La ville de Champs-sur-Marne a 24 271 (site INSEE) habitants en 2009 contre 89 359 (site INSEE) habitants pour Créteil. De plus, Champs-sur-Marne est une petite ville (767,57 ha) (site IAU-IDF) qui présente 39,3% d'espace rural contre 5,7% pour Créteil dont la surface totale est de 1 144,30 ha (site IAU-IDF).

Enfin, d'après les données de mode d'occupation du sol de l'IAU-IDF, Créteil est une ville très mixte présentant une diversité importante d'occupation de sol par rapport à Champs-sur-Marne. Les données urbaines sont bien disponibles tant en ce qui concerne les bases de données informatisées telles les images aériennes (réalisées par l'IGN) ou le mode d'occupation du sol (élaborées par l'IAU-IDF). De plus, l'évolution historique de l'urbanisation de la ville de Créteil est bien documentée et l'accès à ces documents est facile.

Pour résumer, cette première analyse nous conduit à choisir la ville de Créteil (Département 94) comme terrain d'étude pour développer notre méthode. La question qui se pose est : *est-ce que le développement de la méthode à travers Créteil permettra vraiment de la généraliser à d'autres villes ?*

1.2.2. La ville de Créteil une ville spécifique mais représentative

Nous avons effectué un entretien avec un historien M.Vaillant engagé par la mairie de Créteil pour faire les parcours architecturaux et urbains de la ville. Cet historien confirme que : « *L'urbanisation de Créteil est représentative de ce qui se passe dans toute la France. C'est*

un véritable laboratoire catalogue, un échantillon de toutes les architectures surtout pour la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Créteil est à la fois spécifique mais représentative ».

La ville de Créteil est un site urbain assez dense en termes de bâtiments. Elle représente une diversité intéressante de matériau de toiture comme nous le voyons dans la [Figure 82](#) (des terrasses, des toitures en ardoise, en tuile...).



(a)

(b)

Figure 82 : (a) Une photo de la nouvelle tranche de la ville de Créteil prise à partir du toit au 11^{ème} étage de la mairie localisée à côté du lac ; (b) Zone pavillonnaire du vieux Créteil

Elle est considérée comme une expérience unique d'urbanisme. Après la guerre, un besoin énorme de construction de logements est apparu. De nouveaux projets voient le jour visant à construire des villes uniquement de logements dans des immeubles avec plusieurs étages s'étalant sur des kilomètres. Ce type d'aménagement présentait beaucoup de problèmes (M. Vaillant). En fait, dans une ville de logements, les immeubles sont mal desservis par les transports en commun, et ne disposent pas d'équipements (école, hôpital...) auxquels il est donc difficile d'accéder. Dans ce cadre, le projet de Créteil apparaît basé sur un nouveau type d'aménagement urbain. Il s'agit de créer une ville de banlieue non plus seulement avec des logements mais aussi avec des équipements (administration, école...) de façon à ce que les habitants aient accès à tout et donc créer une vie sociale. Pour concrétiser ce projet, il faudra un terrain d'étude : « *La cité sera témoin d'une nouvelle condition humaine, une cité d'espérance annonciatrice d'un modèle de cité future* », déclare le Général P. Billotte en 1965, l'année de son élection au poste de maire de Créteil ([Coudroy de Lille, 2005](#)). Le choix s'est porté sur la ville de Créteil qui, en 1962, était une petite ville de 36 000 habitants avec un terrain très grand pour construire ([Coudroy de Lille, 2005](#)). Créteil est considérée comme

un laboratoire architectural à 15 km de Paris. La construction de Créteil s'est faite par tranches. La dernière, de 1977-2012, vient de s'achever (tout le terrain de Créteil est occupé) et donc Créteil arrive à l'âge adulte (M. Vaillant).

a. Créteil est une ville spécifique

D'après M. Vaillant les spécificités de Créteil se résument comme suit :

- *Politique* (plus de financement et un soutien de l'état) due à la présence du Général Billotte, un compagnon de la libération proche du Général de Gaulle par la résistance dans la seconde guerre mondiale, qui était ancien ministre de la défense nationale et des forces armées en 1955. D'après M. Vaillant, le général Billotte était un homme très influent à cette époque et ami de Charles de Gaulle. Il avait le soutien de l'Etat et beaucoup d'ambitions politiques. Ainsi, ce qui était unique à Créteil c'est cette ambition politique pour faire de la ville autre chose qu'une « ville-dortoir ». La ville (le nouveau Créteil) va se construire très rapidement.
- *Administrative* : puisqu'elle est devenue la préfecture et ainsi une source de financement. En effet, il va falloir construire un certain nombre d'équipements administratifs. Les fonctions administratives (les équipements) n'étaient pas disponibles à la même époque dans d'autres villes nouvelles comme Evry ou Saint-Quentin-en-Yvelines.
- *Le réseau de communication* : Historiquement, Créteil n'était pas située sur un axe routier très grand. Un réseau routier et des infrastructures très importantes ont été créés pour que cette partie du territoire soit bien desservie en particulier vers Paris.
- *La typologie des bâtiments choisis par les architectes* : Créteil présente des architectures plus audacieuses par rapport aux autres villes de la banlieue. En effet, de jeunes architectes de l'école des beaux-arts avaient été conviés... Ces architectes ont mis au service leur créativité pour concevoir des bâtiments esthétiques que ce soit au niveau de la forme ou au niveau de la couverture (cf. Figure 88). Par exemple, le bâtiment de la préfecture très luxueux avec une couverture en acier inox arrondie. Des matériaux très nobles ont été utilisés comme le granit, de l'aluminium pour le bâtiment. Il s'agit donc d'une nouvelle revendication de la matière.

b. Créteil est une ville représentative

D'après M. Vaillant la représentativité de Créteil se traduit par :

- *Une diversité d'urbanisation en fonction de l'époque* : Créteil est divisée en quatre grandes zones urbaines historiques : Centre ancien, Mont Mesly, Nouveau Créteil I, Nouveau Créteil II, comme illustré dans la Figure 83.b. Chaque région présente une organisation urbaine spécifique qui dépend notamment de la période de construction. La zone la plus récente est la

zone 4. Créteil représente très bien la tendance architecturale de l'époque jusqu'à aujourd'hui. En particulier, pendant les années 1960 une architecture verticale centrée sur les tours s'est développée partout en France. De même, à partir des années 2000, un nouveau mouvement architectural en France est caractérisé par des immeubles à échelle humaine (moins de 7 étages) avec les deux derniers niveaux en retrait par rapport aux niveaux en dessous pour éviter l'effet des blocs, et des étages ayant différents plans (distribution spécifique à chaque étage). De plus, la notion de l'écologie s'intègre de plus en plus avec la conception des bâtiments durables HQE. Ceci est illustré dans les derniers quartiers de la pointe du lac de Créteil.

- *Une diversité de mode d'occupation de sol* : Créteil présente une mixité urbaine très marquée avec des modes d'occupation de sol très variés. La [Figure 83.a](#) montre une intéressante diversité urbaine et fonctionnelle de Créteil. Sur cette figure, les différents modes d'occupation du sol sont représentés par des couleurs différentes : les activités industrielles sont en violet, les habitats collectifs sont en rouge et les habitats individuels sont en jaune.

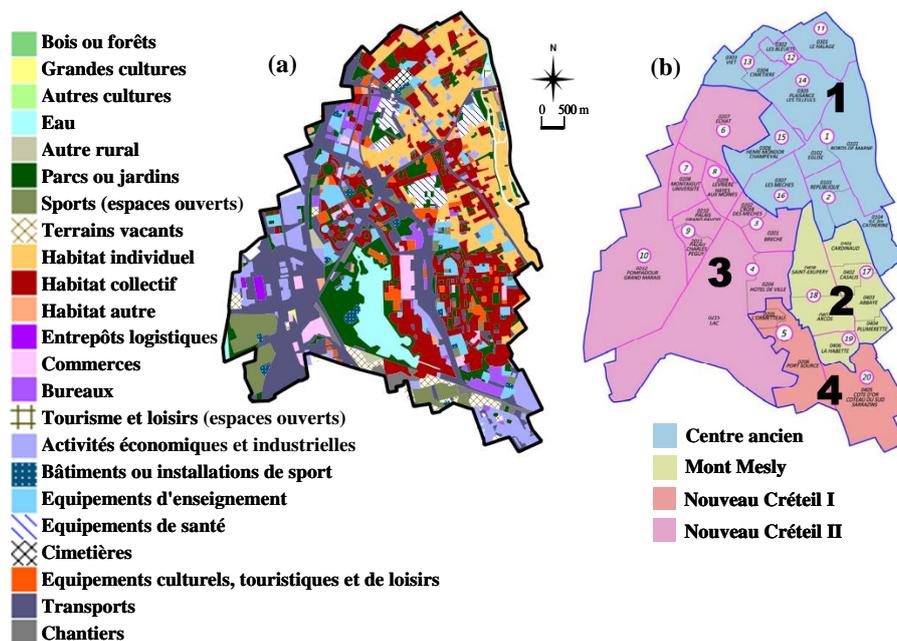


Figure 83 : (a) Carte de modes d'occupation du sol pour 24 MOS (source : IAU-IDF) ; (b) Les quatre zones urbaines (source : PLU de Créteil)

2. Identification des données disponibles à Créteil

Il s'agit d'identifier les données d'émissions du contaminant choisi ainsi que les données urbaines disponibles à l'échelle de la ville de Créteil.

2.1. Données de flux unitaires d'émission du zinc

Les différents flux d'émission de zinc par différents éléments de toit élaborés dans le cadre de la thèse de [Robert-Sainte \(2009\)](#), sont résumés dans le [Tableau 34](#).

Pour les rampants, il s'agit des panneaux de forme rectangulaire qui ont été exposés. Toutes les données produites concernent les émissions attribuables aux matériaux. En effet, les apports atmosphériques du zinc ont été évalués au niveau des concentrations mesurées dans le ruissellement des bancs d'essai en plexiglas. Ensuite, ces concentrations ont été déduites de celles mesurées dans le ruissellement des matériaux testés.

Tableau 34 : Flux annuels du zinc émis par différents matériaux d'éléments de toit ([Robert-Sainte, 2009](#))

| Matériau | Rampant (g.m ⁻² an ⁻¹) | Gouttière (g.m ⁻¹ an ⁻¹) | Crochet de fixation* (g.m ⁻² an ⁻¹) |
|-----------------------------|--|--|---|
| Zinc neuf | 3,9 | 0,87 | - |
| Anthra-zinc | 2,3 | 0,5 | - |
| Zinc ancien | 4,5 | 0,81 | - |
| Plomb neuf | 0,052 | - | - |
| Plomb ancien | 0,11 | - | - |
| Acier galvanisé | 2 | - | 0,046 |
| Acier galvanisé prépeint | 0,025 | - | - |
| Acier inoxydable | Pas d'émission | - | Pas d'émission |
| Aluminium | 0,034 | - | - |
| Aluminium laqué | - | - | - |
| Cuivre neuf | - | 0,02 | - |
| Cuivre ancien | - | 0,021 | - |

* Le nombre de crochets de fixation est de 30 crochets par m² (valeur maximale pour la fixation d'ardoises)

2.2. Données urbaines

La première étape était de chercher les informations et les données disponibles au niveau de la ville sur les bâtiments et leurs matériaux de toitures. Deux types de données ont été repérés :

- des données *quantitatives* mais qui ne livrent pas une information directe sur les matériaux de toiture : elles doivent être exploitées et adaptées à notre objectif de recherche.

- des données *qualitatives* sur les matériaux de toitures qui fournissent des informations qualitatives et qui nécessitent une interprétation et une réutilisation pour pouvoir quantifier les matériaux de toit.

2.2.1. Données quantitatives

a. Base de données d'occupation de sol MOS IAU-IDF

Cette base présentée dans le [Chapitre 2.4](#), est disponible pour la ville de Créteil. Il suffit d'appliquer la démarche décrite pour obtenir les 13 classes de bâtiments. Ce travail sera illustré par une carte des classes de bâtiments pour la ville de Créteil (cf. [Chapitre 3.2](#)). La base de données MOS la plus récente disponible date de 2008.

b. Les images aériennes

Dans notre étude nous allons utiliser les données de l'IGN appelée BD-ORTHO de 2008, ces images ont une résolution de 50 cm. Nous utiliserons aussi Google Earth et Mappy⁸⁷ qui permettent d'avoir une meilleure visibilité des matériaux toitures grâce à une meilleure résolution. De plus, l'option *view street* permet de voir parfois de très près la toiture en se plaçant dans la rue.

L'ortho-photo est une base de données numérique facile d'accès qui peut être utilisée comme un support pour identifier les matériaux de toiture soit visuellement, soit par un traitement d'images spécifiques. Les toitures sont représentées par leurs surfaces projetées. Par contre, cette base permet seulement d'identifier le rampant et elle ne permet ni d'identifier les autres éléments de toit (gouttière, noue...) ni de renseigner l'âge des toitures.

c. La BD-TOPO

Cette base, décrite dans le [Chapitre 2.1](#), est disponible pour Créteil. Parmi les 10 thèmes de cette base nous allons uniquement utiliser le thème relatif au bâtiment qui représente le bâti sous forme de polygones correspondant à la surface projetée de chaque toiture. Par contre aucune information sur le matériau de toiture n'est disponible. De plus, cette base ne détecte que le rampant : les autres éléments de toit ne sont pas identifiés.

2.2.2. Données qualitatives

Tout d'abord, nous avons contacté les différents services de la Mairie de Créteil (le service délivrant les permis de construire pour tout projet dans la ville de Créteil et les archives municipales) afin de repérer différents documents pouvant nous renseigner directement ou indirectement sur les matériaux de toitures. La première piste abordée était de fouiller dans les permis de construire pour voir si pour chaque construction était mentionné le matériau de toiture utilisé (que ce soit le rampant ou les autres éléments de toit). Mais ce travail s'est avéré

⁸⁷ <http://fr.mappy.com>

très fastidieux et très difficile à réaliser en raison, d'une part, du nombre conséquent de bâtiments existants dans la ville et, d'autre part, de la difficulté pour retrouver des permis de construire pour les anciens bâtiments. De plus, selon les agents du service instruisant les permis de construire, il n'est pas exigé de mentionner la nature du matériau de toiture : ce type d'information n'est donc pas toujours indiqué et il est encore plus difficile de l'avoir pour les autres éléments de toit. Cette première piste a été alors abandonnée. Nous avons décidé alors d'effectuer une étude urbaine de la ville de Créteil pour comprendre comment la ville a été construite, les réglementations d'urbanisme... Cette étude a pour objectif de comprendre le processus de choix d'un matériau de couverture dans une ville. Deux pistes ont été identifiées : étudier les *documents d'urbanisme et les autres réglementations applicables au territoire* et organiser des *entretiens avec des acteurs de l'aménagement à Créteil*.

a. Documents d'urbanisme et autres réglementations

En ce qui concerne l'architecture de la ville, nous nous sommes intéressés aux documents produits par le Conseil en Architecture, Urbanisme et Environnement du Val-de-Marne (CAUE 94), en particulier les "Carnets de voyage cristolien"⁸⁸ qui présentent les différentes époques architecturales et urbaines de la ville. Nous avons aussi étudié le PLU de Créteil et ses annexes (Plan d'Aménagement pour le Développement Durable - PADD, zonage, règlement...). Ce document est articulé en quatre grandes parties, la première, la plus intéressante dans notre travail, présente une description de l'évolution de la ville de Créteil en six chapitres : présentation générale de la ville de Créteil, données socio-économiques, cadre bâti, équipements, transports et déplacements, réseaux.

- Intérêt et limite de ces documents

Ces documents sont disponibles en ligne⁸⁹ et à la Mairie. Ils donnent une description du développement historique de la ville qui montre que Créteil est divisée en quatre grandes zones urbaines. Cette division nous donne des informations sur *l'âge des bâtiments* en fonction de la période de construction de chaque zone. Chaque zone présente une organisation urbaine spécifique. Ces documents décrivent aussi les types de constructions (bâtiments appartenant à des ZAC⁹⁰, des habitats HLM...). Cependant, les règlements d'urbanisme de Créteil sont peu prescriptifs au sujet des toitures. Donc, ces données doivent être étudiées et

⁸⁸ Cristolien = adjectif de Créteil

⁸⁹ <http://www.ville-creteil.fr>

⁹⁰ ZAC : Zone d'Aménagement Concerté

exploitées de manière à alimenter notre travail sur l'identification et la quantification des matériaux de couverture à l'échelle de la ville.

b. Entretiens avec des acteurs de l'aménagement à Créteil

Nous avons organisé des entretiens avec différents acteurs de la ville de Créteil afin de comprendre les critères et le processus de décision du choix des matériaux de toiture. La construction d'un bâtiment lors d'un projet passe par plusieurs étapes (cf. [Annexe 11](#)). Toutes ces étapes sont gérées par un ensemble d'acteurs très différents qui interviennent d'une manière précise à chacune des phases du projet. A ce niveau, il faut un travail préliminaire d'identification des acteurs et de leurs rôles dans un projet de construction (cf. [Figure 84](#)). Cette identification des acteurs nous permettra de savoir quel type d'information nous pourrions récupérer d'un type d'acteurs. Les maîtres d'ouvrage programment le projet (ce sont des propriétaires individuels, des promoteurs immobiliers, des collectivités...), les maîtres d'œuvre le conçoivent (architecte, bureau d'études...) et les entreprises de construction le réalisent. Tous n'ont pas les compétences nécessaires pour choisir le matériau de toiture, certains acteurs ont plus d'aptitudes que d'autres à faire ce choix.

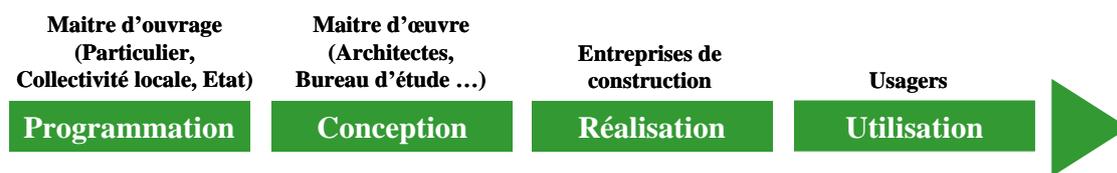


Figure 84 : Processus d'un projet de construction et acteurs concernés (Fernandez, 2010)

- Intérêt et limite des entretiens

Les entretiens permettent d'obtenir des informations très riches mais essentiellement qualitatives. En revanche, ces entretiens ne permettent de toucher qu'une partie des acteurs qui ont opéré sur Créteil. Il s'agit essentiellement des acteurs récents car ce sont ceux qui sont encore en activité. Le travail devra être complété par un travail de consultation d'archives pour les constructions très anciennes.

3. Exploitation des données vis-à-vis de la quantification

L'objectif de ce paragraphe est d'appliquer les notions théoriques élaborées dans la [Partie 2](#). En d'autres termes, il s'agit d'identifier les situations-types d'émission du zinc renseignées

dans la ville de Créteil à partir des données récupérées dans le [Paragraphe 3.1](#). Ensuite, nous allons ressortir les différents critères de choix des matériaux de couverture dans la ville de Créteil à partir de l'étude urbaine (documentations et entretiens).

3.1. Tableau des situations-types d'émission du zinc

Les situations-types d'émissions du zinc renseignées sont résumées dans le [Tableau 34](#). Notons que les matériaux en zinc neuf, les aciers (acier galvanisé, acier inoxydable, prépeint), les aluminiums (naturel et laqué), le plomb neuf et le cuivre neuf sont normalisés (cf. [Chapitre 1.3](#)). Ainsi, les matériaux neufs testés par [Robert-Sainte \(2009\)](#) peuvent être considérés comme représentatifs de toute la ville de Créteil. Par contre, le prépatinage du zinc dépend du producteur. Le marché des matériaux de zinc est réparti entre deux grands industriels 70% pour VMZINC, 20% pour RHEINZINK et 10% pour les autres ([MSI, 2006](#) ; [MSI, 2012](#)). En Ile-de-France, VMZINC est le leader du zinc, il produit deux types de zinc prépatiné : anthra-zinc et quartz-zinc. [Robert-Sainte \(2009\)](#) a testé uniquement l'anthra-zinc. Dans la littérature, les valeurs d'émission du quartz-zinc sont très variables (cf. [Chapitre 1.3](#)). Néanmoins, dans la DEP du zinc effectuée par VMZINC une valeur du flux annuel d'émission du zinc par le rampant en quartz-zinc a été produite ([Vmzinc, 2010b](#)). Nous allons donc retenir cette donnée qui sera introduite dans le [Tableau 35](#) en couleur verte.

Les gouttières en aluminium ont été testées seulement sur le site de Champs-sur-Marne ([Robert-Sainte, 2009](#)). Créteil et Champs-sur-Marne sont deux sites proches et les résultats du travail de [Robert-Sainte \(2009\)](#) montrent que les valeurs d'émission du zinc par les différents matériaux testés sont proches pour les deux sites. Donc, nous allons utiliser les valeurs des gouttières en aluminium élaborées sur Champs-sur-Marne, ces valeurs sont notées en bleu dans le [Tableau 35](#).

Pour les descentes, les noues et les éléments d'étanchéité, aucune donnée n'a été produite dans la littérature. Nous proposons donc une approximation de leurs valeurs d'émission. La noue étant un élément d'évacuation d'eau de pluie, son émission de zinc sera approximée par celle de la gouttière. Les éléments d'étanchéités sont mis sur le toit sous formes de bandes rectangulaires, donc leurs émissions seront approximées par celles du rampant. De plus, d'après les DTU et les entretiens avec les industriels (cf. [Chapitre 2.4](#)), les matériaux de noues sont soit en zinc naturel soit en anthra-zinc ou encore du plomb et ceux des éléments d'étanchéité sont soit en zinc naturel soit en plomb. Les nouvelles valeurs approximées sont

en rouge dans le [Tableau 35](#). D'après Mme Texier, les noues en plomb existaient avant l'année 1900. Dans la ville de Créteil des bâtiments avant 1900 sont rares ainsi par application du principe de hiérarchisation ([cf. Chapitre 2.1](#)), les situations-types associées aux noues en plomb sont négligées.

Pour les descentes, nous ne pouvons pas effectuer une approximation puisque c'est un élément d'évacuation d'eau de pluie vertical, donc les processus d'émission sont spécifiques et différents des gouttières. Ainsi, les situations-types associées aux descentes ne seront pas prises en compte dans notre modèle.

Enfin, des variétés de zinc coloré (vert, brun...) sont disponibles sur le marché des matériaux en zinc. Ces variétés sont nouvelles sur le marché (depuis 2005) et représentent moins de 5% de part du marché actuel du zinc ([cf. Chapitre 2.4](#)). Ainsi, en termes de patrimoine ces matériaux ne représentent même pas 1% des toitures de la ville Créteil construite essentiellement avant 2005. Donc, par application du principe de hiérarchisation, les situations-types associées à ces matériaux sont négligées.

Tableau 35 : Les différentes situations-types renseignées d'émission du zinc par les matériaux de toiture

| Matériau | | Localisation sur le toit | Mode de présence | Flux unitaires (g.m ² .an ⁻¹) ou (g.m ⁻¹ .an ⁻¹)* (Robert-Sainte, 2009) |
|-----------------------------|--------|--------------------------|--|---|
| Zinc neuf | | Rampant | Composant majeur des feuilles en zinc | 3,9 |
| | | Etanchéité | | 3,9 |
| | | Gouttière* | | 0,87* |
| | | Noue* | | 0,87* |
| Zinc ancien | 35 ans | Rampant | Composant principal des feuilles en zinc ancien | 4,52 |
| | | Etanchéité | | 4,52 |
| | 40 ans | Gouttière* | | 0,81* |
| | | Noue* | | 0,81* |
| Anthra zinc | | Rampant | Composant principal des feuilles en anthra-zinc | 2,3 |
| | | Gouttière* | | 0,5* |
| | | Noue* | | 0,5* |
| Quartz-zinc | | Rampant | Composant principal des feuilles en quartz-zinc | 1,13 |
| Acier galvanisé | | Rampant | Composant principal du traitement de surface de l'acier galvanisé | 2 |
| | | Crochet de fixation | | 0,046 |
| Acier galvanisé laqué | | Rampant | Composant principal du traitement de surface de l'acier galvanisé prépeint | 0,025 |
| Acier inoxydable | | Rampant | Composant secondaire de l'acier inoxydable | Pas d'émission |
| Plomb neuf | | Rampant | Composant secondaire des feuilles en plomb | 0,052 |
| | | Etanchéité | | 0,052 |
| Plomb ancien (50 ans) | | Rampant | Composant secondaire des feuilles en plomb | 0,11 |
| | | Etanchéité | | 0,11 |
| Aluminium | | Rampant | Composant secondaire des feuilles en aluminium | 0,034 |
| | | Gouttière* | | 0,036* |
| Aluminium laqué | | Gouttière* | Composant secondaire des feuilles en aluminium | 0,011* |
| Cuivre neuf | | Gouttière* | Composant secondaire en masse des feuilles en cuivre | 0,02* |
| Cuivre ancien (20 à 25 ans) | | Gouttière* | Composant secondaire en masse des feuilles en cuivre | 0,021* |

- Le chiffre en vert correspond à la valeur d'émission élaborée par la DEP (Vmzinc, 2010b) rapportée à la surface projetée (car la mesure a été effectuée par m² de matériau avec une inclinaison de 45°).

- Les chiffres en rouge correspondent aux valeurs d'émissions de la noue et des étanchéités approximées respectivement par l'émission de la gouttière et l'émission du rampant.

- Les chiffres en bleu correspondent aux valeurs des gouttières en aluminium élaborées sur Champs-sur-Marne.

(*) Renvoi à l'unité : g.m⁻¹.an⁻¹

3.2. Critère de choix des matériaux de toiture dans la ville de Créteil

Le travail sur les différentes données qualitatives (documents d'urbanisme et enquête⁹¹ auprès des acteurs de Créteil) a permis de comprendre les différentes logiques de choix de matériaux de toit dans Créteil.

3.2.1. Les entretiens

L'identification des acteurs à interroger a été effectuée à partir d'une recherche au niveau des archives de la mairie de Créteil. La liste des acteurs est présentée dans l'[Annexe 12](#). Il s'agit des architectes et deux maîtres d'ouvrage. Leurs interventions sur Créteil s'étendent du début des années 1970 (M. Lamy) à des bâtiments encore en phase de conception (M. Bretagnolle, M. Laisné). Ces entretiens se sont quasiment tous déroulés dans les bureaux des acteurs concernés. L'exception a été avec M. Laisné, avec qui une visite urbaine de l'architecture de Créteil et notamment des quartiers Sud a été réalisée. Les entretiens concernaient tous des projets datant, pour les plus anciens, des années 1970, mais la majorité concernait des projets des années 1990 et 2000.

3.2.2. Le travail d'archives

Les entretiens ont été complétés par un travail sur archives pour les constructions anciennes pour lesquelles les acteurs n'étaient plus en activité ou étaient décédés. Ce travail s'est effectué au Service des Archives municipales de Créteil, situé au sous-sol de l'Hôtel de Ville. Des classeurs en libre accès regroupant des informations sur chaque quartier de Créteil nous ont permis de récolter des informations sur l'histoire des quartiers et les éventuelles rénovations qui ont eu lieu. En revanche, les informations sur les matériaux de toitures étaient très rares.

3.2.3. Analyse des résultats

*a. Urbanisation de Créteil au fil de l'histoire : un puzzle urbain*⁹²

- Le centre ancien (Créteil avant-guerre) : La toiture en pente

D'après M. Vaillant, au 19^{ème} siècle, la présence humaine est surtout concentrée autour de l'Église Saint-Christophe et dans le hameau du Mont-Mesly. Seul 25% du territoire de la ville

⁹¹ Cette enquête a été effectuée dans le cadre d'un stage de master M1 en géographie : d'Allens, P., et Prigent, P. (2012) Stratégies de choix des matériaux de toitures dans la ville de Créteil, LEESU.

⁹² <http://www.ville-creteil.fr>, Histoire de la ville : « l'urbanisme cristolien, un puzzle urbain »

est alors urbanisé, les espaces libres sont principalement occupés par des cultures maraîchères (cf. Figure 85). Créteil est un village⁹³. Avant la guerre, le centre ancien est composé de tissus pavillonnaires et d'habitat collectif, il dispose d'une structure commerciale le long d'une rue piétonne. Dans cette zone il n'y a pas d'équipements, c'est un site rural lié par un tramway avec Paris, il n'y a pas un grand axe routier. Ainsi, l'urbanisation n'a pas été très forte. Les Cristoliens vivent de l'agriculture, ils sont principalement des maraîchers. Il y a aussi des ouvriers qui vivent de la petite industrie. La ville de Créteil à cette époque n'est pas une grande ville ouvrière de la banlieue comme Bobigny ou Saint-Denis. La ville a connu une forte activité agricole (époque Haussmannienne) et de nombreux parisiens possèdent une maison de campagne sur les bords de Marne. En termes de matériaux de toitures il y a de la tuile en terre cuite sur les pavillons et de l'ardoise pour les maisons bourgeoises. Aujourd'hui, le centre ancien a gardé son aspect « village » avec ses pavillons, ses petits immeubles aux toitures en tuile et l'Église Saint-Christophe. Ainsi, le centre ancien n'a pas de périmètre historique de 500 m comme pour Paris. Ce constat est identique pour les autres villes de la première couronne de la région parisienne à la même époque.

Le premier type d'habitats collectifs arrive vers les années 1930. En effet, pendant ces années il y a toute la préoccupation hygiénique. Les premiers immeubles (petits collectifs (ex : 3 étages) sont disséminés autour de Créteil village. Le premier et important lotissement d'habitats collectifs, c'est la cité-jardin en 1927. Dans cette cité, les équipements existant sont l'hôpital intercommunal et le groupe scolaire Victor Hugo. Cette cité est la seule dans Créteil avec une architecture des années 1930 caractérisée par des bâtiments de murs en briques avec des toitures en tuile. Cette architecture est retrouvée partout en France pendant cette époque.

⁹³ Site officiel de la Mairie de Créteil : <http://www.ville-creteil.fr>, Chiffres clés : « Démographie contemporaine 1801-2009 »



Figure 85 : (a) Le centre ancien avec ses toitures en tuile en 1945⁹⁴; (b) Les espaces libres occupés par des cultures maraîchères en 1960⁹⁵

- *Créteil après la seconde guerre : naissance de la toiture-terrasse*

La ville a connu une urbanisation sans précédent après la seconde guerre mondiale comme partout en France. Entre 1950 et 1960, la région parisienne manque cruellement de logements : de nouveaux quartiers de grands ensembles sont construits sous le mandat du maire André Dassibat (1953-1965) à Créteil : les Bleuets, les Emouleuses, la cité du Mont-Mesly et le Fief ([Ville de Créteil, 2004](#)). Ainsi, en 1955, un des plus grands chantiers de Créteil démarre pour résoudre le besoin en matière de logements consécutif à l'urgence de l'après-guerre. Il s'agit de la construction du quartier du Mont-Mesly dont l'urbaniste est Gustave Stoskopf ([Ville de Créteil, 2003](#)). La cité des Bleuets de Paul Bossard en 1959 est construite par la préfabrication qui commence à se diffuser alors partout en France. La population communale est alors de 25 000 habitants. Les grands ensembles sont dotés de toitures-terrasses inspirées du mouvement de modernisme en architecture ([cf. Figure 86](#)).

⁹⁴ Site officiel de la Mairie de Créteil : <http://www.ville-creteil.fr/images-dantan>

⁹⁵ Site officiel de la Mairie de Créteil : <http://www.ville-creteil.fr/PDF/PDF-cv/cartes-postales-creteil/Quartier-Mont-Mesly.pdf>



Figure 86 : (a) Le quartier des Bleuets; (b) Le quartier de Mont-Mesly (PLU, 2010)

- *Le nouveau Créteil I : Continuité des toitures-terrasses*

S'inscrivant dans un mouvement de décentralisation, la loi de réorganisation de la région parisienne du 10 juillet 1964 impose la création de six nouveaux départements afin de rendre les banlieues autonomes. Créteil est choisie (en 1965) comme chef-lieu du Val-de-Marne (Coudroy de Lille, 2005). Ce choix est favorisé par trois décisions. D'abord, la décision de la création du département du Val-de-Marne qui a tranché sur le choix entre deux villes : Créteil et Choisy-le-Roi. Or, dans les années 1960 Choisy-le-Roi a subi une importante rénovation sous forme de deux tours et une architecture sur dalles. Donc, dans cette ville il y a moins de place par rapport à Créteil. De plus, à Créteil l'état a déjà acheté du terrain, une zone qui a été détectée par le schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme de 1965 placé sous le contrôle de Paul Delouvrier, le délégué général du SDRIF de la région parisienne. Enfin, l'élection du maire Général Billotte (1965-1977) est décisive dans le choix de Créteil.

Cet *acte politique* de décentralisation va être à la source de l'urbanisation rapide de Créteil dans les années 1960-1970, qui se démarque de la politique des villes nouvelles du Schéma d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Parisienne (SDAURP) par son financement mixte (privé-public) (Billotte, 1972). La ville doit ainsi se doter de toutes les infrastructures et équipements liés à son nouveau statut de chef-lieu départemental : voies et moyens de communications (voies rapides, autoroute, métro), logements en grandes quantités, bureaux, et autres équipements d'importance départementale et régionale (Palais de justice et université).

Le Maire Billotte a opté pour un urbanisme hérité de Le Corbusier (Billotte, 1970), qui se traduit par un plan d'ensemble qui prévoit une organisation spécialisée des circulations et des

constructions de type tours et barres mais aussi des équipements de proximité implantés au sein de chaque quartier et de vastes espaces verts (cf. Figure 87).



Figure 87 : Photo aérienne de la première tranche du Nouveau I Créteil (PLU, 2010)

Le Général Pierre Billotte a comme volonté de corriger les erreurs architecturales de l'époque, les grands ensembles des années 1950 entre autres. Une des idées fortes est d'attirer l'emploi autant que la population, afin de ne pas faire de Créteil une «ville-dortoir». L'enjeu est donc de réaliser une ville qui rassemblera toutes les fonctions urbaines.

Dans le Nouveau Créteil I, chaque quartier a été conçu par un architecte et doit son originalité à la grande liberté donnée aux architectes. Des architectes jeunes ont été privilégiés. Globalement, l'architecture est caractérisée par des tours et au sol des crèches, des écoles, des jardins... Les quartiers ne sont plus isolés (Ville de Créteil, 2005). De plus, il y a un désir de remise en cause des barres et des tours construites depuis l'après-guerre avec des formes, pour le Nouveau Créteil, variées, sculptées, et parfois insolites comme les « choux » (cf. Figure 88). L'architecture moderniste veut rompre avec la ville du passé. En termes de toitures, cela se concrétise par la disparition de la pente au profit de la terrasse, rendue possible grâce aux nouvelles techniques de construction et aux nouveaux matériaux tels que le béton et l'acier. Les quartiers résidentiels et mixtes du Nouveau Créteil ont ainsi comme influence cette architecture moderniste. Contrairement aux formes des bâtiments et aux façades qui sont d'une grande diversité selon les quartiers, la toiture est sensiblement du même type (Béleret, 2008). Le Nouveau Créteil I est une architecture post-moderne, Pierre Billotte n'avait pas vraiment l'intention de supprimer les toitures inclinées. Les toitures-terrasses étaient la conception de l'architecture de cette époque.

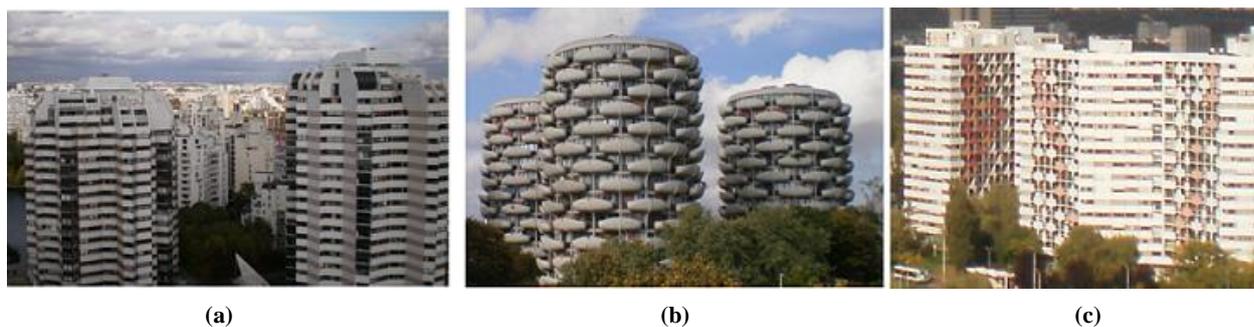


Figure 88 : (a) Les immeubles « Philippines » ; (b) Les « choux » ou « épis de maïs »; (c) Les immeubles à façades colorées

- *Le nouveau Créteil II : La renaissance de la toiture en pente*

En 1968, les apprentis architectes, à l'image de la société, remettent en cause l'architecture des années 1960, rectiligne et verticale ou horizontale (Ringon, 1997). Ainsi, au début des années 1970 une nouvelle politique de construction est mise en œuvre. Elle est basée sur des procédures d'industrialisation reposant sur une réflexion plus poussée au niveau de l'utilisation des matériaux. Cette procédure est à l'opposé de la logique d'industrialisation et de préfabrication massive des décennies précédentes. Nous assistons à une nouvelle façon d'appréhender les constructions. Il ne s'agit plus des grandes tours de plusieurs étages mais des modèles humains.

En 1977, le nouveau maire élu à Créteil, Laurent Cathala, va suivre le nouveau mouvement d'urbanisme (Coudroy de Lille, 2005). Il remet en cause l'urbanisation opérée par le Général Pierre Billotte⁹⁶. Son slogan de campagne est : « Votre ville c'est votre vie » ce qui marque son attachement à une urbanisation concertée. C'est pourquoi il crée, dès 1978, l'Atelier Public d'Urbanisme (APU) de Créteil permettant d'associer les habitants à l'aménagement et à l'urbanisation de la tranche du Nouveau Créteil II (Coudroy de Lille, 2005). Les tours et les bâtiments monumentaux laissent place à des bâtiments plus petits et les voies rapides à des rues. Le nouveau maire veut que cette seconde tranche soit à « taille humaine ». Il entame dans les années 1980 la réhabilitation du Centre Ancien (cf. Figure 89) et le début de la réalisation de cette deuxième tranche située autour du lac, dans le sud de la commune (cf. Figure 90).

Cette deuxième phase dans l'urbanisation de Créteil est achevée en 2012. C'est un mouvement architectural de l'époque qui se retrouve dans beaucoup d'autres villes françaises, principalement dans l'architecture balnéaire.

⁹⁶ Site officiel de la ville de Créteil : <http://www.ville-creteil.fr/>, « Histoire de la Ville »



Figure 89 : Réhabilitation du Centre Ancien – Quartier La Bordière : ajouts des éléments en bardeaux bitumeux aux toits-terrasses bi-pentes



**Figure 90 : Les différents quartiers avec les toitures en pente du Nouveau Créteil II⁹⁷
(Source Créteil habitat – SEMIC)**

Pour le nouveau Créteil II, Laurent Cathala a opté pour un urbanisme qualifié de « post-haussmannien » avec des repères parisiens tels que l'alignement sur rue, l'îlot et surtout les toitures dont il exige qu'elles soient inclinées. Les nouveaux quartiers sont construits autour de parcs avec des habitations qui ne dépassent pas 7 étages afin de contrecarrer la hauteur des bâtiments de la première tranche (Ville de Créteil, 2006). Ces bâtiments d'habitation sont munis de toits en pente afin de leur donner un aspect « pavillon ». Il y a une volonté de revenir à un aspect plus traditionnel de la ville (Coudroy de Lille, 2005). Cet aspect est à l'opposé de l'architecture moderniste de la première tranche du Nouveau Créteil et de ses toitures-terrasses.

⁹⁷ SEMAEC (Syndicat d'Economie Mixte d'Aménagement et d'Équipement de la ville de Créteil), créée en 1966 précisément pour le projet du Nouveau Créteil, qui associe les acteurs publics comme l'Etat, et privés (la Compagnie bancaire par exemple).

Le maire Cathala préconise ainsi des toitures à pentes dont sont pourvus la plupart des bâtiments des quartiers Sud. Néanmoins, les architectes, préférant les toitures-terrasses, ont opté parfois pour la mise en place de simples brisis de toitures dissimulant des toitures-terrasses, ce qui donne l'impression depuis la rue qu'il s'agit d'une toiture en pente (cf. Figure 91). La principale contrainte pour certains quartiers construits depuis la fin des années 1990 est la couleur de la toiture qui doit être de couleur sombre noirâtre ⁹⁸(cf. Figure 92). En effet, le maire exige une cohérence entre des bâtiments du même quartier. Il s'agit d'une recherche d'une qualité de vie comparable à celle du logement individuel, notamment par des toitures en pente sur des immeubles d'habitat collectif.



Figure 91 : Les toitures noirâtres du quartier du Port avec des matériaux différents (tuile béton, bardeaux bitumineux...)



Figure 92 : Exemple des toitures-terrasses avec des brisis en bardeaux bitumeux- Quartier L'Ormetteau

b. Les critères de choix des matériaux de toiture à Créteil

Il est ressorti des entretiens que le choix des matériaux de toiture ne résulte pas systématiquement de la même personne. Le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre ont, suivant les cas, plus ou moins d'influence concernant ce choix. L'architecte a cependant le rôle le plus important. Dans ce paragraphe nous allons montrer que les critères de choix des matériaux de toitures définis dans le [Chapitre 2.3](#) ainsi que les règles d'identification des matériaux de toiture décrites dans le [Chapitre 2.4](#) sont bien confirmés et validés dans le cas de Créteil.

⁹⁸ Entretien avec Mme Pascale Germain, architecte-urbaniste à Créteil Habitat – SEMIC, le 26/03/2012

- *Epoque de construction*

Comme décrit dans le paragraphe précédent, l'évolution historique de l'urbanisation de la ville de Créteil a impacté énormément l'utilisation des matériaux de couverture. Ainsi, la tuile en terre cuite est utilisée sur les constructions relativement anciennes (le centre ancien), celles plus récentes étant plus souvent en tuile béton ou en bardeaux bitumineux (même si ce n'est pas systématique) pour des raisons de coût. Créteil I est caractérisée par des toitures-terrasses. La nature du revêtement de ces toitures est une membrane d'étanchéité bitumineuse soit autoprotégées soit recouvertes d'une couche de graviers. Enfin, dans le Créteil II, un retour aux toitures en pentes qui s'affichent parfois comme des réelles toitures inclinées ou par des toitures-terrasses avec des brisis. Ainsi, la règle décrite dans le [Chapitre 2.4](#) « *L'évolution urbaine spatiale et chronologique de l'échelle urbaine influence l'utilisation des matériaux de toiture* » est bien confirmée dans le cas de Créteil.

De plus, l'analyse de l'histoire de Créteil montre bien que son urbanisation suit le mouvement architectural de l'époque de construction. En effet, les mouvements architecturaux ont été encouragés par les maires qui ont mis en œuvre les idées des architectes dans leurs villes. Donc, la règle décrite dans le [Chapitre 2.4](#) « *A chaque période historique correspond une répartition spécifique de matériaux de toitures* » est bien confirmée dans le cas de Créteil.

Pour le renouvellement des toitures, nous avons essayé d'obtenir cette information auprès de la Mairie. Malheureusement, aucune statistique sur le sujet n'est disponible. Néanmoins, quelques informations ont été collectées sur le renouvellement du parc immobilier construit pendant le Nouveau Créteil I, la période des grands ensembles comprenant presque exclusivement des toitures-terrasses (cf. [Annexe 13](#)).

- *La réglementation au niveau de la ville*

La coordination du projet Nouveau Créteil I a été effectuée par le maire Général Billotte qui a mis en place l'équipe de travail des architectes. De même pour Créteil II, c'est le nouveau maire Cathala qui remet en cause l'urbanisation de Créteil I et oriente Créteil II vers une urbanisation rappelant le centre ancien. L'implication des deux maires a énormément influencé le choix des matériaux de toiture. Les toitures construites pendant le mandat du Général Billotte ont été majoritairement des terrasses alors pendant le mandat de Cathala il s'agit d'un retour aux toitures inclinées. Donc, à Créteil, la municipalité, via des outils tels le PLU et les permis de construire, apparaît comme l'acteur prédominant dans le choix de matériaux de toitures. Ce constat a été confirmé par tous les acteurs interrogés. Ainsi, aujourd'hui, le PLU de la ville comprend une obligation de mise en œuvre de toitures

inclinées dans l'optique d'assurer la préservation de l'identité architecturale. Enfin, la règle décrite dans le [Chapitre 2.4](#) « *Le cadre réglementaire, dans une échelle urbaine autorise/préconise des matériaux de toiture* » est bien confirmée dans le cas de Créteil.

- *Typologie de bâtiments*

Créteil est une ville mixte qui mêle équipements, bureaux, habitat individuel et habitat collectif. L'habitat individuel, principalement située dans la partie Nord-Est de la commune, couvre 24% de l'occupation du sol bâtie⁹⁹ mais il ne représente que 8% des logements de la ville¹⁰⁰. Ce tissu pavillonnaire est caractérisé par des toitures inclinées en tuile. L'autre élément important est que, en termes de surface au sol, l'habitat collectif est un peu plus important que l'habitat individuel (31% de l'occupation du sol bâtie). Ces habitats collectifs sont caractérisés par des toitures-terrasses dans le quartier Mont-Mesly. Les acteurs confirment bien que le choix des matériaux de toitures est effectivement différent selon la fonction du bâtiment (équipement, logements..). C'est selon ce principe que les architectes et la maîtrise d'ouvrage préconisent des petits éléments pour l'habitation, des panneaux métalliques ou l'étanchéité pour les activités. Les bâtiments luxueux à Créteil correspondent aux équipements tels que la préfecture avec une structure en aluminium, une couverture en inox. Ainsi, la règle décrite dans le [Chapitre 2.4](#) « *A chaque classe de bâtiment correspond une répartition spécifique des matériaux de toitures* » est bien confirmée dans le cas de Créteil.

- *Caractéristiques du matériau de toiture*

Les architectes interrogés confirment bien que le critère *technique* (cf. [Chapitre 2.3](#)) représente un facteur important dans le choix du matériau du toit, en particulier dans la ville de Créteil. Le problème majeur auquel l'architecte doit faire face est la fuite d'infiltration. La conception du toit doit donc être particulièrement soignée, c'est pourquoi l'architecte choisit des solutions techniques connues et testées, *a priori* fiables. Cela laisse donc peu de chance à des projets innovants, certes, mais peu fiables. Le deuxième problème évoqué est celui du savoir-faire des équipes techniques. Plusieurs architectes nous ont fait part du fait que leurs idées d'innovations pour la toiture étaient souvent abandonnées du fait d'équipes de chantier non formées à ce type de mise en œuvre.

⁹⁹ IAU-IDF, occupation du sol simplifiée 2008, Commune de Créteil

¹⁰⁰ INSEE, Chiffres clés sur un territoire, Le dossier complet 2008, Commune de Créteil

Au niveau du *prix* du matériau, pour la moitié des architectes rencontrés, c'est un critère qui influence le choix du matériau de toiture. Ils choisissent donc le matériau le moins cher parmi les choix retenus selon d'autres critères secondaires.

Les architectes nous ont peu parlé de l'*écologie* comme critère important dans leur choix de matériaux de toiture. Cela a été seulement le cas pour les architectes de la Maison de l'enfance (J. Lorch et B. Chapon). En effet, la toiture végétalisée contribue à l'inertie thermique du bâtiment et permet d'avoir de la fraîcheur naturelle l'été. De plus, elle avait été demandée expressément par la ville.

- *Esthétique et intégration dans le paysage urbain*

L'esthétique et l'intégration dans le paysage urbain, deux critères identifiés dans le [Chapitre 2.3](#), sont aussi des critères qui ont influencé le choix des matériaux de toiture dans la ville de Créteil.

L'*esthétique* du toit est définie par les architectes comme l'harmonie entre la toiture et l'ensemble du bâtiment. Il faut que la toiture réponde aux critères visuels attendus de ce type de bâtiment (ex : toit à pans pour un pavillon ; toit métallique pour un équipement...). C'est pourquoi les architectes évoquent aussi le terme de « symbolique » : le toit est un repère urbain normé, il répond donc à des codes esthétiques. Sur huit entretiens d'architectes rencontrés, sept affirment que l'esthétique était un critère important dans leur choix de matériaux dans la ville de Créteil.

La moitié des architectes rencontrés évoquent également d'emblée l'importance de *l'intégration de la toiture dans son environnement architectural*, particulièrement pour l'habitat. En effet, l'équipement peut toujours se distinguer de son environnement de par sa fonction particulière, mais l'habitat doit être intégré. C'est pourquoi les toitures à pans sont obligatoires dans les quartiers pavillonnaires ou de petit collectif. Dans Créteil, le quartier 'La Source' est caractérisé par des toitures uniquement en acier. Le quartier 'Les Sarrazins' présente des toitures de matériaux différents (ardoise, shingle...) mais avec une couleur unique le noir.

- *La forme de la toiture : controverse parmi les architectes*

Les architectes ont confirmé que la forme de la toiture plate ou inclinée impose un choix des matériaux de toiture. Par exemple, la tuile ne peut pas être mise en œuvre sur une toiture plate, tout simplement pour des raisons techniques. De nombreux bâtiments d'habitation de Créteil possèdent un toit en pente. Ce type de toiture, pour certains architectes, n'a pas

d'utilité aujourd'hui surtout en région parisienne. En effet, la toiture-terrasse reste toujours la solution la plus simple et la plus économique, alors que la mise en place d'une toiture en pente doit être effectuée dans un contexte bien défini (ex : quartier). Il ne s'agit pas seulement de faire des toitures traditionnelles mais de proposer des toitures contemporaines. D'autres architectes considèrent que les toitures en pente peuvent être modernes même si elles ne sont pas indispensables. Ils mettent en œuvre des toitures inclinées pour les équipements et les logements collectifs. Leurs arguments sont que la toiture à pans peut servir à mettre des panneaux solaires, ou encore à faire un jeu sur les volumes des combles.

3.2.4. Synthèse des résultats

Cette enquête au niveau de la ville de Créteil, que ce soit à travers les entretiens ou l'étude des archives, nous a permis d'identifier les critères qui ont influencé le choix des matériaux de toiture. Nous retrouvons bien les critères identifiés dans le [Chapitre 2.3](#). Ces critères se résument en critères liés à l'histoire de l'urbanisation de Créteil, l'évolution des visions architecturales, les réglementations (PLU et permis de construire), les caractéristiques du matériau (coût, technicité...), l'esthétique et l'intégration de la toiture dans le paysage urbain et enfin la typologie du bâtiment. Le choix du matériau peut être effectué par le maître d'ouvrage ou le maître d'œuvre selon le projet, mais l'architecte a le rôle le plus important dans ce choix même à Créteil. En effet, même si le maire Laurent Cathala a exigé des toitures en pentes, les architectes rétifs à cette option ont contourné cette contrainte par l'installation des toitures-terrasses avec des brisis donnant l'impression de voir des toitures inclinées. Enfin, les règles d'identifications des matériaux de toiture à l'échelle de la ville élaborées dans le [Chapitre 2.4](#) ont été bien validées dans le cas de Créteil. Ainsi :

- *A chaque période historique correspond une répartition spécifique de matériaux de toitures.*
- *A chaque classe de bâtiments correspond une répartition spécifique des matériaux de toitures.*
- *L'évolution urbaine spatiale et chronologique de la ville de Créteil influence l'utilisation des matériaux de toiture.*
- *Le cadre réglementaire, dans la ville de Créteil autorise /préconise des matériaux de toiture.*

Pour illustrer ce travail, nous avons élaboré deux types de cartes ([cf. Figure 93](#)). La première carte représente la distribution majoritaire des matériaux de couverture et la deuxième est une carte de spatialisation chronologique détaillée de l'urbanisation de Créteil. Ces deux cartes permettent d'avoir des données qualitatives mais spatialisées sur les matériaux de toiture.

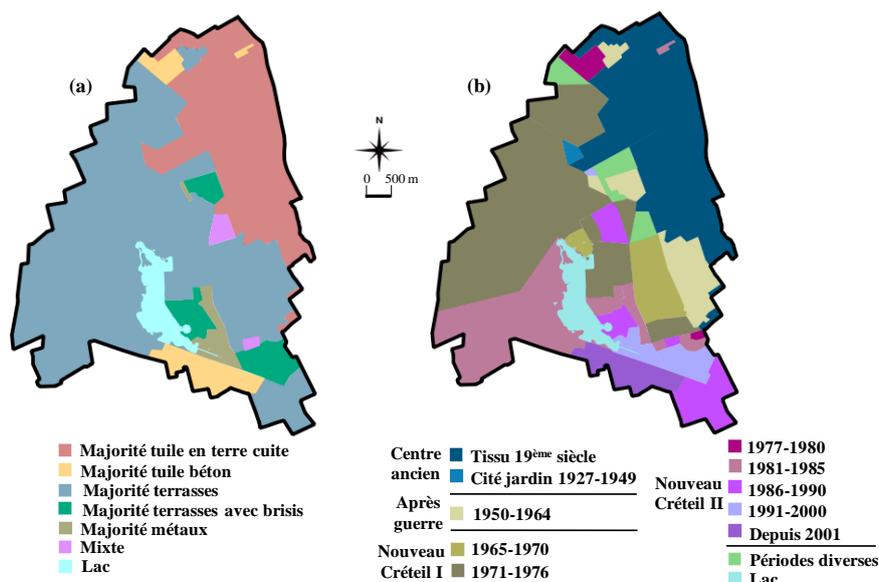


Figure 93 : (a) Répartition majoritaire des matériaux de toiture ; (b) Epoques de construction de l'espace bâti

4. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons effectué le choix du contaminant zinc et de la ville de Créteil à travers lesquels nous allons continuer le développement de notre méthode. Un premier travail a été effectué permettant, d'une part, d'obtenir un tableau de toutes les situations-types d'émission du zinc dans la ville de Créteil. D'autre part, nous avons identifié les bases de données urbaines quantitatives disponibles (MOS, images aériennes...) dans la ville et nous avons effectué une étude de l'histoire de l'urbanisation de Créteil qui a permis d'identifier les différents critères influençant le choix des matériaux et ainsi de valider les règles d'identification des matériaux de toitures à l'échelle de la ville. Néanmoins, toutes ces informations collectées n'ont pas permis d'accéder à une information quantitative des matériaux de toitures.

Nous avons montré aussi que la ville de Créteil est un véritable catalogue, un échantillon de toutes les architectures développées dans les villes Françaises au fil du temps. Ainsi, nous pouvons faire vraiment le parallèle (la transposition) entre ce qui a été fait en termes de typologie sur Créteil et les autres villes. Nous observons des récurrences de certaines typologies dans une même époque dans Créteil dans les autres villes : première et deuxième couronnes d'Ile-de-France et même d'autres villes non parisiennes.

L'architecture observable à Créteil se retrouve également dans d'autres villes françaises. Des formes assez simples et que nous pouvons trouver dans d'autres villes françaises et même étrangères. Il ne s'agit pas de modèles spécifiques à Créteil. Ce qui change c'est l'expérience avec des architectures qui sont plus développées dans une ville que dans une autre. Par exemple, l'architecture des années 1930 se réduisait à l'hôpital intercommunal de Créteil alors que quelques km plus loin à Maisons-Alfort cette architecture des années 1930 est nettement plus développée. Mais les modèles de bâtiments sont les mêmes, tels que des immeubles identiques dans les deux villes ou encore l'hôtel de ville de Maisons-Alfort des années 1960 qui ressemble à une bibliothèque de Créteil. Par contre, à Créteil, l'architecture post moderne est plus marquée. Ainsi, ce sont les proportions qui sont différentes d'une ville à une autre.

En outre, l'influence très marquée des maires dans le choix des architectures de la ville n'est pas spécifique à Créteil. D'autres villes connaissent également ce phénomène. En effet, dans les années 1960 l'Etat est très fort, et les municipalités aussi et peuvent imposer leurs urbanisations. Ceci est vrai pour les villes communistes de la banlieue dite « rouge » comme Saint-Denis, Montreuil ou Pantin. Les maires de ces villes vont aussi travailler avec les architectes de leurs bords politiques. La ville est marquée par une architecture très particulière. Ainsi, à Montreuil, le centre-ville complètement reconstruit dans les années 1960-1970 est un modèle presque unique avec des tours de plusieurs étages. Il faudra noter que les maires ont été influencés par les mouvements architecturaux (comme celui de Le Corbusier). Ils choisissent les architectes par rapport aux formes et aux grandes conceptions de l'époque. Le maire va également influencer des points, tels que la rapidité de construction ou certains critères formels. Il n'intervient pas forcément sur des éléments de construction comme la couverture ou les charpentes mais il intervient sur les couleurs, les formes globales, la composition de certains quartiers.

Dans la suite, l'objectif est de développer une méthode de quantification des dimensions (surface, longueur) des matériaux des différents éléments du toit à travers la ville de Créteil, un terrain concret. Ce travail sera basé sur le *croisement et l'articulation* de tous les outils et données présentés précédemment ainsi que les autres règles de quantification et d'identification développées dans le [Chapitre 2.4](#). Il s'agit, d'une part, d'appliquer ces règles du [Chapitre 2.4](#) et, d'autre part, de développer une méthode statistique de quantification des

surfaces des familles de matériaux de rampant et des longueurs de gouttières et de noues¹⁰¹ à travers la ville de Créteil.

¹⁰¹ Rappelons que les descentes ont été écartées de notre modèle vu l'absence de leur données d'émission de zinc.

Chapitre 3.2 Quantification des surfaces des familles de matériaux de rampants et des longueurs de gouttières et de noues associées

Ce chapitre a pour objectif d'appliquer, à travers la ville de Créteil, les principes développés dans le [Chapitre 2.3](#) et de développer une méthode statistique de quantification des dimensions des éléments de toitures. D'après le tableau des situations-types du zinc (cf. [Chapitre 3.1](#)) les éléments de toit émetteurs du zinc sont le rampant, la noue, la gouttière, les descentes et les éléments d'étanchéité. Comme décrit dans le [Chapitre 3.1](#), les émissions par les descentes ne sont pas étudiées dans la littérature et aucune approximation de leurs flux unitaires n'a pu être attribuée (la descente un élément d'évacuation d'eau de pluie vertical, donc les processus d'émission sont spécifiques). Ainsi, les situations-types associées aux descentes ne seront pas prises en compte dans notre modèle. Les éléments d'étanchéités sont des petites bandes métalliques qui interviennent dans beaucoup d'éléments de toiture tels que les fenêtres et les cheminées, leurs contributions à l'émission du zinc seront d'ordre 2 par rapport aux autres éléments de toiture. La diversité de ces éléments dans une toiture, leur quantification à grande échelle devient plus compliquée à effectuer nécessitant un travail typologique en premier lieu. Ainsi, nous pouvons nous limiter à l'évaluation des dimensions des rampants, des noues et des gouttières à l'échelle urbaine comme une première approche montrant qu'il est possible d'effectuer une quantification à grande échelle.

Un découpage de la ville de Créteil en unités urbaines homogènes appelées *entités* sera effectué. Une *entité* est définie par une classe de bâtiments localisée historiquement. A chaque *entité* nous associons une répartition spécifique des matériaux des éléments de toitures. Pour calculer cette répartition, nous avons développé une méthode statistique basée sur un échantillonnage aléatoire en conjonction avec l'interprétation des photos aériennes des différentes parties du toit. Il s'agit d'une interprétation visuelle directe des familles de matériaux de rampant et indirecte pour les matériaux de gouttières et de noues.

1. Découpage de la ville en entités urbaines homogènes

Dans le [Chapitre 2.4](#), nous avons montré que la première étape de quantification des dimensions des matériaux des différents éléments du toit est l'évaluation des surfaces des familles des matériaux de rampant. Pour évaluer ces familles la première tâche consiste à appliquer, dans le cas de la ville de Créteil, le principe défini comme suit : «*A chaque classe de bâtiment localisée historiquement et spatialement dans une ville correspond une répartition propre des matériaux de toiture*» (cf. [Chapitre 2.3](#)). Ainsi, nous allons procéder à un travail d'adaptation et de croisement des bases de données identifiées ainsi que des informations récoltées pour la ville de Créteil dans le [Chapitre 3.1](#). Il s'agit d'appliquer les principes d'identification des matériaux de toiture à l'échelle urbaine élaborée dans le [Chapitre 2.3](#) :

- *A chaque période historique correspond une répartition spécifique de matériaux de toitures.*
- *A chaque classe de bâtiments correspond une répartition spécifique des matériaux de toitures.*
- *L'évolution urbaine spatiale et chronologique de l'échelle urbaine influence l'utilisation des matériaux de toiture.*

Les résultats de ce travail se traduisent par des cartes opérationnelles facilement exploitables.

1.1. Carte de classes de bâtiments et carte historique de Créteil

L'élaboration de la carte des classes de bâtiments pour la ville de Créteil est basée sur la réorganisation de la base MOS IAU-IDF (datant de 2008) (contenant 81 modes d'occupation de sol) de manière à obtenir les 13 classes de bâtiments présentées dans le [Chapitre 2.3](#). Le travail a été réalisé avec le système d'informations géographiques QGIS¹⁰² (cf. [Figure 94](#)). Chaque couleur correspond à une classe de bâtiments, par exemple les habitats individuels sont en bleu et les bâtiments culturels sont en gris.

Dans le [Chapitre 2.3](#), nous avons identifié les grandes périodes d'urbanisation qui ont marqué les matériaux de couverture que ce soit au niveau de leurs utilisations ou de leurs propriétés.

Ces périodes se résument comme suit :

- Avant 1850 : avant la révolution industrielle ;
- 1850-1918 : la révolution industrielle ;

¹⁰² <http://www.qgis.org/fr/site/>

- 1918-1945 : après la première guerre mondiale ;
- 1945-1974 : les trente glorieuses après la deuxième guerre mondiale ;
- 1974-2000 : la mise en œuvre des nouvelles idées architecturales ;
- 2000-2013 : prise en compte de la notion d'écologie dans la construction.

Ces périodes sont croisées avec l'histoire urbaine de la ville de Créteil décrite dans le [Chapitre 3.1](#) ce qui conduit à l'élaboration de deux cartes : une qui montre la distribution majoritaire des matériaux de couverture et l'autre qui représente les époques de construction de l'espace bâti de Créteil. Ainsi, trois principales périodes historiques de la ville de Créteil influençant l'utilisation des matériaux de couverture ressortent :

- *zone historique 1 (1900-1950)* : période avant la deuxième guerre mondiale caractérisée par des toitures en tuile ;
- *zone historique 2 (1951-1980)* : période après les guerres et les trente glorieuses, les toitures sont majoritairement des terrasses ;
- *zone historique 3 (1981-2008)* : les toitures sont majoritairement inclinées.

La limitation à l'année 2008 vient du fait que les bases de données urbaines sont disponibles (MOS-IAU, BD-TOPO et BD-ORTHO) à cette année.

Nous obtenons une carte historique délimitant ces trois périodes (cf. [Figure 94](#)) élaborée avec QGIS.

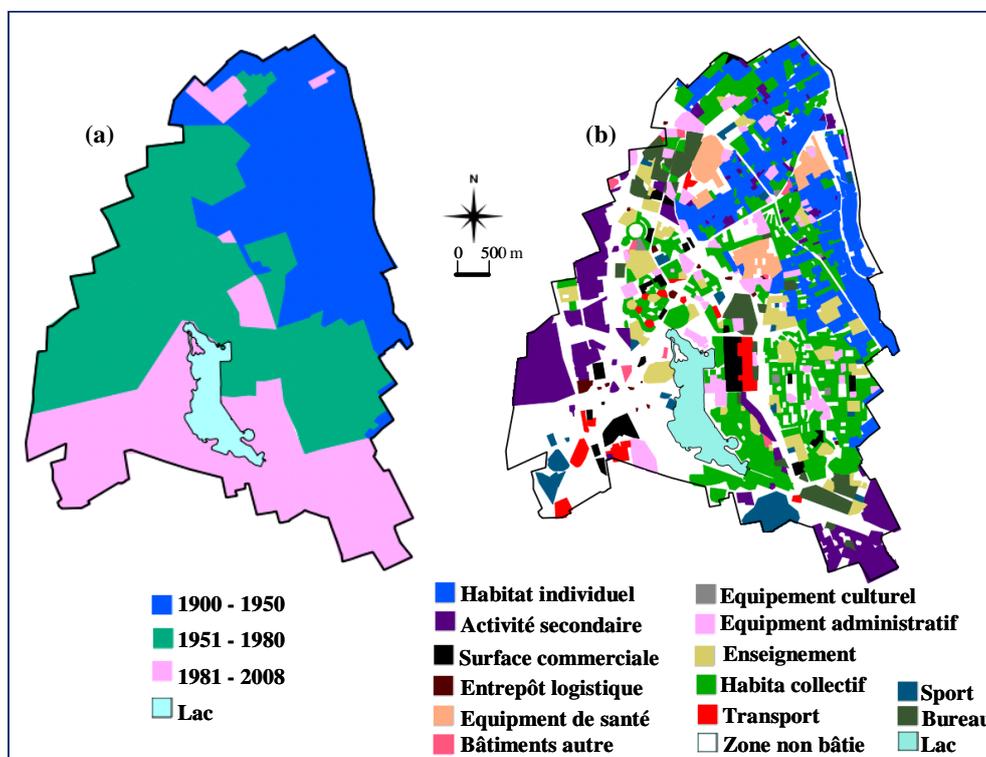


Figure 94 : (a) Carte historique (b) Carte de classes de bâtiments

1.2. Création d'entités urbaines homogènes

L'application du principe «A chaque classe de bâtiment localisée historiquement et spatialement dans la ville de Créteil correspond une répartition propre des matériaux de toitures» se traduit par un croisement des deux cartes précédentes : la carte historique et la carte de classes de bâtiments. Ce premier croisement permet d'obtenir la surface de chaque classe de bâtiments par zone historique. Néanmoins, ces surfaces ne se limitent pas aux emprises au sol des bâtiments mais aussi alentour (ex : jardin). Ainsi, nous avons rajouté un deuxième croisement de ces deux cartes avec la BD-TOPO qui donne la surface projetée de la toiture de chaque bâtiment. Nous obtenons donc pour chaque classe de bâtiments localisée dans une zone historique la surface projetée de la toiture de chaque bâtiment.

Notons que les données de la BD-TOPO ne permettent pas toujours d'isoler chaque bâtiment seul, mais des îlots de bâtiments comportant différentes familles de matériaux de toitures. Par exemple dans la [Figure 95](#), la BD-TOPO a isolé trois bâtiments mitoyens avec différentes toitures : une en tuile couleur orange, une en tuile brune et une toiture-terrasse. Dans la suite, pour faciliter le travail, nous utiliserons le mot bâtiment qui peut être effectivement un seul bâtiment ou un îlot de bâtiments. Ce phénomène n'influencera pas le développement de la méthode puisque, après le tirage, chaque matériau de toiture sera identifié visuellement et chaque dimension d'élément de toiture sera mesurée avec QGIS.

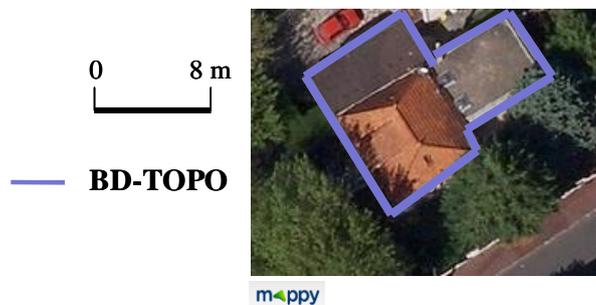


Figure 95 : Exemple d'îlot de bâtiments

Le travail de croisement des différentes bases a nécessité un traitement spécifique. En effet, nous avons remarqué un décalage entre les deux bases, de classes de bâtiments et de la BD-TOPO, dans certaines zones. Par exemple, une partie d'un bâtiment de la BD-TOPO peut ne pas être incluse dans la délimitation d'une classe de bâtiments donnée. Donc, nous avons effectué un traitement de ces failles en retravaillant les zones où ce décalage est très marqué. Ainsi, d'après la [Figure 96](#), une partie de la maison M n'est pas incluse dans la délimitation de

la classe de bâtiments. Pour corriger ce décalage, nous rajoutons un nouveau polygone englobant la partie manquante et qui sera associé à la classe de bâtiments à l'aide de QGIS. Ensuite, en effectuant l'intersection BD-TOPO et de la classe de bâtiments, les parties manquantes seront prises en compte. Enfin, nous obtenons les bâtiments de la classe de bâtiments représentés par la BD-TOPO.

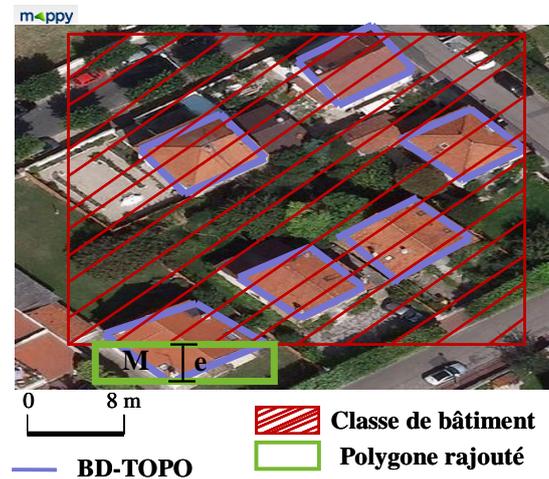


Figure 96 : Correction du décalage BD-TOPO et classe de bâtiment

Nous appellerons par la suite une *entité* : « une classe de bâtiments localisée dans une zone historique ». Les bâtiments de chaque *entité* sont considérés comme homogènes du fait de leur appartenance à une classe de bâtiments et une zone historique ce qui permet d'attribuer à l'*entité* une répartition spécifique des matériaux de toitures. Une nouvelle carte d'*entités* est élaborée par croisement avec la BD-ORTHO pour pouvoir identifier visuellement le matériau de rampant. A l'aide de QGIS nous pouvons aussi mesurer les longueurs des gouttières et des noues sans pouvoir néanmoins identifier leurs matériaux. La Figure 97 montre trois entités différentes. Chaque couleur représente une entité formée par un ensemble de polygones. Chaque polygone est un bâtiment auquel nous associons la surface projetée de sa toiture.

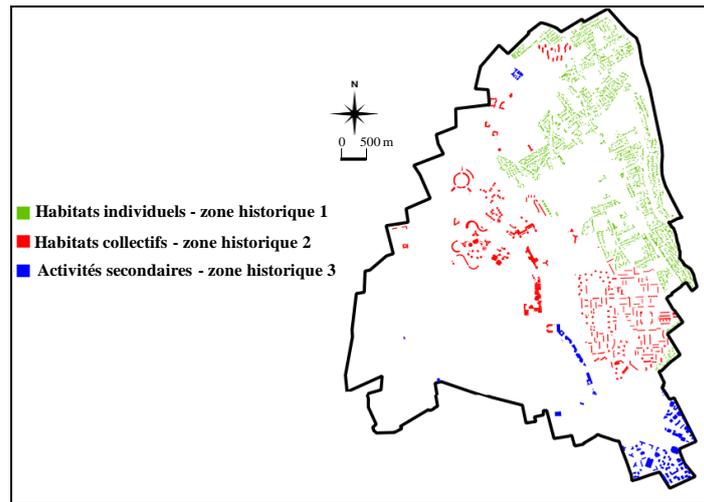


Figure 97 : Exemples de trois entités différentes de la ville de Créteil

Dans la suite nous allons développer une méthode statistique permettant de quantifier en conjonction avec l'interprétation des photos aériennes, pour chaque *entité*, les surfaces projetées des familles des matériaux de rampants et leurs longueurs de gouttières et de noues associées. Notons que, dans la suite de notre exposé, nous remplaçons l'expression « surface projetée » par le terme « surface ».

2. Approche statistique et calcul d'incertitude

Compte tenu de la taille de la ville, un recensement complet des surfaces des familles des matériaux de rampant ainsi que les longueurs de gouttières et des noues est irréalisable et très coûteux. Pour résoudre cette problématique, nous avons recours à la statistique inférentielle qui a pour but d'étendre les propriétés constatées sur un échantillon à la population entière (Saporta, 1990). Il s'agit, donc, d'estimer à partir de la moyenne X_i , de l'écart type σ_i , ou de la proportion p_i d'un échantillon, la moyenne m , l'écart type σ ou la fréquence p d'une population. Ainsi, détermine-t-on la taille que doit avoir un échantillon si l'on désire qu'il fournisse une estimation d'un paramètre de population avec une "précision" définie *a priori*.

Vue l'hétérogénéité de la ville en termes de bâtiments et de leurs caractéristiques (matériau de toit, classe [individuel, collectif, etc.]...), nous avons choisi de développer une méthode statistique basée sur *une technique d'échantillonnage aléatoire stratifié* (assurant l'équiprobabilité entre les différents individus tirés) utilisée en conjonction avec l'interprétation des photos aériennes des différentes parties du toit (famille de matériaux de rampant, longueurs de gouttière et de noue). En effet, il est préférable de diviser la ville en

strates homogènes distinctes, cette opération permet de réduire la variance des estimations, ce qui conduit à des résultats plus précis (Nowak *et al.*, 2003). Ainsi, l'échantillonnage aléatoire stratifié assure l'extrapolation des résultats à l'échelle de la ville et il est adapté à une population hétérogène.

Dans notre cas d'étude, les strates sont les *entités*.

Le but de cette section est de répondre à la question suivante (cf. Figure 98) « *Quelle est la taille minimale de l'échantillon (n_m) à tirer d'une entité d'une taille donnée (N) pour qu'il soit représentatif en termes de répartition des familles des matériaux de rampant, des longueurs de gouttières et des noues ?* ».

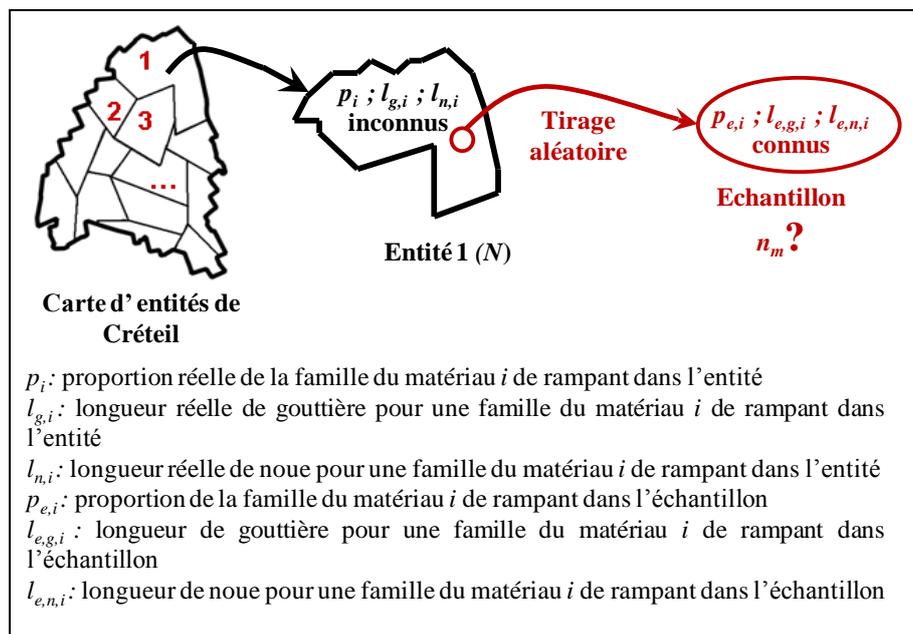


Figure 98 : Stratégie d'estimation des caractéristiques d'une entité

Deux approches ont été testées. La première a été basée sur un tirage de surfaces unitaires de 1 m² en considérant que la taille de l'entité est la surface totale de ses toitures (Sellami-Kaaniche *et al.* 2013a), mais cette approche s'est avérée non optimale car ce type de tirage touche un grand nombre de bâtiments. La deuxième approche retenue est basée sur un tirage de bâtiments en considérant que la taille de l'entité est le nombre total de ses bâtiments.

2.1. Première approche statistique

Le premier raisonnement que nous avons effectué est de considérer la population du travail comme l'ensemble des m² de la surface totale des toitures de la population étudiée. Donc, un

premier travail a été basé sur un tirage aléatoire simple *d'individus de 1 m²* des toitures de la *population considérée*. Dans ce travail, nous avons cherché à trouver une taille unique d'échantillonnage pour toutes les *entités* à étudier. Les résultats de cette méthode montrent qu'il suffit de tirer aléatoirement un échantillon représentant 4% de la surface totale des toitures de l'*entité* considérée pour évaluer la répartition des familles des matériaux de rampant ainsi que les longueurs de gouttières et des noues. Cette méthode a été validée dans un travail précédent (Sellami-Kaaniche *et al.*, 2013a) et a montré que l'erreur absolue générée ne dépasse pas les 2% sur la répartition de toutes les familles des matériaux de toiture.

Toutefois, opérationnellement, cette méthode n'est pas optimale. En effet, le tirage aléatoire des 1 m² des toitures de l'*entité* a tendance à toucher de nombreux bâtiments différents, en d'autres termes nous sommes obligés de renseigner les caractéristiques d'une grande partie des toitures de l'*entité* (environ 85%). Or, le but de la méthode statistique est de travailler sur un nombre limité de bâtiments mais qui reste représentatif.

Pour cela, nous avons effectué d'autres tests en changeant la taille de l'unité du tirage au lieu de 1m² nous avons testé un tirage de 10m², de 50m² de 100m²...Mais nous avons remarqué que cette unité du tirage varie en fonction du type de bâtiments (maison individuelle, bâtiment industriels...). Par exemple, pour les maisons l'unité optimale correspond à 10 m² alors que pour les bâtiments industriels elle peut atteindre 100 m². Ainsi, aucune conclusion généralisable et donc utilisable opérationnellement n'a pu être tirée.

2.2. Approche statistique retenue

Nous avons par la suite changé le principe de raisonnement en considérant comme *population les bâtiments eux-mêmes*. En effet, le tirage aléatoire assure qu'un bâtiment donné (peu importe sa surface) a la même probabilité qu'un autre d'appartenir à l'échantillon. Ainsi, au contraire de la première approche statistique, nous ne cherchons plus à avoir une unité unique de tirage (1m², 10m²...) mais à trouver une relation entre la taille de l'*entité* et la taille de l'échantillon à tirer. En d'autres termes nous allons effectuer une étude de sensibilité de la taille de l'échantillon à tirer (en nombre de bâtiments) en fonction de la taille de l'*entité* (nombre totale de bâtiments).

La méthode développée comprend deux étapes. La première étape repose sur la théorie *de l'échantillonnage* qui a pour but de définir la bonne taille de l'échantillon à prendre, de sorte que celui-ci soit représentatif de l'*entité* à étudier. Cette étape suppose de prendre une

population de toitures dont les caractéristiques sont connues (appelée « vérité terrain »). A partir de cette population connue nous allons déterminer les caractéristiques de l'échantillon à tirer. La deuxième étape a pour but de *valider* la méthode d'échantillonnage à partir de l'application de la *théorie de l'estimation* en estimant les caractéristiques de deux autres populations de toitures connues et la comparaison des résultats de l'estimation avec les caractéristiques réelles de ces deux populations.

Notons que dans la ville de Créteil nous n'avons aucune information complète sur les caractéristiques des toitures d'une *entité* donnée. Nous disposons uniquement de la surface projetée des toitures définies à partir de la base de données existante, la BD-TOPO. Alors, pour développer notre méthode statistique, nous avons renseigné une partie des toitures de trois *entités* différentes :

- *entité 1* : « classe habitat individuel dans la zone historique 1 » ;
- *entité 2* : « classe habitat collectif dans la zone historique 2 » ;
- *entité 3* : « classe activité secondaire dans la zone historique 2 ».

Le choix des classes de bâtiments : habitats individuels, habitats collectifs et activités secondaires vient du fait qu'elles représentent les classes les plus importantes dans la ville de Créteil. Ces trois vérités terrains seront considérées comme des populations réelles homogènes de toitures en termes de classes de bâtiments et de localisation historique. Nous appellerons par la suite *population 1*, *population 2* et *population 3* les toitures renseignées (en termes de surfaces de toitures, proportions des familles des matériaux de rampant, longueurs de gouttières et de noues) dans chaque population¹⁰³.

Dans un premier temps, le développement de la méthode et sa validation sont menés à travers la quantification des familles de matériaux de rampant. Il s'agit de déterminer la taille minimale d'échantillonnage (nombre de bâtiments) pour chaque taille d'*entité* en se fixant une incertitude. Ainsi, le résultat de ce travail se traduit par un abaque des courbes reliant la taille de l'*entité* et la proportion de bâtiments (nombre de bâtiments tiré sur le nombre total de bâtiments dans l'entité) à tirer pour différentes erreurs absolues sur la distribution des familles des matériaux de rampant (2%, 4%, 8%, 12% et 16%). Cette méthode est développée à partir de la *population 1* et elle est validée pour les *populations 2 et 3*.

Dans un deuxième temps, cette méthode sera appliquée et validée à travers l'estimation des longueurs des gouttières et des noues. L'objectif est de montrer que quelque soit la

¹⁰³ La création des vérités terrain est utilisée dans ce chapitre pour développer et valider la méthode statistique. Le but sera d'appliquer la méthode directement dans d'autres villes sans avoir besoin de reprendre la démarche effectuée dans la ville de Créteil.

caractéristique du bâtiment recherchée (surface de matériau, longueur noue...), notre méthode est valide.

2.3. Développement et validation de la méthode statistique à travers la quantification des familles des matériaux de rampant

Nous avons développé la méthode par rapport à la répartition des familles de matériaux de rampant. Ensuite, pour les longueurs de gouttières et des noues nous avons effectué des estimations qui seront validées en se basant sur les données réelles de la vérité terrain.

2.3.1. Principe de la saisie des familles des matériaux de rampant

L'identification des familles des matériaux de rampant est effectuée à l'aide de l'outil QGIS. En fait, en croisant la BD-TOPO et la BD-ORTHO nous obtenons d'une part les surfaces projetées des toitures pour chaque population et d'autre part nous renseignons visuellement la famille du matériau de rampant.

La qualité de l'ortho-photo disponible est limitée. Certaines familles de matériaux sont non indentifiables visuellement. Pour résoudre ce problème nous avons recours à d'autres sources d'images aériennes accessibles sur internet notamment sur le site Mappy qui offre une résolution plus fine et permet une meilleure détermination visuelle des familles de matériaux. L'identification visuelle directe reste néanmoins parfois difficile malgré l'utilisation des photos de Mappy. Nous avons donc utilisé Street View pour observer les bâtiments sous des angles différents et de plus près avec une vue du sol (cf. Figure 99).



Figure 99 : (a) Prise d'image à partir de la BD-ORTHO ; (b) Une prise d'image à partir de Mappy; (c)Prise de vue à partir de Street View

La Figure 99.a est une prise d'image à partir de la BD-Ortho, l'identification visuelle du matériau de toiture de la maison M est très difficile. A partir de Mappy (Figure 99.b) l'image

est plus claire est donc une première estimation du matériau de la toiture est l'ardoise qui sera confirmée par Street View (cf. Figure 99.b).

2.3.2. Création de populations fictives ayant des nombres différents de bâtiments

La *population 1* (vérité terrain issue de la classe d'habitat individuel dans la zone historique 1), ayant 75 bâtiments, choisie pour développer la méthode est caractérisée par la distribution des familles de matériaux de rampant décrite dans le [Tableau 36](#).

Tableau 36 : Répartition des familles des matériaux de rampant pour la population 1

| Famille de matériau i | Surface (m ²) | Proportion p_i (%) |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------|
| Tuile claire ¹⁰⁴ | 2107 | 33,68 |
| Tuile sombre | 1229 | 19,64 |
| Ardoise | 890 | 14,22 |
| Zinc | 834 | 13,33 |
| Terrasse | 983 | 15,72 |
| Acier | 117 | 1,86 |
| Matériau autre | 98 | 1,56 |
| Totale | 6257 | 100 |

Pour trouver la bonne taille de tirage pour une *entité* donnée ayant un nombre défini de bâtiments, nous avons créé plusieurs populations P_j virtuelles avec un nombre de bâtiments N_j différents à partir de la population 1 et en gardant la même distribution de famille de matériaux de rampant en % de surface totale des toitures. Il s'agit de tirer aléatoirement avec remise N_j bâtiments de la population 1. Ensuite, nous attribuons le matériau « Tuile claire » aux premiers bâtiments de sorte à ce que la somme de leur surface représente 33,68% de la surface totale des toitures de N_j . Nous attribuons le matériau « Tuile sombre » au deuxième ensemble de bâtiments de sorte que la somme de leur surface représente 19,64% de la surface totale des toitures de N_j . La même opération est effectuée pour les autres familles de matériaux.

Les tailles de l'échantillonnage seront calculées sur chaque population ($N_j \in [100, 300, 500, 700, 1000, 1500, 1800, 2300, 2500]$) (cf. [Tableau 37](#)).

¹⁰⁴ La différenciation entre tuile claire et tuile sombre vient du fait que la méthode a été comparée avec une méthode de traitement d'image qui différencie entre les deux tuiles par leurs couleurs. Cette méthode sera décrite dans le Chapitre 3.3.

Tableau 37 : Les différentes populations étudiées

| Population P_j | Nombre de bâtiments | Surface totale (m ²) |
|------------------|---------------------|----------------------------------|
| 1.1 | 100 | 14655 |
| 1.2 | 300 | 40121 |
| 1.3 | 500 | 65332 |
| 1.4 | 700 | 98361 |
| 1.5 | 1000 | 150780 |
| 1.6 | 1500 | 183073 |
| 1.7 | 1800 | 252251 |
| 1.8 | 2300 | 318887 |
| 1.9 | 2500 | 346359 |

2.3.3. Echantillonnage - Simulation de Monte Carlo

Pour étudier l'impact de l'échantillonnage (estimation des incertitudes) sur la répartition des familles des matériaux de rampants dans chaque population P_j (ayant N_j comme nombre de bâtiments) nous avons utilisé la simulation de Monte-Carlo (cf. Annexe 14). Pour qu'un échantillon soit *représentatif* de la population, il faut que chaque élément de la population ait les mêmes chances d'appartenir à cet échantillon. Le mode de tirage le plus simple et le plus important est *l'échantillonnage aléatoire simple* correspondant à des tirages équiprobables et indépendants de bâtiments.

Notons que notre objectif est de déterminer la distribution des surfaces de rampant par familles des matériaux à partir d'un échantillon de bâtiments. Le découpage de la ville en entités homogènes en termes de classe de bâtiments localisée historiquement, permet d'obtenir des bâtiments de surfaces relativement homogènes. Pour la population 1, d'après la Figure 100, 60% des bâtiments ont une surface comprise entre 50 et 100 m², que seuls 5% de bâtiments se démarquent par des surfaces nettement plus importantes (> 150 m²) et que moins de 5% de bâtiments ont une surface très petite (moins de 20 m²).

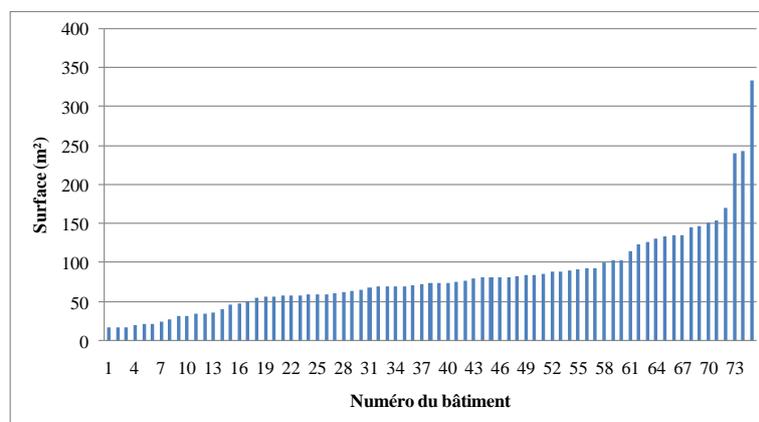


Figure 100 : Distribution des surfaces des bâtiments de la population 1 (75 bâtiments)

Compte tenu de cette relative homogénéité, nous faisons l’hypothèse que le tirage par bâtiments n’affecte pas l’évaluation de la distribution des surfaces des familles des matériaux de rampant. Dans ce cas, les répartitions des familles de matériaux de rampant deviennent des variables aléatoires suivant une loi de probabilité que nous devons estimer (Saporta, 1990). Chaque échantillon est caractérisé par une valeur de la proportion $p_{e,i}$ (%) (Proportion surfacique de la famille de matériaux i dans l’échantillon e tiré de la population P_j). Nous devons estimer la distribution de probabilité de la proportion $p_{j,i}$ (proportion surfacique de la famille de matériaux i dans la population P_j) à partir de la valeur obtenue dans chaque échantillon tiré.

A chaque population correspond une base de données de ses bâtiments représentés par leurs surfaces de toiture (S_b (m²)) et leurs familles de matériaux de toit (cf. Tableau 38). Le tirage d’échantillon est effectué à partir du Tableau 38.

Tableau 38 : Base de données pour une population P_j

| | Bâtiment | Surface du toit S_b (m ²) | Famille de matériaux i |
|----------|----------|--|-----------------------------|
| T | 1 | $S_1=100$ | Tuile |
| | 2 | $S_2=40$ | Ardoise |
| | ... | ... | ... |
| | N_j | S_{N_j} | |

Pour une population P_j , nous tirons aléatoirement sans remise¹⁰⁵ plusieurs échantillons de bâtiments de taille n : $n = E(\%N_j)$ (partie entière du pourcentage du nombre total des bâtiments N_j à tirer de la population P_j).

Il s’agit de tirer sans remise n fois une variable aléatoire entière r entre 1 et N_j . Nous obtenons alors un vecteur V d’indices qui contient les n valeurs de r . Dans le tableau T , nous cherchons pour chaque valeur de r , la surface et la famille des matériaux de rampant correspondants au bâtiment associé à cette valeur r . Nous allons créer alors un troisième tableau T_r (cf. Tableau 39).

¹⁰⁵ Le tirage sans remise est le tirage toujours utilisé en pratique surtout dans les travaux d’enquêtes (Statistique Canada, 2010).

Tableau 39 : Données obtenues pour un échantillon de taille n pour un seul tirage

| r | Bâtiment | Surface du toit S_b (m ²) | Famille de matériaux i |
|-----|----------|--|--------------------------|
| | r=2 | 400 | Tuile claire |
| | ... | ... | ... |
| | r=31 | 530 | Tuile claire |
| | r=50 | 150 | Tuile sombre |
| | ... | ... | ... |
| | r=46 | 240 | Tuile sombre |
| | r=3 | 387 | Ardoise |
| | ... | ... | ... |
| | $r=n$ | S_n | |

De ce tableau, nous déterminerons la répartition surfacique des familles de matériaux de rampant dans l'échantillon (cf. Tableau 40).

Tableau 40 : Données pour un échantillon de taille n pour un seul tirage

| Famille de matériaux i | Surface (m ²) | Proportion $p_{e,i}$ (%) |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Tuile claire | 400 | $\frac{400}{S_n} \times 100$ |
| Tuile sombre | 150 | $\frac{150}{S_n} \times 100$ |
| Ardoise | ... | ... |
| Zinc | ... | ... |
| Terrasse | ... | ... |
| Acier | ... | ... |
| Matériau autre | ... | ... |
| Total | S_n | 100 |

Ce processus de simulation est répété k fois pour chaque valeur de n (le nombre k sera défini dans le paragraphe suivant).

Ensuite, pour chaque échantillon de taille n simulé k fois, les statistiques recherchées sont calculées (proportion moyenne de la famille de matériaux i et l'intervalle de confiance à 95% calculé en utilisant le critère décrit dans ISO/IEC (2008) (cf. Tableau 41)).

Enfin, nous avons déterminé la taille minimale d'échantillonnage $n_{min,j}$ adéquate pour toutes les familles des matériaux dans une population P_j en fixant une erreur absolue maximale admissible sur l'ensemble des $p_{e,j}$ (proportions des matériaux dans les échantillons tirés des différentes populations P_j).

Tableau 41 : Base de données pour un échantillon de taille n tiré k fois dans une population P_j

| Tirages Famille matériau i | Tirage 1 | Tirage 2 | ... | Tirage k | Proportion $p_{e,i}$ (moyenne sur k tirages) | Intervalle de confiance |
|--|-----------------|-----------------|------------|------------------------------|---|--------------------------------|
| Tuile claire | 33% | 32.5% | ... | ... | $p_{e,1}$ | IC ₁ |
| Tuile sombre | 17.9% | 19.5% | ... | ... | $p_{e,2}$ | IC ₂ |
| Ardoise | ... | ... | ... | ... | ... | IC ₃ |
| Zinc | ... | ... | ... | ... | ... | IC ₄ |
| Terrasse | ... | ... | ... | ... | ... | IC ₅ |
| Acier | ... | ... | ... | ... | ... | IC ₆ |
| Matériau autre | ... | ... | ... | ... | $p_{e,7}$ | IC ₇ |

2.3.4. Choix du nombre de tirage k

Pour déterminer le nombre suffisant de tirages sans remise, nous avons testé des valeurs croissantes de k pour différentes valeurs de n (entre 10% N_j et 100% N_j) tirées de populations de tailles différentes. La [Figure 101](#) présente le résultat obtenu pour un tirage de $n=40\%N_j$ pour deux populations différentes : la plus petite P_{100} ($N_j=100$ bâtiments) et la plus grande P_{2500} ($N_j=2500$ bâtiments). Ainsi, nous remarquons que pour $k=1000$, les résultats statistiques se stabilisent (la variabilité entre les valeurs devient inférieure à 1% pour des tirages supérieur à 1000) quelque soit la valeur de n et pour les deux tailles de populations. Donc, nous avons gardé $k=1000$ tirages. Ce résultat a été validé pour toutes les familles des matériaux de la *population 1* pour les différentes tailles de tirages (10% à 100%). Nous concluons qu'à partir de $k=1000$ le nombre de tirages ne dépend pas de la taille de la population.

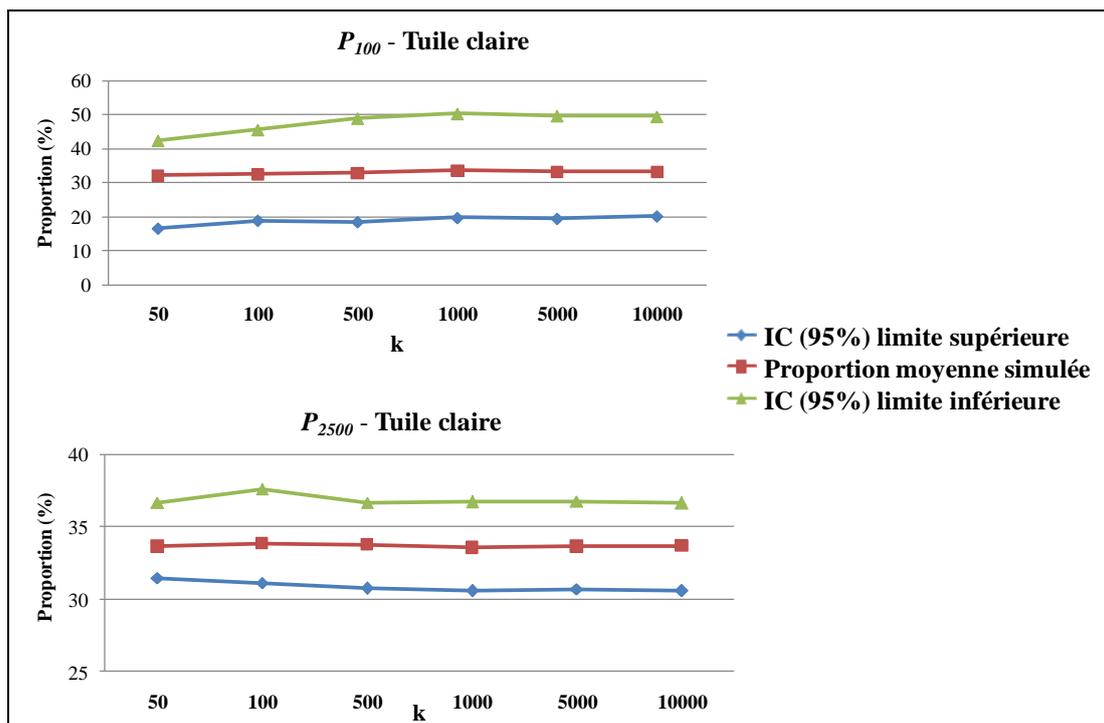


Figure 101 : Variabilité de k – Exemple de la famille « Tuile claire » un tirage de $n=40\%N_j$ des populations P_{100} et P_{2500}

2.3.5. Analyse des résultats des simulations d'échantillonnages

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats des simulations d'échantillonnage sans remise dans le cas d'une population P_{500} formée de 500 bâtiments. Ces résultats sont similaires pour toutes les autres populations P_j étudiées.

Tout d'abord, nous avons vérifié à l'aide du test Shapiro-Wilk (pour un seuil de 5% et pour $n \geq 2$) (Dress, 2007) que la distribution est normale pour chaque proportion de famille de matériau $p_{e,i}$. Cette vérification est obligatoire pour pouvoir appliquer le théorème de proportion dans le [Paragraphe 2.3.7](#). Nous avons tracé les statistiques (moyenne et intervalle de confiance) relatives à chaque famille de matériaux de rampant pour chaque taille d'échantillon n . L'illustration a été effectuée pour la famille des matériaux « Tuile claire » (cf. [Figure 102](#)).

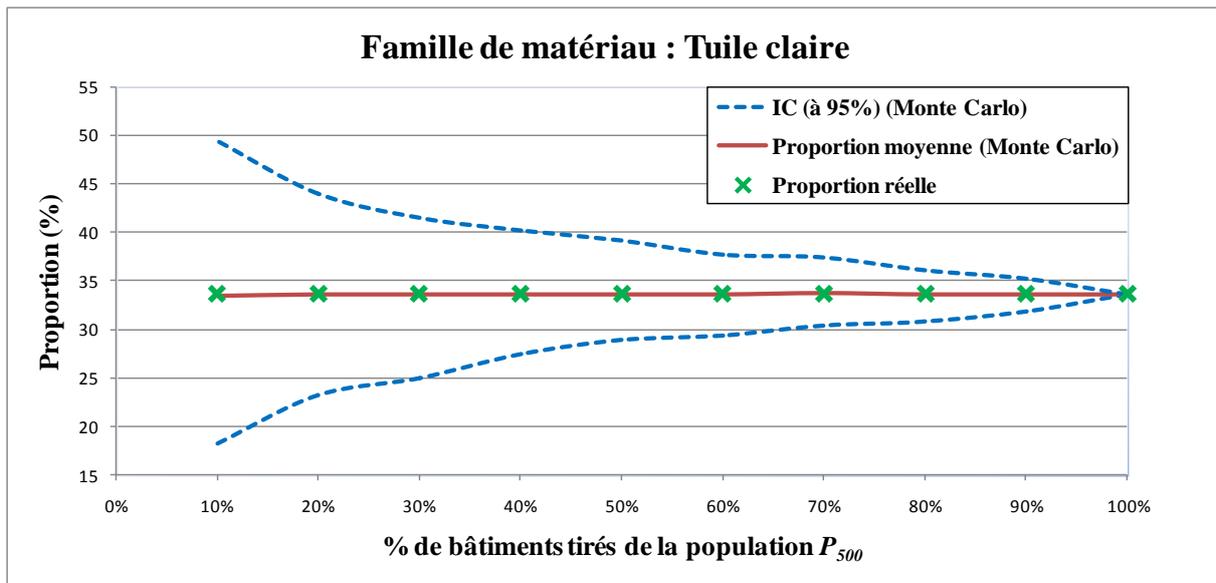


Figure 102 : Exemple de calcul des statistiques pour différentes tailles d'échantillon pour la famille des matériaux « Tuile claire » dans une population de 500 bâtiments

La Figure 102 montre que la proportion moyenne simulée sur 1000 tirages sans remise pour chaque taille d'échantillon est stable. Cette moyenne coïncide avec la proportion réelle de la famille de matériaux « Tuile claire » dans la population P_{500} . Ceci valide d'une part notre choix du nombre de tirages $k=1000$ et d'autre part, la simulation effectuée représente bien la réalité du terrain. Les intervalles de confiance, ainsi déterminés, nous permettent d'évaluer l'incertitude sur l'estimation de la proportion de la famille de matériau i (dans la Figure 102 c'est la « Tuile claire ») en fonction de la taille n de l'échantillon tiré.

Les intervalles de confiance sont larges et asymétriques pour les petites tailles d'échantillonnage. Ainsi, pour la « Tuile claire », tirer 10% de P_j entraîne une erreur absolue d'environ 16%. Les intervalles de confiance tendent à diminuer et se centrer autour de la moyenne avec l'augmentation de n . Nous remarquons (cf. Figure 102) dans le cadre d'un tirage sans remise, que la largeur de l'intervalle de confiance diminue jusqu'à atteindre 0 pour $n=N_{500}$ c'est-à-dire un tirage de la totalité des bâtiments de la population P_{500} . Ces résultats sont validés pour les autres familles de matériaux (Ardoise, Zinc, Acier, Autre et Terrasse).

2.3.6. Choix de la taille minimale d'échantillonnage

L'objectif de ce paragraphe est de déterminer pour une population P_j ayant un nombre de bâtiments N_j , la taille minimale $n_{min,j}$ (adéquate pour toutes les familles des matériaux) de l'échantillon de bâtiments à tirer pour qu'il soit représentatif de la population étudiée.

Le calcul de l'intervalle de confiance pour différentes familles de matériaux montre des valeurs très différentes pour les matériaux en fonction de la proportion réelle de ces matériaux dans la population. Nous avons en effet remarqué que l'erreur relative varie en fonction de la proportion de la famille de matériau. Par exemple, pour la famille acier qui représente 1,86% de la surface des toitures, l'erreur relative peut atteindre 171% (pour un échantillon représentant 10% de la population), mais cette erreur de 171% pour une proportion de 1,86% représente une erreur absolue de seulement 3,18%. Cette étape permettra d'harmoniser les résultats pour toutes les familles de matériaux.

C'est pourquoi nous avons décidé, de fixer une erreur absolue E_a maximale admissible pour l'ensemble des matériaux, puis de déterminer la taille minimale d'échantillon $n_{min,j}$ permettant de respecter ce critère. E_a correspond à la demi-largeur¹⁰⁶ de l'intervalle de confiance de la proportion obtenu pour un échantillonnage de taille n .

Ainsi, pour chaque population P_j , nous avons effectué la simulation décrite précédemment. Il s'agit de tirer 1000 fois différentes tailles n d'échantillonnage. Sur chaque échantillon nous calculons les intervalles de confiance sur les proportions estimées, pour toutes les familles des matériaux, suivi d'un calcul de l'erreur absolue E_a . Les résultats de ce travail sont illustrés pour la population P_{500} (cf. Figure 103).

La Figure 103 montre l'évolution de l'erreur absolue en fonction de la taille d'échantillon pour les différentes familles de matériaux de rampants. L'analyse de la forme des différentes courbes tracées dans cette figure, montre que les variations de l'erreur absolue E_a sont très importantes pour des échantillons de taille inférieure à 30%. Plus la taille de l'échantillon est grande plus l'erreur absolue diminue. Nous remarquons aussi que l'erreur absolue est très faible pour les familles « Acier » et « MatériauAutre » : ceci est dû à leurs proportions réelles dans la population qui est faible et ne dépasse pas 2% (cf. Tableau 36). L'influence de la taille de l'échantillonnage se pose plus pour la famille « Tuile claire » qui représente 33,68% de la population réelle.

¹⁰⁶ Pour les familles des matériaux représentant moins de 2% de la surface de la population, les intervalles de confiance sont asymétriques : la limite inférieure atteint 0. Dans ce cas nous attribuons à E_a la valeur de la limite supérieure de l'intervalle de confiance.

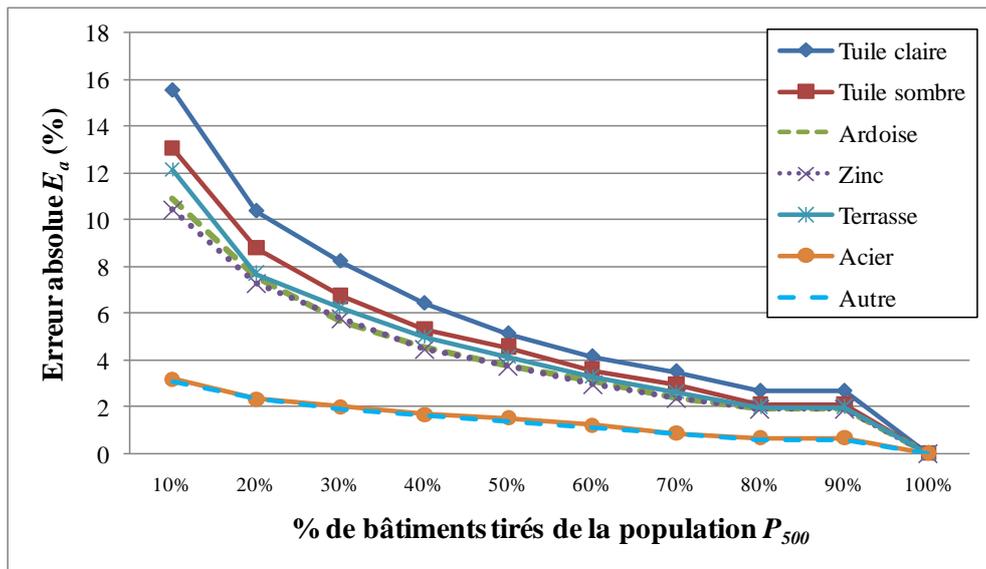


Figure 103 : Exemple de calcul des erreurs absolues sur les proportions des familles des matériaux de rampant pour différentes tailles d'échantillon dans une population de 500 bâtiments

Donc, pour assurer une bonne estimation de la répartition des familles de matériaux de toiture, il faut avoir un compromis entre la taille de l'échantillonnage et l'erreur absolue pour toutes les familles des matériaux. Par exemple, si nous voulons une erreur absolue de 4% sur toutes les proportions des familles de matériaux de rampant, il faut tirer environ 60% des bâtiments de la population.

Nous avons effectué ce même travail de simulations pour d'autres populations ($N_j \in [100, 300, 500, 700, 1000, 1500, 1800, 2300, 2500]$). Le but est d'étudier l'influence de la taille de la population sur la taille d'échantillonnage. Ainsi, nous avons tracé la taille d'échantillonnage en fonction de la taille de la population pour différentes valeurs d'erreur absolue. La taille d'échantillon minimale $n_{min,j}$ est choisie telle que l'erreur absolue E_a est vérifiée pour toutes les familles des matériaux. Sur la Figure 103, le choix est conditionné par la famille « Tuile claire » qui présente les plus grandes erreurs absolues. Ainsi, nous avons choisi $E_a \in [2\%, 4\%, 8\%, 12\%, 16\%]$.

La Figure 104 montre des courbes décroissantes de la taille de l'échantillonnage en fonction de la taille de la population pour toutes les erreurs absolues fixées. L'analyse de la forme de ces courbes montre un changement rapide de pente qui devient plus faible à partir d'une population ayant 750 bâtiments. Ainsi, nous définissons une zone critique Z englobant les populations de taille inférieure à 750 bâtiments. Dans cette zone, plus la taille de la population est petite plus la taille de l'échantillonnage (en % de la population) est grande pour les différentes valeurs d'erreurs absolues. A partir d'une population de 750 bâtiments et plus, la

taille minimale d'échantillonnage diminue progressivement avec la taille de la population. Par exemple, pour assurer une erreur absolue de 4% il suffit de tirer 13% du nombre total d'une population de 2500 bâtiments soit donc 325 bâtiments.

Les différentes courbes sont approximées par des courbes de tendance suivant une loi de puissance. C'est à partir de ces courbes de tendance que le choix des tailles d'échantillonnage sera effectué pour l'estimation des distributions des familles des matériaux de rampant. Chaque courbe a une équation reliant la taille de la population et la taille de l'échantillon (cf. Figure 104). Notons que ces courbes sont décalées par rapport aux courbes originales correspondantes. Ce décalage est surtout marqué pour les courbes correspondants aux erreurs absolues de 2% et 4% et dans la zone Z.

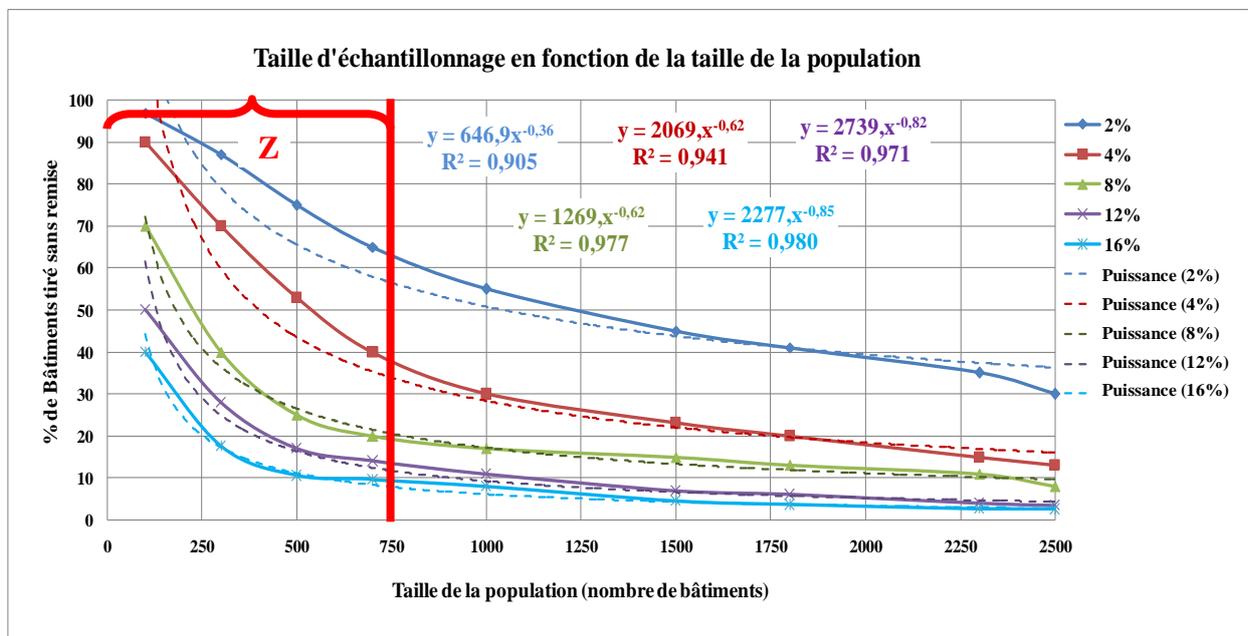


Figure 104 : Evaluation des tailles d'échantillonnage en fonction de la taille de la population pour différentes erreurs absolues

Il est à noter que pour des populations ayant un nombre de bâtiments supérieur à 1800, les courbes de tendances surestiment les courbes originales ce qui assure de meilleurs résultats d'estimation des proportions des familles des matériaux de rampant pour ces populations.

Pratiquement, si nous voulons choisir une taille d'échantillonnage pour une population donnée, nous devons, tout d'abord, identifier la taille de cette population et se fixer une erreur absolue. Le choix de la taille d'échantillonnage est un compromis entre le coût et l'exigence qu'on accorde aux résultats. En effet, d'après la Figure 104, les courbes d'erreur absolue de 2% et 4% sont très coûteuses pour le calcul dans des populations de la zone Z. En fait, la taille

d'échantillonnage dépasse les 40% du nombre total des bâtiments de la population. Pour les autres courbes, elles forment un paquet par rapport à celle de 2% et 4%. Dans cette zone Z, nous pouvons donc choisir les tailles d'échantillonnages correspondant à l'erreur absolue de 8% pour ne pas être très exigeant en prenant celles de 4%. Pour les populations en dehors de la zone Z, le choix de la taille d'échantillonnage dépendra du cas d'étude et de l'exigence accordée.

Notons que l'application de la méthode dans le cas de Créteil nous permettra d'avoir une meilleure vision de l'influence de l'échantillonnage sur le calcul d'incertitude sur le flux globale du zinc. Il s'agit d'effectuer un calcul à partir de la courbe la moins exigeante ($E_a=16\%$) pour évaluer l'incertitude maximale assurée. L'application de la méthode est la même si nous prenons une exigence plus forte ce qui va prendre un temps de calcul plus lent. Or, dans le cas de cette thèse, l'objectif est d'élaborer et de concrétiser la méthode de quantification des matériaux des éléments de toiture.

Enfin, nous avons décidé de tracer les courbes reliant la taille de la population en fonction du nombre de bâtiments à tirer sans remise pour différentes valeurs d'erreur absolue (cf. [Figure 105](#)). Ces courbes sont tracées à partir des équations des courbes de tendances de la [Figure 104](#).

La courbe à 2% est une courbe très coûteuse pour l'échantillonnage de bâtiments à grande échelle. Ainsi, en pratique nous pourrions écarter cette courbe. Pour les autres courbes (4%, 8%, 12% et 16%), l'évolution du nombre de bâtiments en fonction de la taille de la population est très lente. Par exemple, pour assurer une erreur absolue de 4%, il faut tirer 218 bâtiments d'une population de 500 bâtiments contre 283 bâtiments pour une population de 1000 bâtiments. Ceci montre que la méthode statistique devient moins coûteuse pour des populations ayant un nombre très important de bâtiments.

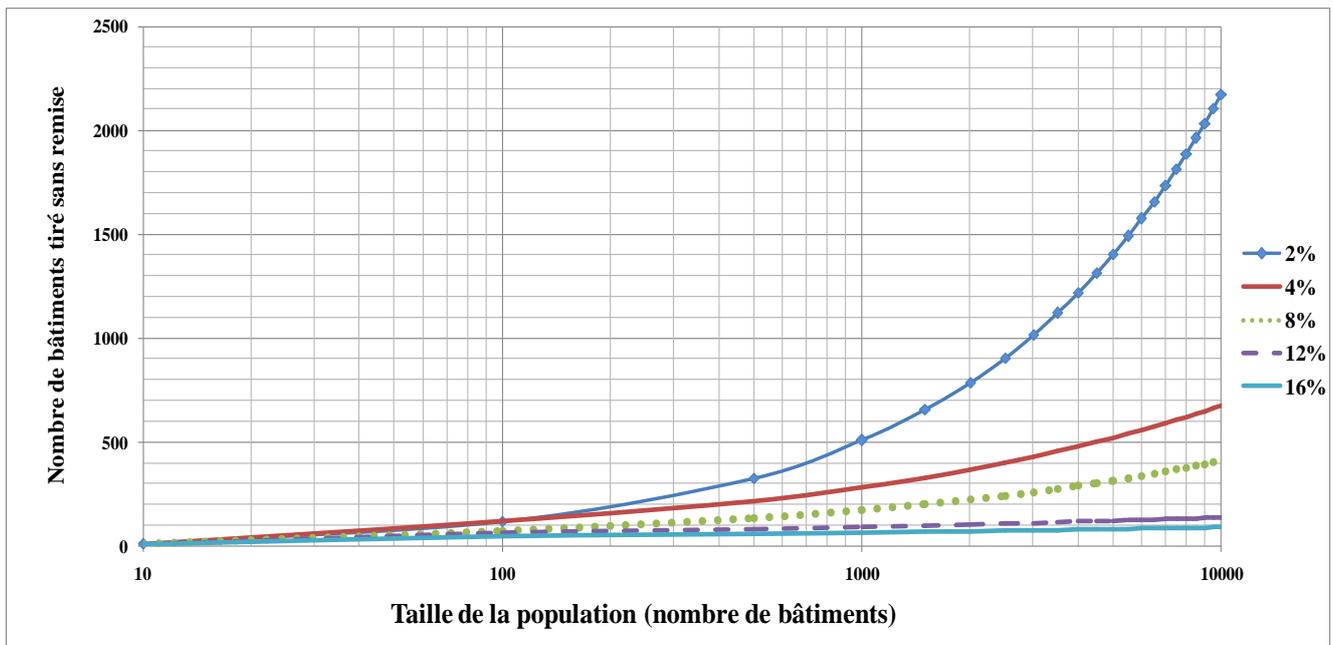


Figure 105 : Nombre de bâtiments à tirer sans remise en fonction de la taille de la population pour différentes erreurs absolues

2.3.7. Validation de la méthode d'échantillonnage à travers l'application de la théorie d'estimation

a. Théorie d'estimation

La théorie d'estimation permet de répondre à la problématique suivante « *comment, à partir des proportions $p_{e,i}$ calculées sur un échantillon, retrouver ou plutôt estimer celles d'une population entière p_i (%) ?* » (cf. Figure 98).

Pour répondre à cette problématique nous allons appliquer le Théorème sur les Proportions. Notons que pour appliquer ce théorème au calcul de la répartition des surfaces des familles de matériaux de rampant à partir d'un échantillonnage par bâtiment, nous partons de l'hypothèse définie précédemment que, vue l'homogénéité des surfaces des bâtiments, le tirage par bâtiments n'affecte pas l'évaluation de la distribution des familles des matériaux de rampant en % de la surface totale.

Ainsi, d'après le Théorème sur les Proportions (Statistique Canada, 2010) la distribution des échantillons (de taille $n \geq 30$ et $p_{e,i}$: proportion de la famille de matériaux i dans l'échantillon e) suit approximativement une loi normale.

$$p_{e,i} \rightarrow \mathcal{N}(p_i; \sigma_{p,i})$$

Une estimation ponctuelle de p_i est $p_{e,i}$ et une estimation de l'écart-type est :

$$\sigma_{p,i} = \sqrt{\frac{p_{e,i}(1-p_{e,i})}{n}}$$

Théoriquement ce théorème est appliqué pour un tirage aléatoire avec remise. En pratique le tirage aléatoire sans remise est utilisé (notre cas d'étude). Pour appliquer ce théorème, il suffit de rajouter un facteur d'exhaustivité $(1 - \frac{n}{N_j})$ (avec N_j taille de la population P_j) pour compenser le fait d'utiliser un tirage sans remise (Statistique Canada, 2010) dans le calcul de l'écart type $\sigma_{p,i}$ soit donc :

$$\sigma_{p,i} = \sqrt{\frac{p_{e,i}(1-p_{e,i})}{n} \times (1 - \frac{n}{N_j})}$$

L'intervalle de confiance de cette estimation à 95% :

$$p_i \in [p_{e,i} - 1,96 \cdot \sigma_{p,i}, p_{e,i} + 1,96 \cdot \sigma_{p,i}]$$

b. Validation de l'application du Théorème sur les Proportions

Pour valider la méthode d'échantillonnage nous avons comparé, tout d'abord, les résultats de la simulation de Monte Carlo avec les résultats de l'application du théorème sur les proportions. L'objectif est de montrer que l'application du théorème sur les Proportions pour un seul tirage donne des résultats comparables avec ceux obtenus avec Monte Carlo pour 1000 tirages. Notons que la distribution est normale pour chaque proportion de famille de matériau $p_{e,i}$ vérifiée à l'aide du test Shapiro-Wilk. Ainsi, le théorème sur les proportions peut être appliqué. Nous avons tracé les statistiques (moyenne et intervalle de confiance) relatives à chaque famille de matériaux de rampant pour chaque taille d'échantillon n . Les statistiques sont calculées pour la simulation Monte Carlo et pour l'estimation avec le Théorème sur les proportions. L'illustration a été effectuée pour la famille des matériaux « Tuile claire » (cf. Figure 106).

La Figure 106 montre que la proportion moyenne estimée avec le Théorème sur les proportions coïncide avec celle simulée. De plus, l'intervalle de confiance estimé est un petit peu décalé par rapport à celui simulé pour des tailles d'échantillonnage très faibles : ceci s'explique par le fait que l'application du Théorème se fait à partir d'un seul tirage alors que la simulation est effectuée pour 1000 tirages ainsi du fait que nous avons considéré que les surfaces des bâtiments sont homogènes. Néanmoins, ce décalage reste très faible (3% pour 10% de bâtiments tirés) et de plus les deux intervalles de confiance (simulé et estimé) coïncident progressivement en fonction de la taille de l'échantillonnage. Donc, l'hypothèse que le tirage par bâtiment n'affecte pas l'évaluation des répartitions des familles des matériaux de rampant est validée. Le Théorème sur les Proportions peut être utilisé pour

calculer les répartitions des familles des matériaux de rampant en % de la surface totale à partir d'un échantillonnage par bâtiment.

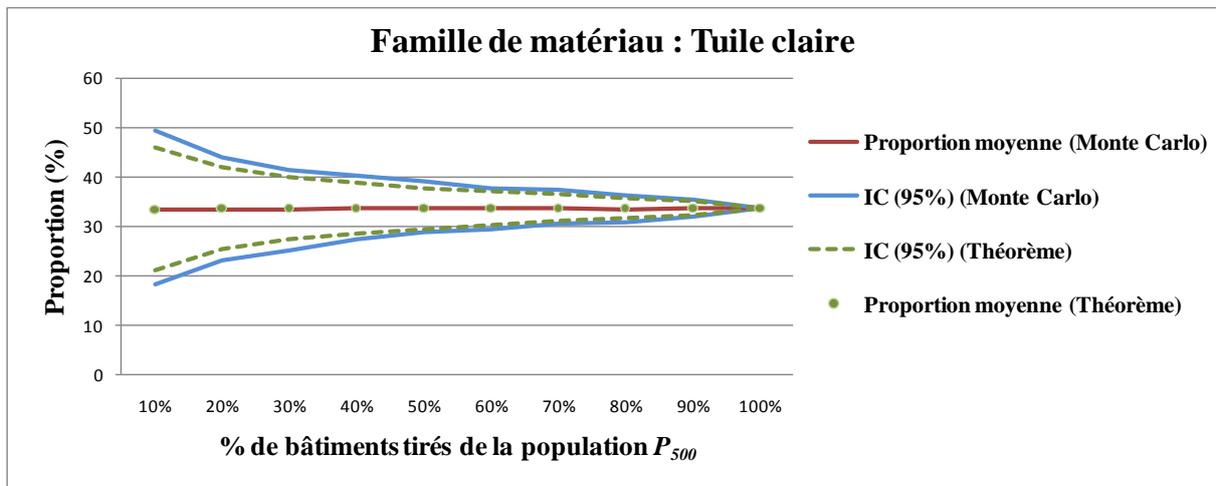


Figure 106 : Comparaison des intervalles de confiance simulés (Monte-Carlo) et estimés (Théorème) pour différentes tailles d'échantillon pour la répartition de la famille des matériaux « Tuile claire » dans une population de 500 bâtiments

c. Validation de la méthode pour d'autres populations différentes

Nous avons pris la *population 2* ayant 700 bâtiments (vérité terrain issue de la classe habitat collectif dans la zone historique 2) et la *population 3* (vérité terrain issue de la classe activité secondaire dans la zone historique 2) ayant 300 bâtiments dont nous connaissons la répartition de leurs familles de matériaux de rampant en % de la surface totale des toitures de la population (cf. Tableau 42).

Tableau 42 : Répartition réelle des familles des matériaux de rampant pour la population 2 et 3

| Famille de matériau i | Proportion p_i (%) | |
|-------------------------|----------------------|--------------|
| | Population 2 | Population 3 |
| Tuile claire | 5,6 | - |
| Tuile sombre | | |
| Ardoise | 1,2 | - |
| Zinc | - | 1,1 |
| Terrasse | 92 | 86,5 |
| Acier | 0,70 | 8,8 |
| Matériau autre | 0,60 | 3,6 |

A partir de l'abaque de la Figure 105 nous définissons, pour chaque population, la taille d'échantillonnage nécessaire pour les différentes erreurs absolues. Ensuite, nous effectuons des tirages sans remise à partir des *populations 2 et 3* des différents échantillons déterminés

(cf. [Tableau 43](#)). Nous calculons à partir du Théorème sur les proportions les intervalles de confiance ainsi que les erreurs absolues sur les proportions des différentes familles des matériaux de rampants pour les différents échantillons. Enfin, nous comparons les erreurs absolues (demi intervalle de confiance demi-IC) estimées par rapport au critère E_a retenu.

Tableau 43 : Taille d'échantillon nécessaire pour assurer différentes valeurs absolues pour les deux populations

| Critère E_a (%) | Taille d'échantillon en % N_j | |
|-------------------|---------------------------------|--------------|
| | Population 2 | Population 3 |
| 2 | 58 | 79 |
| 4 | 35 | 60 |
| 8 | 21 | 36 |
| 12 | 13 | 25 |
| 16 | 9 | 18 |

Nous avons choisi de montrer les résultats pour la population 2 pour l'erreur absolue à 2%, la plus exigeante. Ainsi, d'après le [Tableau 44](#), l'erreur absolue maximale estimée (demi-IC) pour toutes les familles des matériaux de rampant atteint 1,7% ce qui est un bon résultat. Les proportions réelles sont bien dans les intervalles de confiance calculés. Ainsi, la méthode est bien validée pour son application à la population 2 pour une erreur absolue de 2%.

Tableau 44 : Exemple de calcul des erreurs absolues estimées pour un échantillon assurant une erreur absolue simulée $E_a=2\%$ pour la population 2

| Famille de matériau i | Proportions réelle des familles des matériaux (%) | Proportion dans un échantillon choisi pour Erreur absolue $E_a=2\%$ | demi-IC Intervalle de confiance (\pm) (%) |
|-------------------------|---|---|---|
| Tuile | 5,6 | 6,7 | 1,6 |
| Ardoise | 1,2 | 0,7 | 0,5 |
| Terrasse | 92 | 92,2 | 1,7 |
| Acier | 0,7 | 0,2 | 0,5 |
| Matériau autre | 0,6 | 0,2 | 0,6 |

En regardant le [Tableau 45](#), nous remarquons que les valeurs des erreurs absolues maximales estimées (demi-IC) sont toujours inférieures au critère d'erreur E_a fixé pour les deux populations. Ainsi, l'application du Théorème sur les proportions garantit de meilleurs résultats même pour les petites populations. En fait, nous avons montré dans le [Paragraphe 2.3.6](#) précédent que pour des populations ayant un nombre de bâtiments inférieur à 750 la variabilité de l'incertitude est plus importante que celle pour des populations ayant un grand nombre de bâtiments.

Tableau 45 : Résultats du calcul de la taille d'échantillonnage pour les populations 1 et 2

| Critère E_a (%) | Erreurs absolues estimées (demi-IC) (%) | |
|-------------------|---|--------------|
| | Population 2 | Population 3 |
| 2 | 1,6 | 1,7 |
| 4 | 2 | 2,7 |
| 8 | 2,9 | 4,5 |
| 12 | 3 | 6 |
| 16 | 8,5 | 8 |

2.3.8. Synthèse

La méthode statistique développée pour quantifier la répartition des familles des matériaux de rampant est validée. L'application du Théorème sur les proportions est bien justifiée pour le calcul des répartitions des familles des matériaux de rampant en % de la surface totale à partir d'un échantillonnage par bâtiment sous conditions d'homogénéité de la population.

Donc, pour une population homogène de bâtiments, dans notre cas d'étude une *entité*, il s'agit de choisir une taille d'échantillonnage à partir des courbes de tendance de la [Figure 104](#). Ensuite, il s'agit d'appliquer le Théorème sur les proportions pour estimer la répartition des familles des matériaux de rampant et calculer les intervalles de confiances associés.

2.4. Quantification des longueurs de gouttières et de noues

La quantification des longueurs de gouttières et de noues concerne uniquement les toitures inclinées, en effet, les toitures-terrasses ne présentent ni noues ni gouttières. Les noues sont identifiées uniquement pour les matériaux non métalliques (tuile et ardoise) car pour les toitures métalliques les noues font partie du rampant ([cf. Chapitre 2.4](#)).

Pour quantifier les longueurs de gouttières et de nous, nous allons partir de la méthode développée pour la quantification des familles des matériaux de rampants décrite précédemment. Nous partons de l'hypothèse que l'échantillonnage par bâtiment n'affecte pas l'évaluation des longueurs de gouttières et de noues. Il s'agit de montrer que la méthode d'échantillonnage de bâtiments permet aussi d'estimer les longueurs de gouttières et de noues. En d'autres termes, la famille de matériaux de rampant, la longueur de gouttière et la longueur de noue sont des caractéristiques de la toiture d'un bâtiment donné et l'échantillonnage par bâtiment assure la bonne estimation de ces caractéristiques pour une *entité* inconnue mais surtout homogène.

Nous allons reprendre les trois populations, la *population 1* ($N_1=500$ bâtiments), la *population 2* ($N_2=700$ bâtiments) et la *population 3* ($N_3=300$ bâtiments) étudiées précédemment, Rappelons que chaque population est une vérité terrain dont nous connaissons la répartition de ses familles de matériaux de rampant ainsi que les longueurs de gouttières et de noues associées à chaque bâtiment.

2.4.1. Mesure des longueurs projetées de gouttières et de noues par bâtiment

Les éléments linéaires (longueur projetée des noues et gouttières) ont été mesurés à l'aide de QGIS pour chaque bâtiment. Pour ce fait, une première étape nécessaire est d'effectuer une étude de formes des toitures (cf. Figure 107). Il s'agit de déterminer les formes des toitures à partir desquelles nous essayons d'identifier pour chaque forme les dispositions de la noue et de la gouttière. Ce type d'approche a été utilisé dans le cas d'études de l'effet de la conception des toitures sur le vent (Thiis et Gjessing 1999).

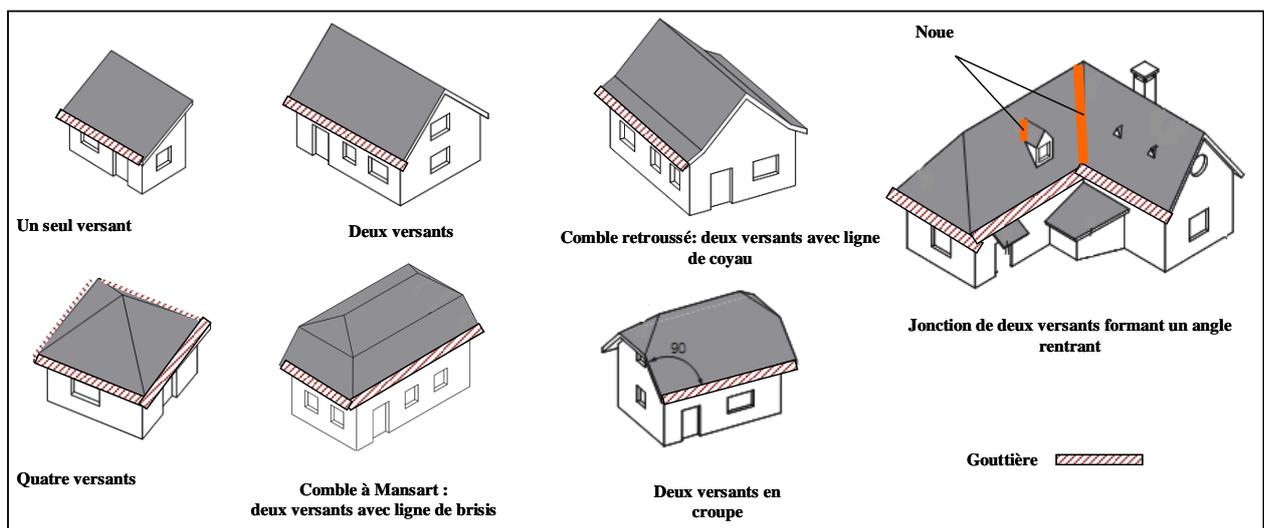


Figure 107 : Localisation des gouttières et des noues pour les différentes formes de toitures

Pour chaque bâtiment de la population nous identifions la forme de sa toiture à partir d'une photo aérienne (qui associé à la BD-TOPO donne la surface projeté du bâtiment) et Google-earth (Street View) (cf. Figure 107). En repérant un bâtiment et en identifiant la forme de sa toiture, nous pourrions mesurer la longueur de la gouttière et de la noue avec l'outil QGIS. La Figure 108 présente une image aérienne d'un toit présentant des gouttières, un chien-assis et des noues, Nous notons que la fenêtre de toit de type « chien-assis » apporte deux noues et donc une utilisation de matériaux métalliques pour assurer l'étanchéité.

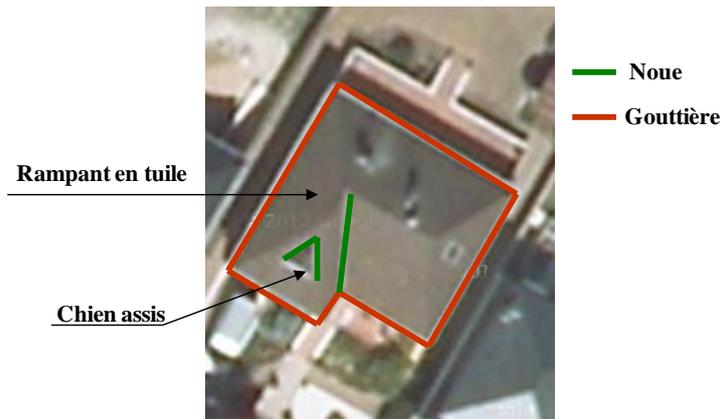


Figure 108 : Repérage de gouttières et de noues dans une toiture à partir d'une photo-aérienne

Nous obtenons alors, pour chaque bâtiment, sa famille de matériaux de toit et sa surface projetée, sa longueur projetée totale de gouttière et celle de noue. Enfin, nous obtenons pour chaque famille de matériaux de rampant i , sa proportion p_i (%) dans la population, la longueur totale de gouttières $l_{g,i}(m)$ et de noues $l_{n,i}(m)$ (cf. Tableau 46).

Tableau 46 : Calcul des longueurs de gouttières et de noues par famille de matériaux de rampant pour la population 1

| Famille de matériaux i | Proportion p_i (%) | Longueur totale de noues $l_{n,i}(m)$ | Longueur totale de gouttières $l_{g,i}(m)$ |
|--------------------------|----------------------|---------------------------------------|--|
| Tuile claire | 33,68 | 373 | 4219 |
| Tuile sombre | 19,64 | 209 | 3217 |
| Ardoise | 14,22 | 161 | 2343 |
| Zinc | 13,33 | 0 | 2375 |
| Terrasse | 15,72 | 0 | 0 |
| Acier | 1,86 | 0 | 80 |
| Matériau autre | 1,56 | 0 | 76 |
| Totale | 100 | $l_n(m)=743$ | $l_g(m)=10172$ |

2.4.2. Calcul d'intervalles de confiance à travers l'application du théorème des proportions et la simulation de Monte-Carlo

Pour l'application du Théorème des proportions et l'élaboration de la simulation de Monte-Carlo nous avons défini les ratios suivants :

- Le ratio entre la longueur de gouttières totale dans la population $l_g(m)$ et celle calculée pour chaque famille de matériau de rampant $l_{g,i}(m)$ dans la population :

$$R_{g,i,r} = \frac{l_{g,i}}{l_g}$$

- Le ratio entre la longueur de gouttières totale dans l'échantillon $l_{g,e}(m)$ et celle calculée pour chaque famille de matériau de rampant dans l'échantillon $l_{g,i,e}(m)$:

$$R_{g,i,e} = \frac{l_{g,i,e}}{l_{g,e}}$$

- Le ratio entre la longueur de noues totale dans la population $l_n(m)$ et celle calculée pour chaque famille de matériau de rampant $l_{n,i}(m)$ dans la population (taille N en nombre de bâtiments) :

$$R_{n,i,r} = \frac{l_{n,i}}{l_n}$$

- Le ratio entre la longueur de noues totale dans l'échantillon $l_{n,e}(m)$ et celle calculée pour chaque famille de matériau de rampant dans l'échantillon $l_{n,i,e}(m)$:

$$R_{n,i,e} = \frac{l_{n,i,e}}{l_{n,e}}$$

a. Simulation Monte Carlo

La simulation Monte Carlo est effectuée comme décrit dans le [Paragraphe 2.3.3](#), il s'agit de calculer les intervalles de confiance sur l'estimation des ratios $R_{g,i,e}$ sur la longueur de gouttières pour chaque famille de matériau i (respectivement $R_{n,i,e}$ sur la longueur de noues pour chaque famille de matériau i) en fonction de la taille n de l'échantillon tiré.

b. Théorème des proportions

L'application du Théorème des proportions sera de la manière suivante :

$$T_{e,i} \rightarrow N(T_i; \sigma_{T,i})$$

avec $T_i \in \{R_{n,i}; R_{g,i}\}$, $T_{e,i} \in \{R_{n,i,e}; R_{g,i,e}\}$, $l_i \in \{l_{n,i,e}; l_{g,i,e}\}$

$R_{n,i}$: ratio estimé à partir du Théorème pour les noues dans la population

$R_{g,i}$: ratio estimé à partir du Théorème pour les gouttières dans la population

Une estimation ponctuelle de T_i est $T_{e,i}$ et une estimation de l'écart-type est :

$$\sigma_{T,i} = \sqrt{\frac{T_{e,i}(1-T_{e,i})}{n} \times \left(1 - \frac{n}{N}\right)}$$

L'intervalle de confiance de cette estimation à 95% :

$$T_i \in [T_{e,i} - 1,96 \cdot \sigma_{T,i}, T_{e,i} + 1,96 \cdot \sigma_{T,i}]$$

c. Comparaison des résultats du Théorème des proportions avec ceux de la simulation de Monte Carlo

Nous avons choisi de travailler à travers la population 1 (vérité terrain issue de la classe d'habitat individuel dans la zone historique 1) car sur ce type de zone nous avons plus de gouttières et de noues. La simulation est effectuée pour la population P_{500} . Les résultats sont montrés pour la famille de matériaux en « Tuile claire ». Les [Figure 109](#) et [Figure 110](#) montrent que les ratios moyens estimés avec le Théorème sur les proportions coïncident avec ceux simulés et ceux réels que ce soit pour les longueurs des gouttières ou les longueurs des noues. L'intervalle de confiance calculé à travers le Théorème sur les proportions sur les ratios des gouttières coïncide avec celui calculé à travers la simulation de Monte Carlo. Ainsi, l'hypothèse que le tirage par bâtiment n'affecte pas l'évaluation des longueurs de gouttières est validée. Par contre, pour les noues l'intervalle de confiance calculé à travers le Théorème sur les proportions sur les ratios des noues ne coïncide pas avec celui calculé à travers la simulation de Monte Carlo (cf. [Figure 110](#)). Il est plus petit. Le décalage est bien marqué pour des tailles d'échantillonnage faibles. Ceci s'explique par le fait que les noues ne sont pas toujours présentes sur les toitures et donc l'estimation par le Théorème sur les proportions risque de sous estimer l'incertitude. Par contre, nous remarquons que la moyenne estimée par le Théorème se situe toujours dans l'intervalle de confiance simulé par Monte Carlo. Ainsi, l'hypothèse que le tirage par bâtiment n'affecte pas l'évaluation des longueurs de gouttières est partiellement validée. Dans ce cas, nous considérons que l'erreur sur le calcul des longueurs de noues n'impacte pas beaucoup le calcul sur le flux global de contaminant car la noue est un élément qui n'est pas toujours présent sur les toitures et son émission est toujours sensiblement inférieure à celle du rampant et de la gouttière.

Dans notre travail, nous allons utiliser le Théorème sur les Proportions pour calculer la longueur de gouttières et de noues pour chaque famille des matériaux de rampant en % de la longueur totale à partir d'un échantillonnage par bâtiment.

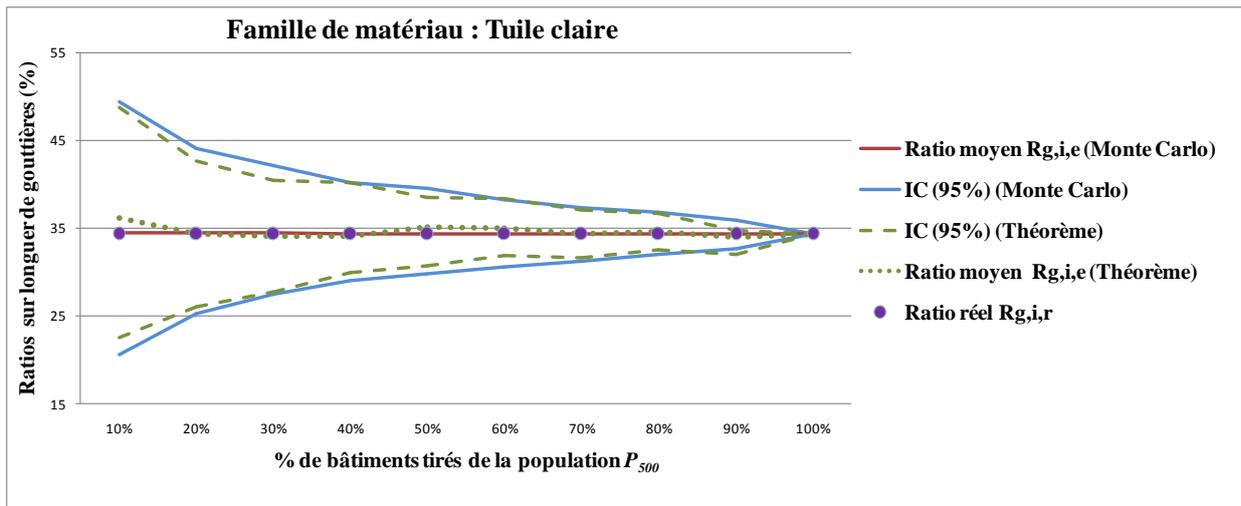


Figure 109 : Comparaison des intervalles de confiance simulés (Monte-Carlo) et estimés (Théorème) sur le calcul des longueurs de gouttières associées à la famille des matériaux « Tuile claire » pour différentes tailles d'échantillons dans une population de 500 bâtiments

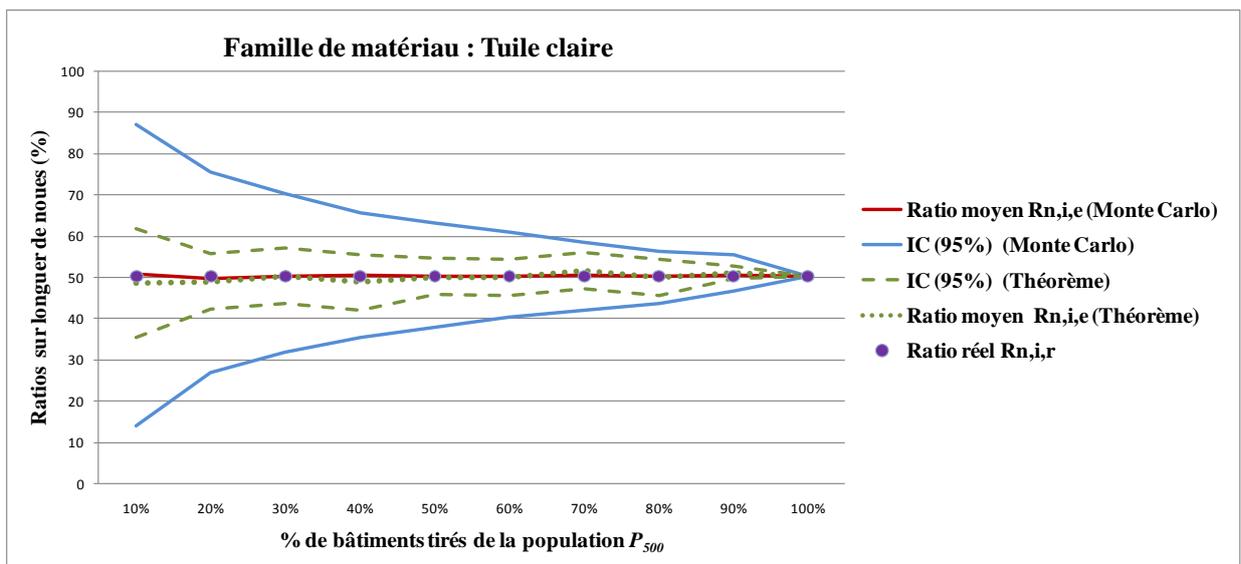


Figure 110 : Comparaison des intervalles de confiance simulés (Monte-Carlo) et estimés (Théorème) sur le calcul des longueurs de noues associées à la famille des matériaux « Tuile claire », pour différentes tailles d'échantillon dans une population de 500 bâtiments

2.4.3. Échantillonnage et application du Théorème des proportions

Pour montrer que l'échantillonnage effectué à partir des courbes de la Figure 104 est aussi valable pour les gouttières et les noues, nous allons calculer à partir du Théorème des proportions les intervalles de confiance sur les longueurs de gouttières et de noues pour les différentes familles des matériaux de rampants pour différents échantillons. Il s'agit de tirer dans chaque population (1, 2 et 3) les échantillons choisis à partir des cinq courbes de la

Figure 104 correspondant aux erreurs absolues simulées E_a (2%, 4%, 8%, 12%, 16%). Nous obtenons 15 bases de données de bâtiments tirés dont nous connaissons les familles de matériaux de rampant ainsi que les longueurs de gouttières et de noues. Dans chaque échantillon e , nous obtenons pour chaque famille de matériaux de rampant i : matériaux de rampant i , sa répartition $p_{i,e}$ (%), la longueur totale de gouttières $l_{g,i,e}$ (m) et de noues $l_{n,i,e}$ (m). L'erreur absolue estimée par le Théorème sur la longueur de gouttière (respectivement la noue) correspond au demi-intervalle de confiance (calculé sur un échantillon e tiré). Enfin, pour valider la méthode nous comparons les erreurs absolues estimées (demi-IC du Théorème des proportions) pour les différentes tailles d'échantillonnages par rapport au critère E_a de la Figure 104.

Nous allons présenter les résultats trouvés pour un échantillonnage choisi pour assurer une erreur absolue maximale E_a sur la distribution des familles de matériaux de rampant de 4% (cf. Tableau 47). D'après ce tableau, la majorité des erreurs absolues calculées pour la distribution des linéaires de gouttières et de noues par familles de matériaux de rampants sont inférieures à ce critère de 4%. Quelques valeurs atteignent 5% d'erreurs absolues soit donc 1% de décalage par rapport à l'erreur simulée. Néanmoins, nous considérons que cette différence reste faible et n'influence pas le calcul global de l'incertitude sur la longueur de gouttière (respectivement la noue).

Ce travail montre que pour des populations différentes que ce soit en termes du nombre de bâtiments ou en termes de caractéristiques de cette population (classe de bâtiment et localisation historique), la méthode d'échantillonnage développée est bien validée et peut être appliquée pour quantifier les familles des matériaux de rampant ainsi que leurs longueurs de gouttières associées. Pour les longueurs de noues toutefois, nous risquons d'avoir une sous estimation de l'intervalle de confiance surtout pour des tailles d'échantillonnage très petites (25% d'erreur absolue pour un échantillon représentant 10% d'une population ayant 500 bâtiments). Cette erreur diminue pour des populations plus importantes.

Tableau 47 : Résultats du calcul d'erreurs absolues sur l'estimation des longueurs de gouttières et de noues par famille de matériaux de rampant pour un échantillonnage choisi pour assurer une erreur absolue $E_a = 4\%$

| Famille de matériaux <i>i</i> | E_a sur la longueur de noues (%) | | | E_a sur la longueur de gouttières (%) | | |
|-------------------------------|------------------------------------|--------------|--------------|---|--------------|--------------|
| | Population 1 | Population 2 | Population 3 | Population 1 | Population 2 | Population 3 |
| Tuile claire | 4,9 | - | - | 4,9 | - | - |
| Tuile sombre | 4,1 | 5 | - | 4,2 | 4,8 | - |
| Ardoise | 4,2 | 4,9 | - | 3,9 | 3,9 | - |
| Zinc | 0 | - | - | 3,9 | - | 1,8 |
| Terrasse | 0 | 0 | - | 0 | 0 | 0 |
| Acier | 0 | 0 | - | 0,6 | 3,2 | 4,0 |
| Matériau autre | 0 | 2,8 | - | 0,8 | 2,1 | 4,2 |

(-) Le matériau ou l'élément de toit n'existe pas dans la population concernée.

3. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons développé une méthode de quantification des surfaces des familles des matériaux de rampant et des longueurs de gouttières et de noues associées. Les hypothèses émises ont été validées. Ainsi, dans le cas des populations homogènes de bâtiments l'application du Théorème sur les proportions est validée pour le calcul de la répartition des familles des matériaux de rampant en % de surface.

Cette méthode est basée sur une première étape de découpage de la ville en zones urbaines homogènes appelées *entités* (chaque *entité* est définie par une classe de bâtiments localisée historiquement). La deuxième étape consiste à choisir, la taille d'échantillonnage minimale en fonction de la taille de l'*entité* pour une erreur absolue E_a que nous devons fixer. Ensuite, nous tirons aléatoirement sans remise un échantillon de bâtiments dans la base de données de l'*entité* établie à partir du croisement des différentes cartes de Créteil (la BD-TOPO (fournissant la surface des toitures de chaque bâtiment) ; la carte historique et la carte de classe de bâtiment). Sur cet échantillon nous identifions manuellement avec QGIS et à partir de la BD-ORTHO et de Google Earth (View Street) la famille de matériaux de rampant et nous mesurons la longueur de gouttière et de noue pour chaque bâtiment tiré. Enfin, nous créons une nouvelle base de données formée par la répartition des familles des matériaux de rampant ainsi que leurs longueurs de gouttières et de noues associées. Le calcul de la ventilation des surfaces de rampant et des linéaires de gouttières et de noues en fonction de la famille de matériau de rampant pour la population complète de l'entité homogène considérée,

ainsi que des intervalles de confiance de ces données, sera établi en appliquant le Théorème des proportions.

Ayant cette nouvelle base de données (formée par la répartition des familles des matériaux de rampant ainsi que leurs longueurs de gouttières et de noues associées), il reste à évaluer la répartition des matériaux de rampant, des matériaux de noues et des matériaux de gouttières. Cela est l'objet du [Chapitre 3.3](#) dans lequel nous allons appliquer les règles de quantification élaborées dans le [Chapitre 2.4](#).

Chapitre 3.3 Evaluation du flux d'émission du zinc à l'échelle de la ville de Créteil

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer le flux d'émission du zinc dans le ruissellement des toitures à l'échelle de la ville de Créteil. Il s'agit d'une part d'appliquer l'approche statistique développée dans le [Chapitre 3.2](#). Les résultats de cette méthode statistique seront comparés à ceux de la méthode de classification automatique des matériaux de rampant. D'autre part, nous allons appliquer les règles empiriques de quantification des matériaux des éléments de toit développées dans le [Chapitre 2.4](#). Ce travail permettra de concrétiser notre méthode et de montrer qu'il est possible d'aboutir à un résultat quantifiable à l'échelle de la ville.

1. Quantification des familles des matériaux de rampant et des linéaires de gouttières et de noues associés

Dans ce paragraphe nous allons appliquer la méthode statistique pour quantifier les familles des matériaux de rampants et les longueurs de gouttières et de noues associées dans la ville de Créteil. La quantification sera faite pour un ensemble d'*entités* choisies suivant un critère. Ensuite, nous allons appliquer la méthode de traitement d'image élaborée dans la thèse de [Robert-Sainte \(2009\)](#) dans les mêmes conditions de calcul effectué dans la méthode statistique. Cette méthode, permettant de quantifier uniquement les familles de matériaux de rampant, sera appliquée pour quelques *entités* dans l'objectif de comparer ses résultats par rapport à notre méthode statistique.

1.1. Méthode statistique

Nous allons appliquer la méthode statistique développée dans le chapitre précédent. A partir des abaques de l'évolution des tailles d'échantillonnage en fonction de la taille de la population pour différentes erreurs absolues, nous avons décidé de choisir les tailles pour une erreur absolue à 16%. Nous avons opté pour la courbe la moins exigeante. Ce choix est effectué d'une part dans le but d'optimiser le temps de calcul et d'autre part pour montrer les résultats minimums assurés par la méthode.

1.1.1. Les entités de la ville de Créteil

Dans la ville de Créteil 37 entités ont été définies. Rappelons qu'une entité est définie comme une classe de bâtiments localisée dans une zone historique. La ville de Créteil a été découpée en trois zones historiques (cf. Tableau 48) pour chacune d'elle ont été identifiées les classes de bâtiments disponibles en fonction de leurs surfaces de toitures. Le Tableau 48 montre que le nombre de bâtiments ne signifie pas une grande surface des toitures. Ainsi, la « zone historique 1 » comporte le plus grand nombre de bâtiments pour une surface de toitures représentant 27% des toitures de Créteil. En revanche, les toitures de la « zone historique 2 » représentent 55% de la surface de toitures de la ville de Créteil mais un nombre de bâtiments deux fois moins important que celui de la « zone historique 1 ».

Tableau 48 : Récapitulatif des surfaces des toitures et du nombre de bâtiments associés à chaque zone historique

| Zone historique | Surface des toitures (km ²) | Nombre de bâtiments |
|-----------------|---|---------------------|
| 1 | 0,735 | 3434 |
| 2 | 1,47 | 1294 |
| 3 | 0,49 | 528 |
| Créteil | 2,695 | 5256 |

1.1.2. Choix des entités de calcul

Selon la zone urbaine considérée il n'est pas toujours possible de trouver les 13 classes de bâtiments. Ainsi, dans la « zone historique 1 » il y a 12 classes de bâtiments (cf. Figure 111), dans la « zone historique 2 » il y a les 13 classes (cf. Figure 112) et enfin « la zone historique 3 » comporte 12 classes (cf. Figure 113). La surface totale des toitures de la ville de Créteil est répartie entre 27% pour la « zone historique 1 », 55% pour la « zone historique 2 » et 18% pour la « zone historique 3 ». La répartition en termes de surface de chaque classe varie d'une zone historique à une autre. Par exemple, les habitats individuels représentent environ 46% de la surface de la « zone historique 1 » alors que dans la « zone historique 2 » ils ne représentent que 0,22% de sa surface et dans la « zone historique 3 » ils sont absents.

D'après les Figure 111, Figure 112 et Figure 113, certaines classes de bâtiments sont négligeables en termes de surfaces dans une zone historique donnée. Ainsi, pour optimiser le temps de calcul, nous avons décidé d'effectuer un choix d'entités. Il s'agit d'effectuer le calcul pour les classes de bâtiments représentant 95% en cumul de la surface totale de la zone

historique (cf. Figure 111, Figure 112 et Figure 113). Le calcul sera fait pour 21 entités sur un totale de 37 entités dans la ville de Créteil.

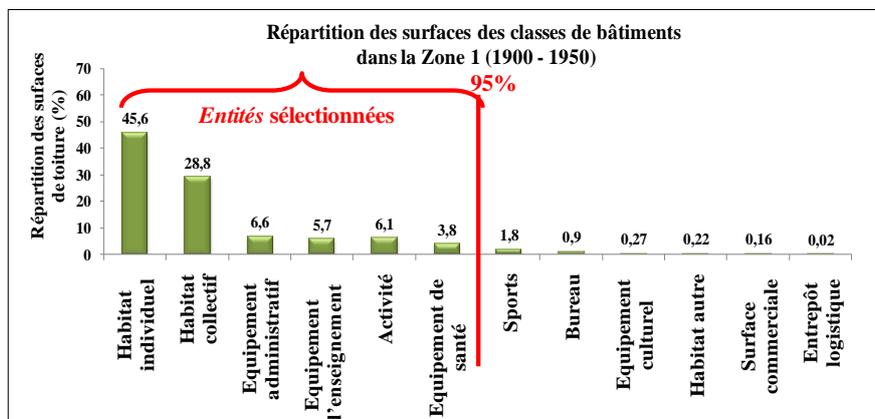


Figure 111 : Répartition hiérarchique des classes de bâtiments dans la « zone historique 1 »

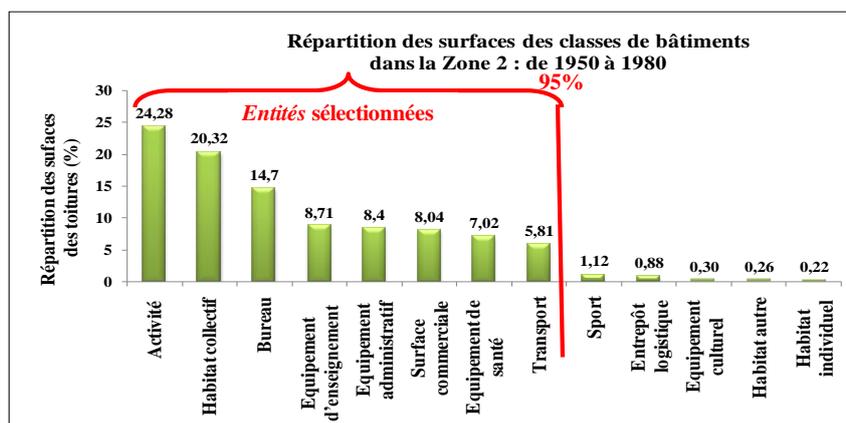


Figure 112 : Répartition hiérarchique des classes de bâtiments dans la « zone historique 2 »

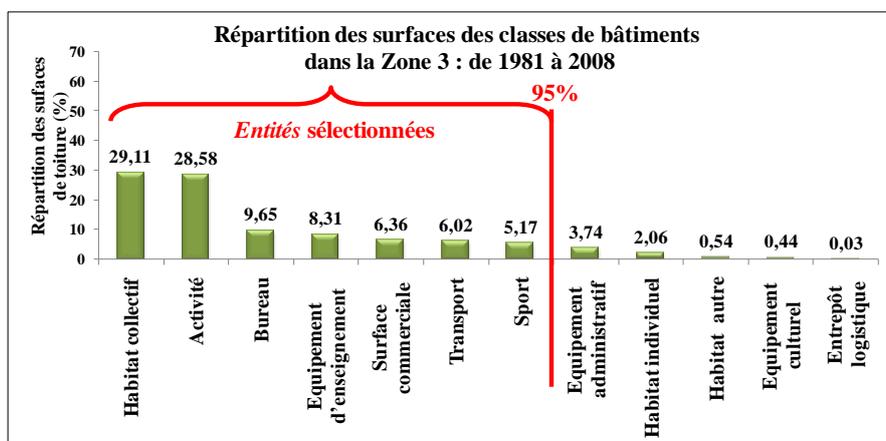


Figure 113 : Répartition hiérarchique des classes de bâtiments dans la « zone historique 3 »

1.1.3. Taille d'échantillonnage

Pour chaque *entité* (N) choisie nous tirons aléatoirement sans remise un échantillon de taille choisie à partir de la courbe à 16% (cf. Chapitre 3.2). Ainsi, pour une *entité* i ayant N_i comme nombre de bâtiments, la taille d'échantillon n_i à tirer, pour assurer une erreur absolue à 16%, s'écrit comme suit :

$$\text{Équation 3 : } n_i = 22,77 \times N_i^{0,15}$$

Nous obtenons les tailles d'échantillonnage illustrées dans le [Tableau 49](#). Nous remarquons que pour des *entités* formées de moins de 40 bâtiments, il est nécessaire de renseigner la totalité de ses familles de matériaux de rampants ainsi que leurs longueurs de gouttières et de noues associées.

Tableau 49 : Récapitulatif des tailles des échantillons tirés des *entités* choisies

| Entités choisies | | Nombre de bâtiment (N_i) | Taille de l'échantillon (n_i) |
|------------------|----------------------------|------------------------------|--|
| Zone historique | Classe de bâtiment | | |
| 1 | Habitats individuels | 2416 | 73 |
| | Habitats collectifs | 548 | 59 |
| | Equipements administratifs | 110 | 46 |
| | Equipements d'enseignement | 88 | 45 |
| | Activité | 144 | 48 |
| | Equipements de santé | 52 | 41 |
| 2 | Activité | 176 | 49 |
| | Habitats collectifs | 468 | 57 |
| | Bureaux | 143 | 48 |
| | Equipements d'enseignement | 150 | 48 |
| | Equipements administratifs | 118 | 47 |
| | Surfaces commerciales | 54 | 41 |
| | Equipements de santé | 46 | 40 |
| | Transport | 37 | 37 |
| 3 | Habitats collectifs | 139 | 48 |
| | Activité | 131 | 47 |
| | Bureaux | 44 | 40 |
| | Equipements d'enseignement | 41 | 40 |
| | Surfaces commerciales | 31 | 31 |
| | Transport | 29 | 29 |
| | Sport | 37 | 37 |
| Total | | 5002 | 952 tirés sur 5256 bâtiments dans la ville de Créteil soit donc 18% |

D'après le [Tableau 49](#), nous remarquons que notre méthode permet de réduire la proportion de bâtiments à renseigner à moins du cinquième de la population totale (18%), ce qui constitue un gain significatif en termes d'informations nécessaires à renseigner. Ce nombre peut être moins important pour des villes plus grandes comme nous l'avons montré dans le [Chapitre 3.2](#) (la taille d'échantillonnage diminue pour des entités de plus en plus grandes).

1.1.4. Démarche de calcul

Chaque *entité* est décrite par une base de données de ses bâtiments en fonction de leurs surfaces de toitures. A partir de cette base le tirage d'un échantillon de bâtiments de taille n_i est effectué (cf. [Tableau 49](#)). Ensuite, à l'aide de QGIS, pour chaque échantillon tiré de chaque *entité*, nous renseignons toiture par toiture la famille des matériaux de rampant et nous mesurons la longueur de gouttière et de noue. Nous obtenons ainsi un nouveau tableau (cf. [Tableau 50](#)) comportant pour chaque bâtiment la nature et la surface de la famille de matériau de son rampant, la longueur de gouttière et la longueur de noue.

Tableau 50 : Extrait d'un échantillon tiré pour les habitats collectifs dans la « zone historique 1 »

| Numéro du bâtiment tiré | Surface toiture (m ²) | Famille de matériau | Longueur de gouttière (m) | Longueur de noue (m) |
|-------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|
| 26 | 73 | Zinc | 18 | 0 |
| 428 | 160 | Terrasse en bitume | 0 | 0 |
| 132 | 204 | Bardeaux | 38 | 0 |
| 452 | 51 | Terrasse en gravier | 0 | 0 |
| 437 | 535 | Tuile | 75 | 13 |

A partir des tableaux obtenus (comme le [Tableau 50](#)) pour chaque *entité*, nous allons calculer à l'aide du Théorème de Proportion (cf. [Chapitre 3.2](#)) la répartition des différentes familles de matériaux de rampant ainsi que leurs longueurs de gouttières et de noues associées pour chaque *entité*. Un calcul d'incertitude est ainsi effectué. Le [Tableau 51](#) illustre un exemple de calcul pour trois *entités* de la « zone historique 1 » : habitats individuels, habitats collectif et équipement de santé.

Dans chaque échantillon e d'une *entité* donnée, nous obtenons pour chaque famille de matériaux de rampant i : sa répartition $p_{i,e}$ (%), la longueur totale de gouttières $l_{g,i,e}$ (m) et de noues $l_{n,i,e}$ (m). Au niveau de l'*entité* nous obtenons la surface des matériaux de rampant S_i (m²), la longueur totale de gouttières $l_{g,i}$ (m) et de noues $l_{n,i}$ (m) avec un calcul d'intervalle de

confiance (cf. [Tableau 51](#)). Les résultats de tous les calculs pour toute la ville de Créteil sont illustrés dans [Annexe 15](#).

Dans le [Tableau 51](#) :

$R_{n,i,e} = \frac{l_{n,i,e}}{l_{n,e}}$: Le ratio entre la longueur totale de noues dans l'échantillon $l_{n,e}$ (m) et celle calculée pour chaque famille de matériau de rampant dans l'échantillon.

$R_{g,i,e} = \frac{l_{g,i,e}}{l_{g,e}}$: Le ratio entre la longueur totale de gouttières dans l'échantillon $l_{g,e}$ (m) et celle calculée pour chaque famille de matériau de rampant dans l'échantillon.

Le travail de tirage et le calcul d'incertitude est effectué à l'aide d'une procédure développée sur MATLAB.

Dans notre travail de repérage des familles des matériaux de rampant, nous avons pu identifier certains matériaux tels que l'acier laqué et l'acier galvanisé. Ces deux matériaux sont identifiables, tout d'abord, par le profil caractéristique des plaques en acier comme décrit dans le [Chapitre 1.1](#). Ensuite, l'acier laqué est reconnu par ses différentes couleurs (blanc, vert, rouge, etc.) et l'acier galvanisé par sa couleur grise et surtout son aspect caractéristique de rouille pour le vieil acier galvanisé.

L'acier inoxydable, un matériau cher, a été reconnu car il a été utilisé sur des bâtiments prestigieux comme la préfecture et l'information était accessible.

Les toitures-terrasses ont été classées en quatre catégories :

- terrasse en bitume reconnue par leur couleur noirâtre ;
- terrasse en gravier reconnue par la texture gravillonnée et leur couleur claire ;
- terrasse en étanchéité inconnu : visuellement nous n'avons pas pu identifier la nature de l'étanchéité utilisée ;
- terrasse végétalisée : reconnue par l'emploi de la végétation.

D'après le [Tableau 51](#), le plus grand intervalle de confiance est de 10,5% pour « la zone historique 1 ». Pour la totalité de la ville de Créteil le plus grand intervalle de confiance est de 12,2% correspondant aux toitures-terrasses en bitume de la classe « activité secondaire » de la « zone historique 2 ». Ces résultats, correspondant aux tailles de tirage choisies à partir de la courbe à 16% (la moins exigeante), sont très satisfaisants.

L'[Annexe 16](#) résume les différentes familles de matériaux repérés dans la ville de Créteil. Ce tableau sera le support de l'application des règles de quantification des matériaux de rampant, de gouttière et de noue dans la [Section 2](#).

Tableau 51 : Surface de rampant, longueur de gouttière et longueur de noue pour chaque famille de matériaux pour les entités : habitats individuels, habitats collectif et activité de la « zone historique 1 » (1900-1950)

| Famille de matériau | Surface de rampant $S_i \pm CI (m^2)$ $(p_{i,e} \pm CI (\%))$ | | | Longueur de gouttière $l_{g,i} \pm CI (m^2)$ $(R_{g,i,e} \pm CI (\%))$ | | | Longueur de noue $l_{n,i} \pm CI (m^2)$ $(R_{n,i,e} \pm CI (\%))$ | | |
|------------------------|---|------------------------------|--------------------------|--|----------------------------|-----------------------|---|---------------------------|----------------------|
| | Individuel | Collectif | Activité | Individuel | Collectif | Activité | Individuel | Collectif | Activité |
| Tuile | 278648±25391 (83,2±7,58) | 91793±22250 (43,32±10,50) | 27976±4107 (62,1±9,1) | 71676±6029 (85,31±7,18) | 22298±2792 (74,12±9,28) | 10157±781 (85,6±7) | 7060±706 (80,43±8,04) | 1757± 183 (80,56±8,39) | 934±3 (97,2± 3,1) |
| Acier laqué | 845±3406 (0,25±1,02) | - | 2802±2044 (6,2±4,5) | 335±1074 (0,40±1,28) | - | 180±272 (1,5±2) | - | - | - |
| Acier galvanisé | 5306±8478 (1,58±2,53) | - | - | 1280±2086 (1,52±2,48) | - | - | - | - | - |
| Terrasse en bitume | 5409±8558 (1,61±2,56) | 17813±12460 (8,41±5,88) | 41±254 (0,1±0,6) | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse en gravier | 6406±9300 (1,91±2,78) | 68017± 20963 (32,10±9,89) | 7118±3087 (15,8±6,9) | - | - | - | - | - | - |
| Zinc | 7379±9967 (2,20±2,98) | 28176± 15246 (13,30±7,19) | 620±986 (1,4±2,2) | 2506±2897 (2,98±3,45) | 6703±2653 (22,28±8,82) | 97±200 (0,8 ± 2) | - | 424±183 (19,44±8,39) | - |
| Ardoise | 20552±16295 (6,14±4,86) | - | 660±1017 (1,5±2,3) | 6510±4554 (7,75±5,42) | - | 289±343 (2,4±3) | 1581± 684 (18,01±7,79) | - | 27±3 (2,8±3,1) |
| Aluminium | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Bardeaux | 10405±11780 (3,11±3,52) | 6102±7509 (2,88±3,54) | 5848±2845 (13,0±6,3) | 1708±2404 (2,03±2,86) | 1081±1187 (3,6±3,94) | 1139±656 (9,6± 6) | - | - | - |
| Plaque éclaircissement | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse étanchéité | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse végétalisée | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Inox | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

(-) La famille de matériau ou l'élément de toit n'existe pas

1.2. Méthode de traitement d'image : classification des familles des matériaux de rampant

Ce travail¹⁰⁷ a été effectué dans le cadre d'une collaboration avec Arnaud le Bris (chercheur) du laboratoire MATIS de l'IGN.

Nous avons appliqué la méthode de classification des matériaux de toiture à partir d'images aériennes de la ville de Créteil. Cette méthode, déjà développée et appliquée dans le cadre de la thèse de Robert-Sainte (2009) (Le Bris et al., 2009), a montré quelques limitations (ex : confusion entre certains matériaux comme le zinc et l'ardoise à la lumière). En outre, cette méthode permet uniquement de quantifier les familles des matériaux de rampant.

L'objectif de ce travail est, d'une part de comparer notre méthode statistique à cette méthode de traitement d'image et, d'autre part, de tester l'efficacité de cette méthode automatique en la couplant avec les résultats de l'étude de la typologie urbaine de la ville de Créteil. Ainsi, nous avons appliqué la méthode de traitement d'image sur la totalité de la ville de Créteil et ensuite sur les *entités* les plus importantes de Créteil.

1.2.1. Principe de la méthode de classification des familles de matériaux de rampant

La quantification des surfaces des familles des matériaux de rampant est basée sur l'analyse des ortho-images obtenues à partir de clichés aériens (classification supervisée), dans notre étude nous utilisons la base BD-ORTHO (résolution de 50 cm). Ces photos sont prises dans le domaine visible et comportent trois canaux : rouge, vert et bleu (le proche infrarouge est également disponible mais il n'a pas été utilisé). La valeur en chaque pixel représente la radiométrie du matériau. Ainsi, cette méthode permet d'estimer les surfaces des familles des matériaux de toit et d'identifier les différentes familles de matériaux de toiture à l'échelle urbaine. Ces ortho-photographies aériennes sont analysées à l'aide d'un outil de classification permettant d'obtenir une identification des familles de matériaux de rampants. Les étapes de cette méthode sont : la segmentation de l'image en zones de radiométrie homogènes, la focalisation sur le bâti, une estimation du modèle passant par l'apprentissage et la classification proprement dite (cf. Figure 114). Cette méthode a été détaillée dans la thèse de Robert-Sainte (2009). Dans ce paragraphe nous allons résumer les principales étapes de cette approche.

¹⁰⁷ Ce travail a été effectuée dans le cadre d'un stage scientifique 1^{ère} années ingénieur de l'école des Ponts : Relave-Noiray, A. (2013) Classification des matériaux de toitures à partir d'orthos-images aériennes à l'échelle de la ville de Créteil. LEESU-ENPC.

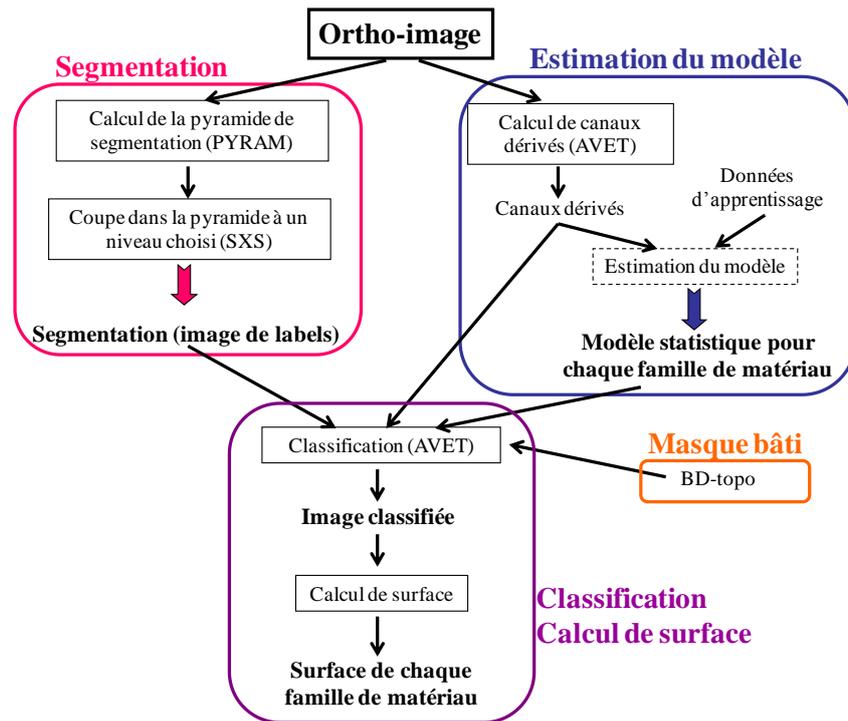


Figure 114 : Processus de classification (adaptée) (Le Bris, 2007)

a. Phase préparatoire de l'image

- Application d'un masque de focalisation sur le bâti

Pour délimiter les toitures, nous avons besoin d'appliquer un masque sur la photo qui permet de cacher toutes les surfaces non bâties (voiries, les jardins...). Dans notre cas d'étude nous avons utilisé la base de données BD-TOPO. Cette opération présente *des limites*. En effet, il peut exister un décalage entre la BD-ORTHO et la BD-TOPO, ceci engendre que certaines toitures seront masquées et en contrepartie des zones non bâties seront prises en compte. Les données de la BD-TOPO ne permettent pas toujours d'isoler chaque bâtiment, mais des îlots de bâtiments comportant différentes familles des matériaux de toitures. De plus, le toit est divisé en plusieurs parties de tailles pouvant être sensiblement équivalentes recouvertes de familles de matériaux différents (ex : deux pans d'un même toit peuvent ne pas être recouverts par la même famille de matériau). En outre, un toit peut être partiellement à l'ombre à cause de bâtiments voisins plus hauts ou de superstructures comme des cheminées.

- Segmentation

Après l'application du masque, l'image va être segmentée en régions de radiométrie homogène (cf. Figure 115). Ce résultat est obtenu grâce à la méthode de segmentation multi-échelle (Guigues, 2003 ; Guigues et al., 2006).

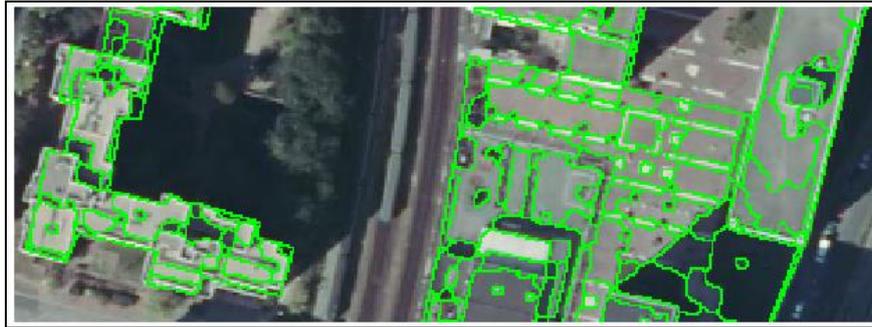


Figure 115 : Exemple de segmentation de l'image (BD-Ortho). Les contours verts délimitent les régions de radiométries homogènes

b. Classification proprement dite

La classification de l'image est basée sur l'outil AVET (Automatic Vegetation Extraction Technique) qui est un logiciel de classification semi-automatique développé par Trias-Sanz (Trias-Sanz et Boldo, 2005 ; Trias-Sanz, 2006).

Cet outil est basé sur une approche statistique : un modèle probabiliste est calculé pour chaque classe. Connaissant la radiométrie d'un pixel ou la distribution de la radiométrie au sein d'une région, il devient possible de lui attribuer sa classe la plus probable ou la plus proche statistiquement. AVET procède en deux temps :

- Apprentissage - Estimation du modèle

Il s'agit de prendre un échantillon de bâtiments dont nous connaissons les familles de matériaux de toit (zones d'apprentissage définies par un opérateur). Pour chaque famille de matériaux identifiée, AVET calcule un modèle statistique. Il s'agit de calculer la distribution radiométrique correspondant à chaque famille de matériaux, à partir des données d'apprentissage et l'association des canaux choisis (Le Bris, 2007).

L'ortho-image présente des canaux originaux qui sont les canaux rouges (r), vert (v) et bleu (b). D'autres canaux radiométriques¹⁰⁸ dérivés (calculés à partir des canaux originaux) ont été testés. Ils permettent parfois de mieux discriminer certaines radiométries.

Les différents modèles statistiques de distribution radiométrique pour chaque famille de matériau sont ensuite utilisés dans la partie classification.

- Classification

Cette étape est basée sur le calcul de la distribution radiométrique de chaque région de l'image. Chaque distribution est comparée aux distributions radiométriques de référence (les

¹⁰⁸ Il existe des canaux de textures qui permettent d'identifier la texture au sein d'une ortho-image. Ces canaux n'ont pas été utilisés dans ce travail.

modèles calculés précédemment lors de l'apprentissage) des différentes familles de matériaux. Cette comparaison permet d'attribuer à chaque région de l'image la famille de matériaux présentant la distribution radiométrique la plus semblable.

A l'issue de la classification, le nombre de pixels figurant dans chaque famille de matériau est comptabilisé. A partir de ce nombre de pixels et de la résolution de l'image, la surface correspondant à la famille de matériaux considérée est calculée.

La classification donne un résultat visuel sous forme d'image de labels, il s'agit d'une image dont chaque pixel a pour valeur le label de la classe associée à ce pixel de l'image aérienne.

1.2.2. Acquisition de données de vérité terrain

Cette première partie du travail a eu pour but de constituer un catalogue de bâtiments de Créteil en fonction de leurs familles de matériaux de toitures afin d'avoir à disposition un échantillon représentatif de la commune. Il s'agit d'identifier visuellement et à partir des ortho-photos la famille de matériaux de toiture de chaque bâtiment de l'échantillon. Ce catalogue sera utilisé lors de la classification. En effet, nous avons besoin de 2 vérités terrain : la première sera utilisée lors de l'apprentissage (estimation du modèle pour chaque famille de matériaux) et la deuxième permettra l'évaluation et la quantification des résultats obtenus à la fin de la classification. Ces deux jeux de données ne doivent a priori pas concerner les mêmes bâtiments afin de ne pas biaiser l'évaluation.

a. Principe de la saisie

La vérité terrain saisie sur tout Créteil a été effectuée par *entité*. Il s'agit d'identifier pour chaque *entité* la famille des matériaux des rampants d'un certain nombre de bâtiments. Le choix de ce nombre est arbitraire. En fait, dans la littérature, aucune recommandation particulière n'est retrouvée pour le choix du nombre de bâtiment que ce soit pour l'apprentissage ou la vérité terrain pour la validation. Dans notre travail, le nombre de bâtiments dépend de la taille de l'entité et du nombre de familles de matériaux identifiées dans chaque *entité*. En effet, l'objectif est de saisir au moins un bâtiment pour chaque famille de matériaux si elle existe. Une autre contrainte qui s'ajoute est de ne pas alourdir la saisie avec un nombre énorme de bâtiments. Ce travail de saisie de plusieurs bâtiments est assez fastidieux.

Pour les données de l'apprentissage, deux démarches ont été élaborées :

- *un apprentissage pour tout Créteil* : nous saisissons arbitrairement cinq bâtiments pour chaque famille de matériaux partout dans Créteil (soit donc 45 bâtiments)

- *un apprentissage par entité* : il s'agit de saisir dans chaque *entité* au moins un bâtiment pour chaque famille de matériaux existante dans l'*entité* considérée.

Ce travail de saisie des données d'apprentissage est relativement faible mais nous sommes contraints par la faible représentativité de certaines classes de familles de matériaux.

Il faudra noter que les bâtiments saisis dans l'apprentissage sont différents de ceux saisis pour la vérité terrain.

b. Identification des familles des matériaux lors de la saisie

Le principe de la saisie est le même que celui décrit dans le [Chapitre 3.2](#) pour la méthode statistique. L'outil utilisé pour la saisie est QGIS. En revanche, l'identification des familles des matériaux de toiture ne se limite pas à signaler la nature de la famille de matériau. En d'autres termes, nous sommes amenés à différencier une même famille de matériaux dans deux configurations d'éclairage très différentes dans le but d'éviter les problèmes de confusion. En effet, AVET analyse les radiométries de chaque région de l'image et parfois une même famille de matériaux présente deux radiométries différentes à cause d'une position de la toiture soit à la lumière soit à l'ombre. Par exemple, l'ardoise au soleil et l'ardoise à l'ombre présentent un aspect très différent (passage du gris foncé au gris très clair) ce qui nous amène à séparer ces deux situations. Ainsi, l'ajout de ces classes permet peut être d'améliorer les méthodes radiométriques mais les classes restent très ressemblantes.

Nous avons défini au final 9 couches de familles de matériaux différentes : ardoise claire, ardoise sombre, tuiles claires, tuiles sombres, zinc, terrasses bitumées, terrasses avec gravier, acier puis les matériaux inconnus (autres). Cette saisie est effectuée à la main sur le logiciel sous la forme de couches formées de polygones sur le fond de l'ortho-photo (cf. [Figure 116](#)).



Figure 116 : Exemple de saisie des polygones pour différentes familles de matériaux

1.2.3. Application de la méthode à toute la ville de Créteil

La première partie du travail a été consacrée à appliquer la classification par AVET à toute la ville de Créteil. Plusieurs associations de canaux ont été testées (ex : rouge/bleu, rouge/bleu/log rs). Nous allons présenter les meilleurs résultats obtenus pour tout Créteil. L'évaluation des résultats consiste à comparer les résultats obtenus à la vérité terrain en calculant les erreurs dues à la classification. Il s'agit d'évaluer pour chaque famille de matériaux de rampant le taux de pixels bien classés. En d'autres termes, nous évaluons la proportion (en %) de pixels attribués à l'issue de la classification à une famille de matériaux dont elle fait effectivement partie sur le terrain. Ainsi, une précision de 20% obtenue pour la tuile signifie que seuls 20% des pixels classés dans cette catégorie appartiennent réellement à la famille tuile.

Le meilleur résultat de classification globale des familles des matériaux de rampant obtenu est de 55,8 % (cf. Tableau 52).

Tableau 52 : Tableau récapitulatif des meilleurs résultats (en pourcentages) obtenus sur tout Créteil

| Famille de matériaux | Précision (%) |
|----------------------|---------------|
| Ardoises claires | 52,82 |
| Ardoises sombres | 15,29 |
| Tuiles claires | 93,91 |
| Tuiles sombres | 41,14 |
| Terrasses en gravier | 75,48 |
| terrasses bitumées | 62,85 |
| Zinc | 28,95 |
| Acier | 67,22 |
| Autre | 64,44 |
| Bilan | 55,8 |

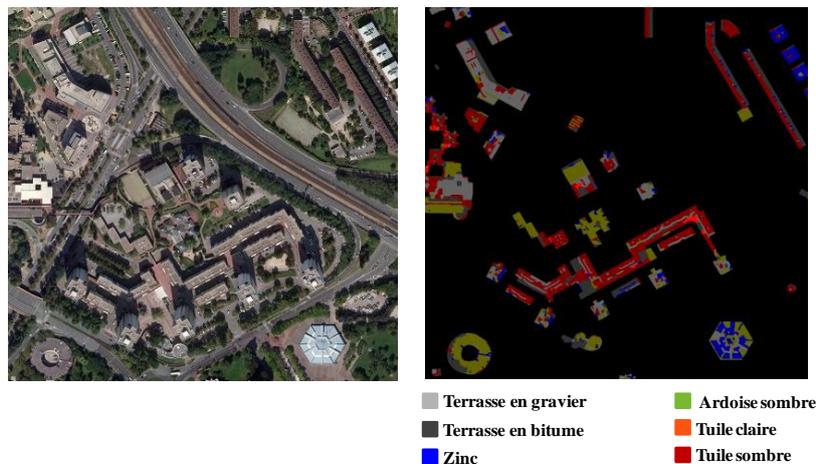


Figure 117 : A gauche une ortho-photo; A droite un exemple d'image label de classification effectuée pour tout Créteil

La [Figure 117](#) montre un exemple de résultat de classification des matériaux de rampant illustré par une image de labels. Chaque couleur correspond à une famille de matériau.

Les résultats sont variables d'une famille de matériau à une autre, le résultat final dépend de la proportion relative de chaque famille de matériau sur la zone testée :

- les tuiles claires sont généralement bien classées même si parfois quelques confusions sont générées avec les terrasses en gravier ;
- les tuiles sombres sont moyennement classées. Nous détectons une confusion importante avec les terrasses en gravier ;
- les ardoises claires sont aussi moyennement classées. Elles ont tendance à être classées parmi les toits en zinc ;
- les ardoises sombres sont très mal détectées lors de la classification. La confusion principale est faite par rapport aux terrasses bitumées ;
- l'acier est bien classé malgré quelques confusions avec l'ardoise claires et les matériaux inconnus ;
- les terrasses en gravier et les terrasses bitumées sont globalement bien détectées. Un certain nombre de confusions a été détectées entre les terrasses en gravier et acier ; les terrasses bitumées et les matériaux inconnus ;
- Enfin le zinc est mal classé par AVET. Lorsqu'il est à la lumière, il est confondu avec l'ardoise claire, l'acier et les terrasses en gravier.

1.2.4. Application de la méthode à des *entités*

L'application de la classification par AVET sur tout Créteil n'a pas donné de bons résultats (55,8% de pixels bien classés). Dans ce paragraphe, nous allons présenter une proposition d'amélioration de la classification basée sur une classification par *entité* urbaine (ex : classe habitats individuels dans la « zone historique 1 »). Cette approche a deux objectifs : d'une part tester la performance du classificateur AVET en lui rajoutant plus de contraintes (classification par *entité*), et, d'autre part, comparer la méthode statistique déjà élaborée par rapport aux résultats fournis par AVET dans les mêmes conditions (résultats par *entité*). L'hypothèse du travail est qu'appliquer la classification par AVET par *entité* permet de réduire les confusions entre certains matériaux. En effet, les résultats de calcul de la méthode statistique montrent bien que la distribution des familles des matériaux de rampant est très variable d'une entité à une autre. Les 9 familles de matériaux définies pour la classification sur tout Créteil ne sont pas toujours réunies dans chaque *entité*. Par exemple, dans certaines *entités* des terrasses bitumées sont présentes et dans d'autres elles sont absentes. Ce constat

nous permet de supposer que la classification par *entité* permet de limiter la confusion entre certaines familles de matériaux. En effet, la classification sur tout Créteil tient compte de toutes les familles de matériaux existantes et donc AVET peut classer certaines familles de matériaux dans une *entité* où réellement elles n'existent pas à cause d'une confusion avec une autre famille de matériaux.

De plus la classification par *entité* permet de nous informer sur l'âge de la famille de matériaux, information absente lors de la classification sur tout Créteil.

Les résultats de ce travail ont été élaborés pour 8 entités. Il s'agit des plus importantes classes de bâtiments dans chaque zone historique. Un travail de choix de la bonne association de canaux a été effectué.

L'application de la classification par entité a permis d'améliorer les résultats par rapport à la classification de toute la ville de Créteil. Le meilleur résultat obtenu assure 66,7% de pixels bien classés (33,4% sont mal classés) et ainsi un gain de 10,8%.

Les résultats de classification par entité et ceux de notre méthode statistique sont décrits dans le [Tableau 53](#). Bien que la classification automatique par entité ait permis un gain de 10,8% par rapport à une classification de toute la ville, notre méthode statistique assure une incertitude relative maximale de 17,5% par rapport à celle d'AVET avec 43,8% de pixels mal classés.

Tableau 53 : Comparaison de notre méthode et celle de classification par AVET

| Entité | | Incertitude | |
|-----------------|----------------------------|--------------------------------------|--|
| Zone historique | Classe de bâtiment | Méthode AVET (pixels mal classés) | Notre méthode (±Incertitude relative (%)) |
| 1 | Habitats individuels | 50,23 | 11,2 |
| | Habitats collectifs | 43,8 | 17,5 |
| | Activité | 57,63 | 14,2 |
| 2 | Equipements d'enseignement | 69,04 | 16 |
| 3 | Habitats collectifs | 33,4 | 8,8 |

1.3. Méthode statistique et méthode de traitement d'image

La quantification des matériaux de rampant à l'aide de la méthode statistique et l'interprétation visuelle des matériaux assure de meilleurs résultats. Tout d'abord,

l'identification visuelle permet de reconnaître un maximum de matériaux alors que l'outil AVET est contraint par rapport aux données d'apprentissage et ne peut pas identifier de nouveaux matériaux. Ensuite, la classification automatique présente beaucoup de problèmes de confusion malgré son application par *entité*. Ceci est dû, d'une part, à la qualité de l'image. D'autre part, la radiométrie de certains matériaux est très proche ce qui augmente le risque de confusion. L'ortho-image de 2008 a une mauvaise qualité notamment des variations importantes d'éclairage suivant l'orientation des pans de toits. Cette variation est bien plus importante par rapport à l'image de Noisy-le-Grand utilisée lors de la thèse de Robert-Sainte (2009). De plus, dans le cas de la ville de Créteil, nous avons rajouté, par rapport à Noisy-le-Grand, d'autres classes de familles de matériaux (ex : acier) qui ressemblent à d'autres classes qui se confondaient déjà (ardoise et zinc).

De plus, notre méthode permet de quantifier les longueurs de gouttière et des noues alors qu'AVET ne le permet pas. Enfin, notre méthode est plus pratique et opérationnelle. En effet, nous n'avons pas besoin d'utiliser un outil de classification qui n'est pas toujours accessible. (Une meilleure classification nécessite une image de haute résolution ce qui coûte très cher). Alors que les outils que nous utilisons sont généralement accessibles et gratuits (QGIS, BD-TOPO, ORTHO-PHOTO et le site mappy.com).

2. Quantification des matériaux de : rampants, gouttières et noues à l'échelle de la ville de Créteil

Puisque notre objectif est l'évaluation de l'émission du zinc par les matériaux des différents éléments de toiture, nous allons quantifier uniquement les matériaux des éléments de toit émetteur du zinc. Le tableau des situations-types du zinc décrit dans le [Chapitre 3.1](#) permet de préciser les matériaux à quantifier pour chaque localisation sur toit.

a. Rampants

Les familles de matériaux de rampant repérées lors de la saisie pour chaque entité sont résumées dans l'[Annexe 16](#). Celles émettrices du zinc sont :

- Famille des matériaux en zinc : Zinc naturel (neuf et ancien), anthra zinc et quartz-zinc : application des règles (RQMZ et RIMZ) de passage de la famille zinc au matériau zinc naturel, zinc prépatiné, zinc bi-laqué et le zinc coloré en masse du [Chapitre 2.4](#).

- Famille des matériaux en acier : l'acier galvanisé, l'acier laqué et l'acier inoxydable¹⁰⁹ ont été repérés lors de la saisie donc nous n'avons pas besoin d'appliquer les règles de quantification.

- Famille des matériaux en aluminium : l'aluminium naturel a été repéré lors de la saisie.

- Pour les autres matériaux de rampant (tuile, ardoise, bardeaux et les plaques d'éclairage), aucune donnée de flux d'émission du zinc n'est disponible.

b. Gouttières

Les matériaux utilisés en gouttières sont : le zinc neuf, le zinc ancien et l'antra zinc ; l'aluminium laqué ; le cuivre neuf et le cuivre ancien.

Il s'agit d'appliquer les règles de corrélation (RCGT, RCGA, RCGME et RCGMN) entre le matériau du rampant (zinc, acier, tuile, ardoise, bardeaux et les plaques d'éclairage) et le matériau de la gouttière du [Chapitre 2.4](#).

c. Noues

Les matériaux utilisés en noues sont le zinc naturel et l'antra-zinc. Il s'agit d'appliquer les règles de corrélation (RCRN) entre le matériau du rampant (zinc, acier, tuile, ardoise, bardeaux et les plaques d'éclairage) et le matériau de la gouttière du [Chapitre 2.4](#).

d. Toitures-terrasses

Pour les matériaux d'étanchéité de ces toitures aucune donnée de flux d'émission du zinc n'est disponible.

Notons que dans la suite nous allons utiliser et croiser les données issues du [Chapitre 1.2](#) (le tableau historique) pour la datation des matériaux et du [Chapitre 2.4](#) (les règles) pour l'identification et la quantification des matériaux des différents éléments de toit.

Pour le renouvellement des toitures, le taux de renouvellement annuel du patrimoine bâti à l'échelle nationale est inférieur à 1% ([GPEM/DDEN, 2006](#)). L'étude historique de la ville de Créteil ([cf. Chapitre 3.1](#)) montre que le renouvellement du parc immobilier construit dans le Nouveau Créteil I (1965-1977) a été effectué pendant les années 1990. Dans cette zone, il s'agit de grands ensembles comprenant presque exclusivement des toitures-terrasses. La nouvelle partie de Créteil est construite après 2008. Dans notre travail, nous nous intéressons

¹⁰⁹ Notons que la toiture en acier inoxydable correspond au bâtiment prestigieux de la préfecture qui a été construit en 1968.

au patrimoine bâti avant 2008, ainsi toutes les toitures (avec tous leurs éléments : rampant, gouttière et noue) de la ville de Créteil sont anciennes.

Notons que pour un matériau ancien une seule valeur du flux unitaire du zinc est disponible et associée à un seul âge. De plus, cette valeur est toujours supérieure au flux du zinc issu d'un matériau neuf. Ainsi, faute d'autres données, pour l'évaluation du flux total du zinc dans la ville de Créteil nous appliquons le principe de *majoration* en utilisant la seule valeur du flux disponible pour tous les matériaux anciens indépendamment de leurs âges. Par exemple, pour une gouttière en cuivre ancien nous disposons du flux unitaire pour une gouttière âgée de 25 ans cette valeur est associée à toute gouttière ancienne quel que soit son âge (10 ans, 20 ans, 40 ans, etc.). Pour d'autres matériaux comme l'aluminium et l'acier galvanisé une seule valeur de flux est disponible correspondant au matériau neuf. Ainsi, cette valeur sera utilisée même pour les matériaux anciens car nous n'avons pas d'autres informations.

Parfois aucune règle quantitative n'est disponible, nous appliquons ainsi le principe de *majoration* (cf. [Chapitre 2.1](#)) ou nous utilisons les spécificités de Créteil (ex : son histoire) pour attribuer des valeurs. Le principe de *majoration* consiste à donner un poids plus important aux matériaux en zinc par rapport aux autres puisque notre objectif est l'évaluation des émissions du zinc. Il est utilisé, selon les cas, de deux manières :

- soit à la place d'une règle lorsqu'aucune règle quantitative n'est disponible. Ainsi, pour les rampants en ardoises, construits entre 1900 et 1950, il n'existe pas de règle décrivant la répartition des matériaux de gouttières. Nous attribuons donc par majoration cette répartition de gouttières de 95% de zinc naturel contre 5% du cuivre.

- soit pour affiner/réorienter la valeur quantifiée décrite par une règle. Par exemple, depuis les années 1980, pour une couverture économique la répartition des matériaux de gouttières est de 80% en PVC et 20% en matériaux autres. En appliquant le principe de majoration nous considérons que les matériaux autres sont du zinc. Ainsi la répartition est 80% PVC contre 20% du zinc.

Nous obtiendrons donc un flux global de zinc majoré.

2.1. Application des règles de passage de la famille des matériaux de rampant au matériau de rampant

L'application des règles s'effectue par zone historique (cf. [Tableau 54](#)). Ainsi, les bâtiments de la « zone historique 1 » sont construits entre 1900 et 1950, à cette époque les zincs

prépatinés n'existaient pas car ils sont apparus à la fin des années 1970 alors que le zinc est apparu sur les toitures à la fin du 19^{ème} siècle. Les toitures sont anciennes, sachant que la durée de vie du zinc est 50 ans donc les toitures en zinc ont été renouvelées au maximum une fois. Nous appliquons les règles suivantes :

- *RIMZ 4* : Le zinc naturel est utilisé pour la rénovation des toitures en zinc ancien.

-*RQMZ-A 1*: Avant 1980, le zinc est 100% du zinc naturel.

Dans la « zone historique 2 », le matériau en zinc est du zinc naturel (comme dans la « zone historique 1 »), alors que, dans la « zone historique 3 », tous les matériaux de zinc (naturel, anthra et quartz) sont présents sauf le zinc coloré en masse apparu en 2005.

Tableau 54 : Les règles appliquées pour la quantification des matériaux de rampants en zinc dans les différentes zones historiques

| Zone historique | Règles appliquées |
|------------------|--|
| 1 (1900-1950) | - <i>RIMZ 4</i> : Le zinc naturel est utilisé pour la rénovation des toitures en zinc ancien. - <i>RQMZ-A 1</i> : Avant 1980, le zinc est 100% du zinc naturel. |
| 2 (1951-1980) | - <i>RQMZ-A 1</i> : Avant 1980, le zinc est 100% du zinc naturel. |
| 3 (1981-2008) | - <i>RQMZ-B 1</i> : Dans la banlieue le zinc en toitures en banlieue est réparti entre 75% de zinc naturel et 25% de zinc patiné (quartz). |

2.2. Application des règles de corrélation entre le matériau du rampant et le matériau de la gouttière

Les règles de corrélation entre le matériau de rampant et le matériau de gouttière ne sont pas toujours disponibles. Ainsi, pour combler ce manque nous utilisons les spécificités de la ville de Créteil et nous appliquons le principe de majoration. Ainsi, comme notre objectif est l'évaluation des émissions du zinc nous donnons plus de poids aux gouttières en zinc par rapport aux autres matériaux (cuivre, PVC...). Nous décrivons en détail l'application de ce principe pour les matériaux des « zones historiques 1 et 2 ». L'ensemble des règles appliquées sont décrites dans le [Tableau 55](#).

2.2.1. « Zone historique 1 » : 1900-1950 et « Zone historique 2 » : 1951-1980

Dans ces deux zones nous utilisons tout d'abord les règles :

- *RIG 3* : Avant les années 1980 les matériaux de gouttières sont majoritairement en zinc et un peu en cuivre.

- *RIG 9* : Avant les années 2000 l'aluminium n'est pas utilisé en gouttière.

- **RIG 10** : Avant les années 1980, le PVC n'est pas utilisé en gouttières.

a. Les tuiles

Dans la « zone historique 1 », d'après l'histoire de la ville de Créteil, les habitants étaient des ouvriers qui habitaient dans des pavillons de toiture en tuiles. D'après Mme Texier, les ouvriers avec des moyens limités ne se permettent pas de mettre du cuivre dans les gouttières. Ainsi, nous considérons que les gouttières sont à 100% du zinc naturel par application du principe de *majoration*. De plus, la plupart des renouvellements de gouttières et de descentes dans les bâtiments avec des toitures en tuile seront faits par le même matériau.

Dans la « zone historique 2 », les toitures en tuiles correspondent aux bâtiments publics (enseignement et de santé). Sachant que cette période de l'histoire de la ville de Créteil a été caractérisée par une construction des tours et des équipements. Une attention particulière a été accordée aux équipements qui doivent être impressionnants par leurs architectures et leurs matériaux puisque la ville de Créteil a été choisie pendant cette époque comme la préfecture du département 94. Donc, il est probable que sur les toitures en tuiles des gouttières en cuivre ont été utilisées. Puisqu'aucune règle quantitative n'est disponible, nous allons appliquer le principe de *majoration* et nous attribuons cette répartition de gouttière de 95% zinc naturel contre 5% du cuivre.

b. Les ardoises

Dans la « zone historique 1 », les toitures en ardoises appartenaient à des propriétés bourgeoises. Nous pouvons donc supposer que ces propriétaires ont les moyens, s'ils le souhaitent, d'installer des gouttières en cuivre. Donc, pour cette époque et sur les toitures en ardoise les matériaux de gouttières sont le zinc et le cuivre. Comme dans le [Chapitre 2.4](#) aucune règle quantitative correspondant à cette époque n'est disponible, nous avons décidé d'appliquer le principe de *majoration*. En fait, comme notre objectif est l'évaluation des émissions du zinc donc nous attribuons cette répartition de gouttière de 95% zinc naturel contre 5% du cuivre.

c. Les couvertures économiques

Les couvertures en acier galvanisé, acier laqué, bardeaux bitumeux et les plaques d'éclairage sont considérées comme des couvertures économiques. D'après les experts de la couverture sur ce type de couverture les gouttières en PVC sont majoritairement utilisées. Or, le PVC en gouttière est apparu en 1980. De plus, les bardeaux bitumineux sont apparus sur le marché de couverture vers les années 1960. Donc, ils ont commencé à être installés sur

les toitures de la « zone historique 1 » après les années 1960 et ainsi avant l'apparition du PVC.

Pour les plaques d'éclairage ce sont des matériaux en plastique apparus en même temps que le PVC. La règle appliquée est *RCGME-A-1* « pour les couvertures en plastique les gouttières en PVC sont toujours utilisées ».

Pour la période historique 1900-1980 (zones historique 1 et 2) aucune règle quantitative n'est disponible pour les différents matériaux économiques. Donc, nous allons appliquer de nouveau le principe de *majoration* en considérant que les gouttières sont à 100% en zinc naturel pour les toitures en acier laqué, en acier galvanisé et en bardeaux bitumineux.

Tableau 55 : Les règles et le principe de majoration appliqués pour la quantification des matériaux de gouttières dans les différentes zones historiques

| Zone historique | Matériau de rampant | Règles et principe de majoration appliqués |
|--------------------------|--|---|
| 1 (1900-1950) | - zinc naturel | - <i>RCGMN-A</i> : Pour une couverture métallique noble (zinc, cuivre, acier inoxydable, aluminium, plomb et cuivre) la gouttière est du même matériau que le rampant. |
| | -tuile -acier laqué -acier galvanisé -bardeaux bitumineux | - <i>Principe de majoration</i> : les gouttières sont à 100% du zinc naturel |
| | - ardoise | - <i>Principe de majoration</i> : la répartition de gouttière est 95% du zinc naturel contre 5% du cuivre. |
| 2 (1951-1980) | -zinc -aluminium naturel -acier inoxydable | - <i>RCGMN-A</i> : Pour une couverture métallique noble (zinc, cuivre, acier inoxydable, aluminium, plomb et cuivre) la gouttière est du même matériau que le rampant. |
| | -tuile | - <i>Principe de majoration</i> : répartition de gouttière de 95% zinc naturel contre 5% du cuivre. |
| 3 (1981-2008) | -zinc -aluminium naturel | - <i>RCGMN-A</i> : Pour une couverture métallique noble (zinc, cuivre, acier inoxydable, aluminium, plomb et cuivre) la gouttière est du même matériau que le rampant. |
| | -acier galvanisé -acier laqué | - <i>RCGME-C 1</i> : Depuis les années 1980, pour une couverture économique (acier laqué, acier galvanisé, bardeaux bitumineux et ardoise fibrociment) la répartition des matériaux de gouttières est de 80% en PVC et 20% en matériaux autres. En appliquant le principe de majoration nous considérons que les matériaux autres sont du zinc. Ainsi la répartition est 80% PVC contre 20% du zinc. - <i>RCGME-C 2</i> : Depuis les années 1980 pour les bardeaux bitumineux les matériaux de gouttières sont répartis entre 70% de zinc et 30% de PVC. |
| | - Tuile | - <i>RCGT-B 3</i> : « Entre les années 1980 et 2000, pour les toitures en tuile, les matériaux de gouttières sont répartis entre 70% zinc naturel, 20% PVC, 5% Aluminium laqué et 5% autres ». Nous attribuons 5% au cuivre. Cette distribution s'étend jusqu'à 2008 car les projets de construction de Créteil ont débuté avant l'année 2000. |
| | - Ardoise | - <i>RCGA-B 1</i> « A partir des années 1980, pour les toitures en ardoise, les matériaux de gouttières sont répartis entre 85% du zinc naturel et 15% de zinc prépatiné en gris foncé ». |

2.3. Application des règles de corrélation entre le matériau du rampant et le matériau de noue

L'évaluation des noues se pose uniquement pour les matériaux non métalliques. En effet, pour les matériaux métalliques la noue est une partie intégrée au rampant et façonnée avec le même matériau. En termes d'émission, il est possible que l'émission par la noue soit différente de celle du rampant du fait que la noue reçoive l'eau de pluie ruisselée sur le rampant. Cette hypothèse n'est pas vérifiée faute de données d'émission par la noue. Dans le [Chapitre 3.1](#), nous avons approximé l'émission de la noue par celle de la gouttière. En comparant l'émission d'une gouttière en zinc par rapport à celle du rampant nous constatons que le flux unitaire du zinc par le rampant ($3,9 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) est supérieur à celui de la gouttière ($1,7 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) ([Robert-Sainte et al., 2009](#)). Ainsi, le fait de considérer la noue comme une partie du rampant permet d'avoir une valeur majorant le flux du zinc. Enfin, à partir des images aériennes et de la BD-TOPO nous évaluons la surface projetée d'un rampant métallique et si nous considérons que la noue est un élément différent du rampant nous risquons de compter deux fois l'émission de la noue.

Donc, pour les matériaux non métalliques, les règles qui sont appliquées sont :

- RCRN-A 3 : Avant les années 1980, pour les toitures en ardoise, les matériaux de noues sont à 100% en zinc naturel. Appliquée pour les deux « zones historiques 1 et 2 ».
- RCRN-A 4 : A partir des années 1980, pour les toitures en ardoise, les matériaux de noues sont répartis entre 90% du zinc naturel et 10% de zinc gris foncé (anthra-zinc). Appliquée pour la « zone historique 3 ».
- RCRN-A 5 : Pour les tuiles les noues sont à 100% en zinc naturel. Appliquées pour trois zones historiques.
- RCRN-A 6 : Pour les bardeaux bitumineux les noues sont à 100% en bardeaux.

2.4. Synthèse de l'application des règles

La quantification des matériaux des différents éléments de toit (rampant, gouttière et noue) est rendue possible à travers l'application des règles empiriques développées dans le [Chapitre 2.4](#). Les répartitions des matériaux des éléments de toit sont illustrées dans le [Tableau 56](#).

Notons que la connaissance de l'histoire urbaine du terrain d'étude, la ville de Créteil, permet de mieux identifier les matériaux de toiture et d'optimiser le calcul. De plus, l'application du

principe de *majoration* est un moyen pour avoir des données quantitatives lorsqu'on ne dispose pas de règles. Ce principe a été appliqué six fois.

Dans ce travail la plupart des règles utilisées sont de type A. Ainsi, nous avons appliqué 9 règles de type A, 2 règles de type B et 3 règles de type C. Nous remarquons bien que l'incertitude se pose plus pour les règles appliquées dans la « zone historique 3 ». Ceci s'explique par le fait que la période datant de 1980 est caractérisée par plus de diversité des matériaux ce qui complique la tâche d'évaluer leurs répartitions réelles.

Tableau 56 : Récapitulatif des distributions des matériaux des différents éléments de toit émetteur du zinc par zone historique

| Zone historique | Matériaux | Rampant | Gouttière | Noue |
|--------------------------|------------------|---|---|---|
| 1 (1900-1950) | Zinc | 100% zinc naturel ancien | 100% zinc naturel ancien | - |
| | Acier laqué | 100% Acier laqué ancien | 100% zinc naturel ancien | - |
| | Acier galvanisé | 100% Acier galvanisé ancien | 100% zinc naturel ancien | - |
| | Tuile | - | 100% zinc naturel ancien | 100% zinc naturel ancien |
| | Ardoise | - | - 95% zinc naturel ancien - 5% cuivre ancien | 100% zinc naturel ancien |
| | Bardeaux | - | 100% zinc naturel ancien | - |
| 2 (1951-1980) | Zinc | 100% zinc naturel ancien | 100% zinc naturel ancien | - |
| | Acier laqué | 100% Acier laqué ancien | 100% zinc naturel ancien | - |
| | Acier galvanisé | 100% Acier galvanisé ancien | 100% zinc naturel ancien | - |
| | Acier inoxydable | 100% Acier inoxydable ancien | 100% Acier inoxydable ancien | - |
| | Tuile | - | - 95% zinc naturel ancien - 5% cuivre ancien | 100% zinc naturel ancien |
| | Bardeaux | - | 100% Acier inoxydable ancien | - |
| 3 (1981-2008) | Zinc | - 75% zinc naturel ancien - 25% quartz-zinc ancien | - 75% zinc naturel ancien - 25% quartz-zinc ancien | - |
| | Acier laqué | 100% Acier laqué ancien | 100% zinc naturel ancien | - |
| | Acier galvanisé | 100% Acier galvanisé ancien | 100% zinc naturel ancien | - |
| | Aluminium | 100% Aluminium naturel ancien | - 100% Aluminium naturel ancien | - |
| | Tuile | - | - 70% zinc naturel ancien - 5% aluminium laqué - 5% cuivre ancien | 100% zinc naturel ancien |
| | Ardoise | - | - 85% zinc naturel ancien - 15% anthra-zinc ancien | - 90% zinc naturel ancien - 10% anthra-zinc ancien |
| | Bardeaux | - | - 70% zinc naturel ancien | - |

3. Calcul du flux du zinc à l'échelle de la ville de Créteil

Le calcul du flux du zinc dans la ville de Créteil est basé sur l'application de l'Equation 2 du Chapitre 2.2. Il s'agit de la somme des flux de toutes les situations-types d'émission du zinc. Dans notre cas ce sont les situations associées au rampant, à la gouttière et à la noue.

$$\text{Équation 4 : } F_{Zn} = \sum_{i=\text{matériau}} (f_{i,\text{rampant}} \times S_{i,\text{rampant}} + f_{i,\text{gouttière}} \times l_{i,\text{gouttière}} + f_{i,\text{noue}} \times l_{i,\text{noue}})$$

$S_{i,\text{rampant}}$ (m^2) : surface du matériau i de rampant

$l_{i,\text{gouttière}}$ (m) : longueur du matériau i de gouttière

$l_{i,\text{noue}}$ (m) : longueur du matériau i de noue

$f_{i,\text{rampant}}$ ($g.m^{-2}.an^{-1}$) ; $f_{i,\text{gouttière}}$ ($g.ml.an^{-1}$) et $f_{i,\text{noue}}$ ($g.ml.an^{-1}$) : ce sont les flux unitaires associés à chaque situation-type d'émission du zinc qui sont décrits dans le Tableau 35 du Chapitre 3.1.

En pratique le calcul sera effectué par entité. Ainsi, le flux du zinc sera calculé pour chaque entité en appliquant l'Equation 4. Le flux total du zinc dans la ville de Créteil est la somme des flux de toutes les entités. Nous obtenons ainsi l'Équation 5 :

$$\text{Équation 5 : } F_{Zn/Ville} = \sum_{j=\text{entité}} F_{Zn,j}$$

$$F_{Zn/Ville} = \sum_{j=\text{entité}} \left(\sum_{i=\text{matériau}} (f_{i,\text{rampant},j} \times S_{i,\text{rampant},j} + f_{i,\text{gouttière},j} \times l_{i,\text{gouttière},j} + f_{i,\text{noue},j} \times l_{i,\text{noue},j}) \right)$$

3.1. Calcul d'incertitude sur le flux global du zinc

L'incertitude sera aussi calculée par entité. Ainsi, d'après l'Équation 4, deux types d'incertitude devront être prises en compte, l'incertitude sur les flux unitaires et l'incertitude sur le calcul des surfaces et des longueurs des éléments de toit.

Dans ce cadre, nous allons utiliser la loi de propagation des incertitudes (norme NF ENV 130005). Pour une grandeur $Y(x_i)$ (dans notre cas F_{Zn}), si $u(x_i)$ est l'incertitude type sur x_i alors l'incertitude sur Y est donnée par l'Équation 6 :

$$\text{Équation 6 : } u(Y)^2 = \sum_i u(x_i)^2 \left(\frac{\partial Y}{\partial x_i} \right)^2 + 2 \cdot \sum_i \sum_j u(x_i, x_j) \cdot \frac{\partial Y}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial Y}{\partial x_j}$$

Dans notre cas, l'hypothèse du calcul est que les variables sont indépendantes : c'est-à-dire la surface ou la longueur et les flux unitaires sont indépendants.

Ainsi nous appliquons l'équation suivante :

$$\text{Équation 7 : } u(Y)^2 = \sum_i u(x_i)^2 \left(\frac{\partial Y}{\partial x_i} \right)^2$$

Dans notre cas nous obtenons l'équation suivante :

$$\text{Équation 8 : } u(F_{Zn})^2 = \sum_i u(x_i)^2 \left(\frac{\partial F_{Zn}}{\partial x_i} \right)^2$$

- avec : $x_i \in [f_{i,rampant}; S_{i,rampant}; f_{i,gouttière}; l_{i,gouttière}; f_{i,noue}; l_{i,noue}]$

$u(x_i) = 1,96\sigma(x_i)$ Demi-intervalle de confiance sur chaque variable.

3.1.1. Incertitude sur les flux unitaires d'émission du zinc

L'incertitude sur l'évaluation des flux unitaires du zinc a été rapportée sous forme de coefficient de variation par [Robert-Sainte \(2009\)](#). Ainsi, pour tous les flux un coefficient de variation a été évalué variant entre 0,2% et 8,5%. Dans notre calcul, nous utilisons la valeur 8,5% par application du principe de *majoration*. Il s'agit de calculer l'erreur maximale induite sur le flux global du zinc dans la ville de Créteil.

3.1.2. Incertitude sur les dimensions des matériaux des différents éléments de toit

Dans ce cas, nous distinguons trois types d'incertitude, la première est liée à l'évaluation de la répartition des familles des matériaux de rampant et leurs longueurs de gouttière et de noues associées. Cette incertitude a été évaluée dans le [Paragraphe 1.1](#) précédent. La deuxième incertitude est liée au fait que nous avons évalué l'émission pour 96,33% de la surface de Créteil (S_1) en choisissant les entités les plus importantes (cf. [Paragraphe 1.1.2](#) précédent). La surface restante est notée S_2 . Cette incertitude (IC_2) est calculée après avoir calculé l'incertitude (IC_1) sur l'émission de la surface (S_1) le flux global de Créteil qui est une proportion de (IC_1).

La troisième incertitude est liée à l'application des règles de quantification. Comme nous avons montré dans le [Chapitre 2.4](#), l'évaluation de cette incertitude est très difficile. Dans le cadre de ce travail non n'allons pas prendre en compte cette incertitude. En revanche il est possible d'élaborer une analyse de sensibilité pour voir l'impact de cette incertitude sur l'évaluation du flux global. En effet, nous avons classifié nos règles des plus certaines au

moins fiables. D'après, le [Paragraphe 2](#), 9 règles appliquées sont du type A, 2 du type B et trois du type C. Les règles A sont certaines alors que les règles B et C ne le sont pas.

Pour analyser la sensibilité de l'application des règles sur le calcul du flux global du zinc, il conviendrait d'appliquer différentes valeurs des coefficients de variation lors de l'application des règles B et C. Les règles A sont considérées comme validées. Les règles B sont plus fiables que les règles C et donc les coefficients de variation sont plus petits pour les règles B que ceux pour les règles C. Par exemple, une incertitude de 10% pourrait être attribuée aux règles B contre 40% aux règles C suivi d'un calcul d'incertitude sur le flux total. Ce travail devrait être testé pour plusieurs valeurs en se fixant un pas (de 5% par exemple). Enfin, ayant déjà tous les calculs effectués pour Créteil il s'agit uniquement d'appliquer les coefficients de variation dans les endroits où nous avons utilisé une règle C ou B.

Notons que les incertitudes liées à l'utilisation des bases de données urbaines (BD-TOPO et MOS), l'identification des familles des matériaux de toiture ainsi que la mesure manuelle des longueurs projetées de gouttières et de noues ne peuvent pas être évaluées et donc elles sont négligées.

3.1.3. Démarche de calcul de l'incertitude

En pratique, pour chaque entité nous calculons l'incertitude sur le flux issu de chaque matériau d'un élément de toit puis nous calculons l'incertitude totale sur l'entité pour arriver au calcul de l'incertitude globale sur le flux de toute la ville (cf. [Équation 9](#)). Ce calcul combine l'incertitude sur le flux unitaire du contaminant et l'incertitude sur la dimension de l'élément du toit établie dans le [Tableau 51](#). Les incertitudes sont sous forme de demi-intervalle de confiance ($IC = \pm 1,96.\sigma$).

$$\text{Équation 9 : } IC_{\text{matériau}} = \sqrt{(D \times IC_f)^2 + (f \times IC_e)^2}$$

$$IC_{\text{entité}} = \sqrt{\sum_{i=\text{matériau}} (IC_i^2)}$$

$$IC_{\text{ville}} = \sqrt{\sum_{i=\text{entité}} (IC_i^2)}$$

Avec :

- $IC_{\text{matériau}}$: demi-intervalle de confiance sur l'évaluation du flux d'un contaminant donné émis par un matériau.
- D : dimension qui peut être une surface (m^2) ou une longueur (ml) du matériau de l'élément du toit

- f : le flux unitaire pour un matériau localisé sur un élément du toit peut être en $\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ou en $\text{g.ml}^{-1}.\text{an}^{-1}$.

- IC_e : demi-intervalle de confiance sur l'évaluation de la dimension de l'élément du toit établi dans le [Tableau 51](#) du [Paragraphe 1.1.4](#) précédent.

- IC_f : demi-intervalle de confiance sur l'évaluation des flux unitaires d'un contaminant donné.

- $IC_{entité}$: demi-intervalle de confiance sur l'évaluation du flux d'un contaminant donné dans une entité.

- IC_{ville} : demi-intervalle de confiance total sur l'évaluation du flux d'un contaminant donné dans la ville d'étude.

3.2. Analyses des résultats

Dans ce paragraphe, tout d'abord, nous allons analyser les résultats de l'évaluation de la distribution des matériaux de toiture dans la ville de Créteil par classe de bâtiments et par zone historique. Ensuite, nous présentons les résultats du flux d'émission du zinc dans la ville de Créteil.

3.2.1. Variabilité de la distribution des matériaux par zone historique

La distribution des matériaux de toiture est variable d'une zone historique à une autre ([cf. Figure 118](#)). Ce constat confirme bien notre étude historique de la ville de Créteil ([cf. Chapitre 3.1](#)). Ainsi, la « zone historique 1 » est caractérisée par une majorité des toitures en tuile (environ 81% de la surface totale des toitures de la zone). Alors que les toitures de la « zone historique 2 » sont en majorité des toitures-terrasses (85% de la surface totale des toitures de la zone). La « zone historique 3 » est caractérisée par environ 66% de toitures-terrasses mais les toitures inclinées sont également bien présentes dans le paysage avec environ 32% de la surface totale des toitures de la zone, les tuiles en particulier représentent 20%. Ceci a été décrit dans l'histoire comme un retour des toitures inclinées sur le paysage après une absence durant la période historique (1950-1980).

Donc, le calcul effectué à Créteil montre bien que le découpage en zones historiques de l'échelle urbaine considérée permet de mieux quantifier les matériaux de toiture à l'échelle urbaine.

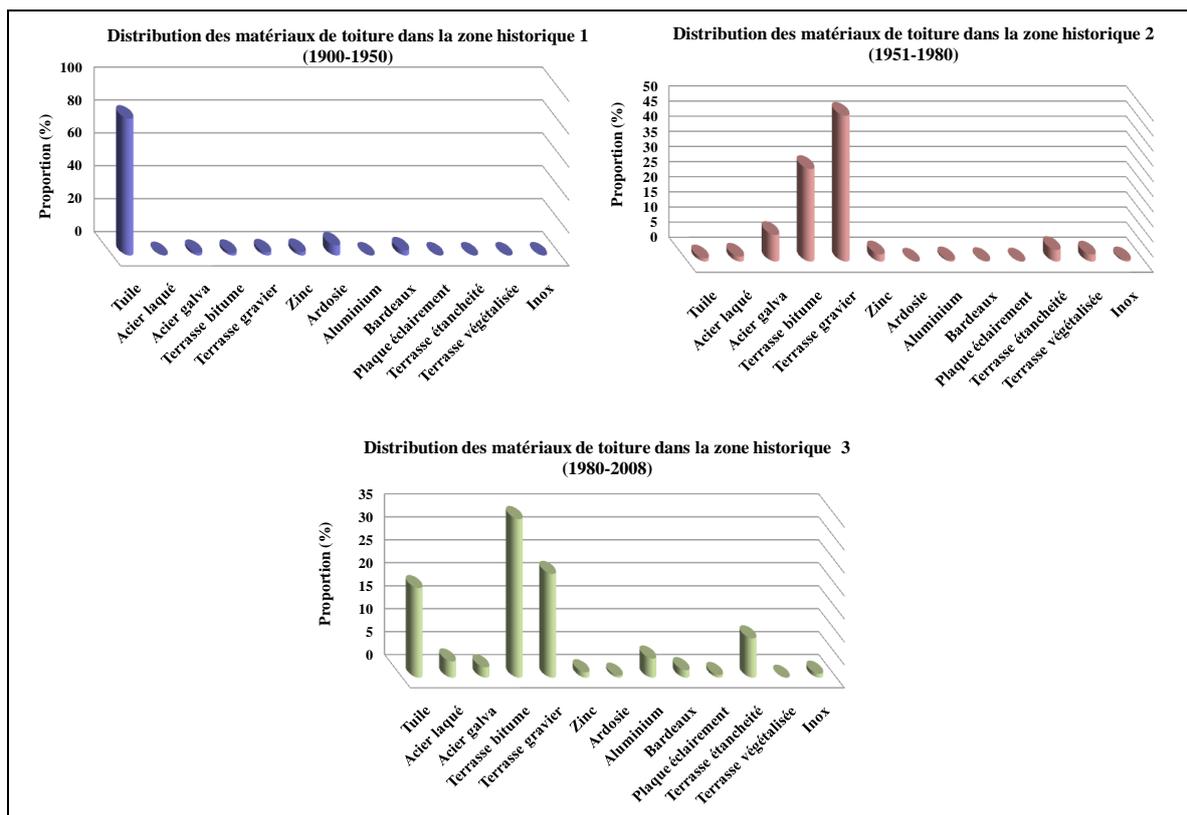


Figure 118 : Variabilité de la distribution des matériaux par zone historique

3.2.2. Variabilité de la distribution des matériaux par classe de bâtiments

Dans le [Chapitre 2.3](#) nous avons créé 13 classes de bâtiments à partir de la réorganisation de la base MOS-IAU. Il s'agit d'une opération de regroupement des différents MOS en se basant sur les analyses des entretiens avec les experts des matériaux de toiture. Le travail de regroupement de MOS effectué a été arrêté en obtenant 13 classes. Or, d'après les experts une deuxième opération de regroupement peut être rajoutée. Ainsi, ils ont proposé de rajouter les regroupements suivants :

- *Regroupement 1 : Bâtiment tertiaire = Bureau + bâtiment public (équipement administratif, équipement d'enseignement, équipement de santé)*
- *Regroupement 2 : Activité secondaire + surface commerciale + transport*

Ce regroupement a été basé sur le critère technique de la mise en œuvre de toiture. En effet, en fonction de la surface de la toiture un choix de matériau de toiture est privilégié. Ainsi, les toitures de très grandes surfaces nécessitent des matériaux en grands éléments ou sont des terrasses. Par rapport à la distribution des matériaux de toiture ce regroupement ne peut pas être effectué. C'est pour cela nous avons décidé de garder les 13 classes et d'analyser, dans le cas de Créteil, la distribution des matériaux de toiture par classe de bâtiments.

Ainsi, dans le cas de Créteil, nous allons comparer la distribution des matériaux de toiture des différentes classes de bâtiments dans les trois zones historiques.

d. Regroupement 1 proposé

La comparaison des classes de bâtiments du premier regroupement proposé montre une nette variabilité de leur distribution de matériaux surtout dans la « zone historique 1 » (cf. Figure 119).

Pour la « zone historique 2 », nous avons des réponses plus homogènes et très proches pour trois classes de bâtiments : « bureau », « équipement d'enseignement » et « équipement de santé ». Pour la classe « équipement administratif » sa distribution de matériaux de toiture est légèrement différente par rapport aux autres. Cette différence se manifeste au niveau de la proportion des toitures-terrasses en bitume et des terrasses en gravier. En revanche, comme pour les trois autres classes de bâtiments, la majorité des toitures de la classe « équipement administratif » (environ 81%) est formée par des terrasses. Pour la « zone historique 3 », les deux classes « bureau » et « équipement d'enseignement » ont des distributions de matériaux très différentes avec une majorité de toitures-terrasses pour la classe « équipement d'enseignement » contre une majorité de toitures en tuiles pour la classe « bureau ».

Pour résumer, le regroupement peut être effectué uniquement pour la « zone historique 2 ». En effet, comme nous avons vu dans les [Chapitre 2.4](#) et [3.1](#) cette zone historique de 1950 à 1980 (les trente glorieuses) a été caractérisée par la mise en œuvre des toitures-terrasses et ce mouvement a été généralisé pour toute la France. Ainsi, dans une zone urbaine construite dans cette période nous pouvons regrouper les classes de bâtiments : « bureau », « équipement administratifs », « équipement d'enseignement » et « équipement de santé » dans une seule classe appelée « *Bâtiment tertiaire* ».

Donc, le regroupement 1 proposé par les experts n'est pas toujours validé. Pour les « zones 1 et 3 » ces classes ne peuvent pas être regroupées même deux à deux. Ainsi, regroupement 1 ne peut pas être généralisé et appliqué.

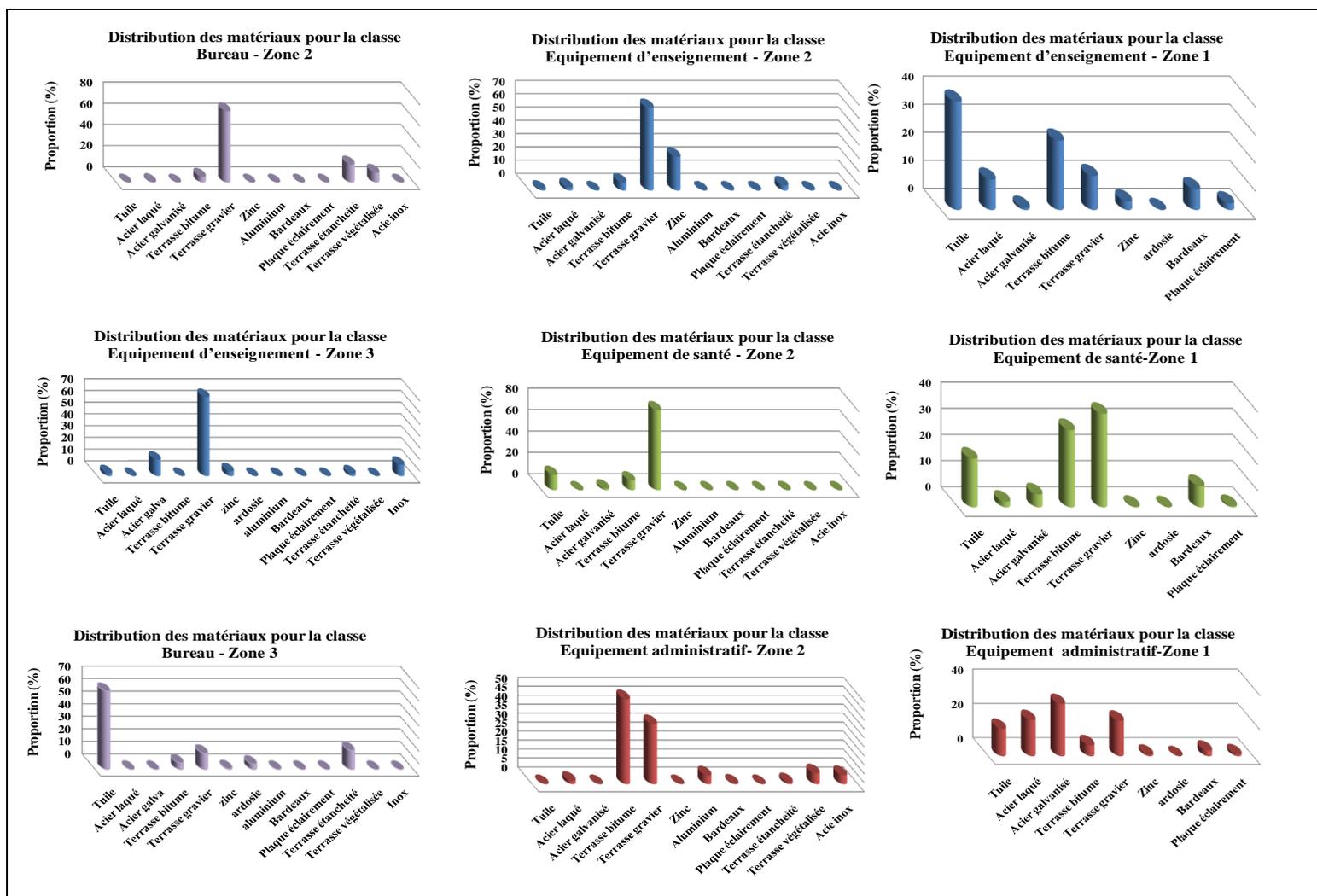


Figure 119 : Distribution des matériaux de toiture des classes : « Bureau », « Equipement administratif », « Equipement d'enseignement » et « Equipement de santé » dans les trois zones historiques

e. Regroupement 2 proposé

Dans la « zone historique 1 », la répartition des matériaux de toiture a été uniquement calculée pour la classe « activité secondaire », les deux autres classes ayant des surfaces très petites ont été négligées (cf. Paragraphe 1.1.2). Ainsi, la comparaison de la distribution des matériaux de toiture est effectuée pour les classes des « zones 2 et 3 » (cf. Figure 120).

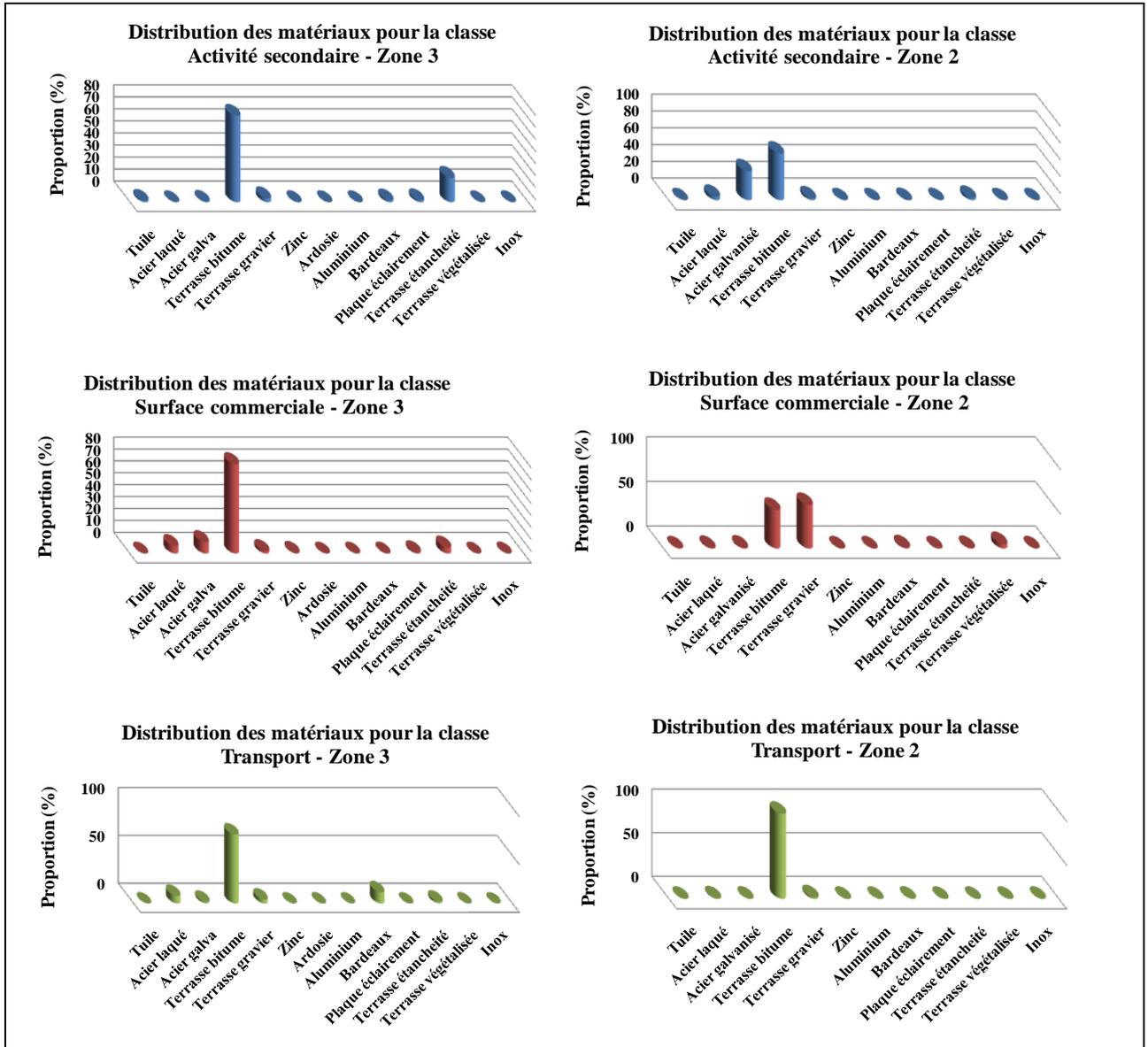


Figure 120 : Distribution des matériaux de toiture des classes : activité secondaire, surface commerciale, transport dans les deux zones historiques (2 et 3)

Dans la « zone historique 3 », les distributions des matériaux de toitures dans les trois classes de bâtiments sont très similaires. Elles sont caractérisées par une majorité des toitures-terrasses, environ 70% de la surface des toitures de chaque classe. Dans la « zone historique 2 », nous notons une légère variabilité dans les distributions des matériaux. La majorité des

toitures sont des terrasses mais pour la classe « activité secondaire », l'acier galvanisé occupe une place importante avec 34,5% des toitures. Ainsi, si nous décidons de regrouper la classe « activité secondaire » avec les classes « surface commerciale » et « transport » les toitures en acier galvanisé risque d'être mal estimées. Nous pensons qu'il est plus légitime de regrouper uniquement la classes « surface commerciale » et la « classe transport » qui, dans les deux zones historiques, présentent une majorité des toitures-terrasses, plus que de 90% de la surface des toitures de chaque classe dans la « zone historique 2 » contre plus que de 70% dans la « zone historique 3 ».

Une nouvelle classe est créée. Elle est appelée *classe transport/commerce : surface commerciale + transport*.

3.2.3. Variabilité de l'émission du zinc

L'émission du zinc par les toitures à l'échelle de la ville dépend d'une part de la surface des toitures de l'entité et, d'autre part, des classes de bâtiments présentes dans l'entité (cf. [Tableau 57](#)). Par exemple, dans la « zone historique 2 », les toitures de la classe « habitat collectif » (environ 21% de la surface totale des toitures de la zone) contribuent à 7,6 kg.Zn.an⁻¹ alors que la classe « activité secondaire » (environ 25% de la surface totale) contribue à 250,3 kg.Zn.an⁻¹. Ceci s'explique par une majorité des toitures-terrasses dans la classe « habitat collectif » et des toitures en acier galvanisé représentant 34,5% des toitures de la classe « activité secondaire».

Tableau 57 : Variabilité de l'émission du zinc dans la « zone historique 2 »

| Entité (Zone 2) | Surface (m ²) | Distribution des surfaces (%) | Flux annuel du zinc ± IC (Kg/an) | Distribution du flux (%) |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Habitat collectif | 297918 | 20,91 | 7,6 ± 23,8 | 1,7 |
| Activité secondaire | 355936 | 24,98 | 250,3 ± 92,4 | 57,2 |
| Equipement d'enseignement | 127739 | 8,96 | 149,4 ± 59,5 | 34,1 |
| Equipement administratif | 122700 | 8,61 | 0,4 ± 0,2 | 0,1 |
| Equipement de santé | 102904 | 7,22 | 6,2 ± 3,3 | 1,4 |
| Bureau | 214811 | 15,07 | 0,3 ± 0,1 | 0,1 |
| Surface commerciale | 117896 | 8,27 | 23 ± 4,4 | 5,3 |
| Transport | 85152 | 5,98 | 0,4 ± 0 | 0,1 |

L'émission du zinc par les toitures à l'échelle de la ville dépend énormément de la période de construction d'une classe de bâtiment (cf. [Tableau 58](#)). En effet, si nous prenons la classe « habitat collectif » son flux unitaire du zinc est le plus important pour la période 1900-1950 avec 0,67 g/an/m². Ce flux chute pour la période 1951-1980 pour atteindre 0,025 g/an/m². Ceci s'explique par un facteur purement historique, car la période 1951-1980 correspond au trente glorieuse durant laquelle la construction des habitats collectifs se manifeste par des tours avec des toitures-terrasses. Durant cette époque une attention particulière a été accordée aux équipements en mettant en œuvre des matériaux nobles tels que l'inox et le zinc. Par exemple, environ 20% des toitures de la classe « équipement d'enseignement » sont en zinc (cf. [Figure 119](#)). Ainsi, le flux du zinc correspondant est important avec 1,17 g/an/m².

Dans la zone historique 1 (1900-1950) et plus précisément avant les trente glorieuses nous remarquons que l'émission du zinc par les différentes classes de bâtiments est presque « homogène » ceci s'explique par la prédominance des toitures en tuiles dans les différentes classes.

La zone historique 3 (1981-2008) est la moins émettrice du zinc avec 50,32 kg/an par rapport aux autres zones historique. En effet, le prix du zinc est de plus en plus élevé ce qui limite son utilisation en tant que rampant et reste limité aux constructions prestigieuses. De plus, l'acier galvanisé est remplacé par l'acier laqué qui est plus durable est moins émetteur du zinc. Ceci explique que la classe « activité secondaire » construite dans cette zone 3 est moins émettrice de zinc que dans la période 1951-1980 durant laquelle l'acier galvanisé a été beaucoup utilisé (34,5% des toitures de la classe « activité secondaire » (cf. [Figure 120](#))).

Donc, le facteur historique et les tendances urbaines influent significativement sur l'émission du zinc à l'échelle de la ville. Ainsi, pour chaque classe de bâtiment construite durant une période historique précise correspond un ratio d'émission du zinc spécifique. Il sera intéressant de valider ce constat dans d'autres villes. En d'autres termes, parmi les perspectives de notre thèse est d'appliquer notre méthode au moins sur trois autres villes pour ressortir des ratios d'émission généraux par classe de bâtiments et par zone historique applicables à toutes villes.

Tableau 58 : Variabilité de l'émission du zinc entre les différentes zones historiques

| Classe de bâtiment | Zone historique 1 (1900-1950) | | Zone historique 2 (1951-1980) | | Zone historique 3 (1981-2008) | |
|---------------------------|----------------------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------------|---|
| | Flux annuel du zinc ± IC (Kg/an) | Flux unitaire du zinc ± IC (g/an/m ²) | Flux annuel du zinc ± IC (Kg/an) | Flux unitaire du zinc ± IC (g/an/m ²) | Flux annuel du zinc ± IC (Kg/an) | Flux unitaire du zinc ± IC (g/an/m ²) |
| Habitat individuel | 111,4±48,3 | 0,33±0,144 | - | - | - | - |
| Habitat collectif | 142,7±64,9 | 0,67±0,306 | 7,6 ± 23,8 | 0,025±0,08 | 11,6±15,2 | 0,08±1,3 |
| Activité secondaire | 13,3±4,7 | 0,29±0,104 | 250,3 ± 92,4 | 0,703±0,26 | 1,2±3,6 | 0,01±3 |
| Equipement d'enseignement | 11,4±5,1 | 0,27±0,123 | 149,4 ± 59,5 | 1,17±0,47 | 17,7±3,7 | 0,44±0,21 |
| Equipement administratif | 35,8±9 | 0,73±0,184 | 0,4 ± 0,2 | 0,003±0,002 | - | - |
| Equipement de santé | 10,9±2 | 0,42±0,077 | 6,2 ± 3,3 | 0,06±0,03 | - | - |
| Bureau | - | - | 0,3 ± 0,1 | 0,001±0,0004 | 4,2±0,5 | 0,09±0,12 |
| Surface commerciale | - | - | 23 ± 4,4 | 0,195±0,04 | 6,7±0 | 0,22±0 |
| Sport | - | - | - | - | 1,4±0 | 0,34±0 |
| Transport | - | - | 0,4 ± 0 | 0,005±0 | 7,4±0 | 0,05±0 |
| Flux par zone | 325,38±81,76 | 0,46±0,12 | 437,69±112,63 | 0,31±0,08 | 50,32±16,02 | 0,11±0,32 |

(-) Données non calculées ; Les cases en bleu correspondent au flux unitaire par m² de toiture d'une entité

Les toitures en zinc sont très limitées à Créteil, elles représentent 1,2% de la surface totale des toitures. En revanche, le rampant est la source la plus importante d'émission du zinc dans la ville de Créteil avec 83,1% de l'émission totale. Ceci s'explique par la contribution importante des autres rampants métalliques en particulier l'acier galvanisé. De plus, au total les matériaux métalliques occupent 12,2% de la surface totale des toitures. Ils contribuent à un flux de 675 Kg.Zn.an⁻¹. L'émission des gouttières représente 15,6% de l'émission totale contre 1,3% pour les noues. En revanche, en regardant la distribution de l'émission des classes de bâtiments de la « zone historique 1 », nous remarquons une variabilité de l'importance de la contribution de chaque élément de toit en fonction de la classe de bâtiments. Ainsi, pour l'habitat individuel ayant une majorité des toitures en tuile (83% de tuile ; 2,2% en zinc), les gouttières sont la source la plus importante d'émission du zinc par rapport au rampant (19,3% contre 12,8% pour le rampant de l'émission totale de la « zone historique 1 ») (cf. Figure 121). De plus, même si les émissions du zinc par les noues sont les plus faibles à l'échelle de Créteil, nous remarquons que l'importance de ces émissions varie d'une classe de bâtiment à une autre.

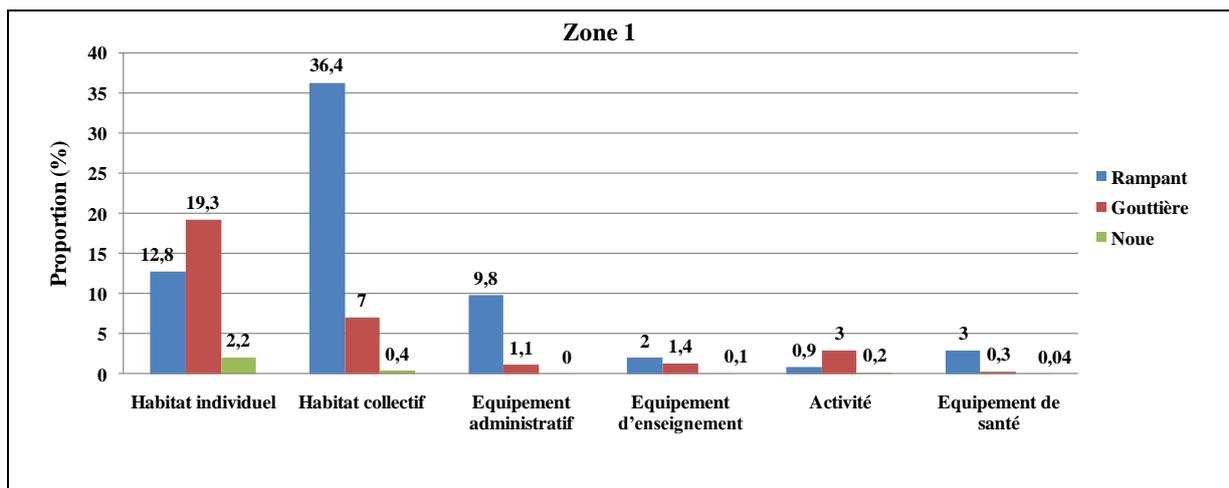


Figure 121 : Distribution du flux du zinc dans la « zone historique 1 » émis par les rampants, les gouttières et les noues

D'après la Figure 121, le flux du zinc émis par les noues de la classe « habitat individuel » (2,2% du total de l'émission de la « zone historique 1 ») est plus important que ceux émis par les gouttières de la classe « équipement administratif » (1,1%), des rampants de la classe « activité secondaire » (0,9%) et des rampants de la classe « équipement d'enseignement » (2%). Donc, même si les éléments de toiture (gouttières et noues) représentent une faible surface par rapport au rampant, leurs émissions de zinc est importante et ne peut être négligée. Pour l'étude de l'émission d'un contaminant à l'échelle d'une ville, l'émission par les gouttières devra être évaluée pour toutes les classes de bâtiments, alors que pour les noues les classes décisives dans l'émission de contaminants sont « l'habitat individuel » et « l'habitat collectif ». Notons que les descentes n'ont pas été prises en compte dans notre modèle faute de données de flux unitaires associées à ces descentes. Néanmoins, les descentes pourraient également constituer une source importante de zinc surtout que d'après la règle *RQD-A* elles ont les mêmes matériaux que les gouttières.

3.2.4. Flux global du zinc à l'échelle de la ville de Créteil

Avec notre méthode d'évaluation d'émission du zinc à l'échelle de la ville de Créteil nous avons estimé un flux de zinc de 813 Kg.an^{-1} avec une erreur relative de 16,6% et un intervalle de confiance de cette estimation à 95% :

$$F_{Zn}(\text{Créteil}) = 813 \pm 135(\text{Kg.an}^{-1})$$

Notons que les incertitudes liées à l'application des règles ne sont pas prises en compte dans ce résultat. De plus, nous avons utilisé le principe de majoration, donc la valeur du flux obtenue est une valeur maximale.

Ce résultat est satisfaisant : il montre qu'avec un tirage de 18% de « bâtiments » de la ville de Créteil réparti sur des zones rendues homogènes par rapport à notre problématique (classe de bâtiments localisée dans une zone historique), il a été possible de limiter l'incertitude. Il faut également noter que la méthode statistique a été basée sur le choix des tailles d'échantillonnage à partir de la courbe la moins exigeante (pour une erreur absolue à 16%) (cf. Chapitre 3.2).

Dans la littérature, l'évaluation de l'incertitude sur des flux de contaminants à grande échelle est très limitée. Une équipe de Lausanne (Coutu *et al*, 2012) a développé une méthode pour évaluer l'émission des biocides par les façades à l'échelle de la ville (cf. Chapitre 2.3). Cette méthode a été basée sur une approche stochastique et a permis d'estimer l'émission des biocides à $900 \pm 50 \text{ Kg.an}^{-1}$, soit donc une incertitude de 5,5%. Ce résultat est meilleur que le notre, ceci s'explique, d'une part, par un nombre de paramètres différents dans les deux études. En effet, l'évaluation des émissions des biocides concerne uniquement les façades alors que dans notre étude l'émission du zinc a été évaluée pour trois différents éléments de toitures ce qui explique l'augmentation de l'incertitude. D'autre part, l'incertitude sur l'évaluation des paramètres d'émissions des biocides a été limitée à une erreur relative de 20% et les chercheurs ont noté que s'ils augmentent cette erreur relative à 35% et 50%, ils obtiendront des incertitudes de 9% et 13% respectivement sur le calcul de l'émission totale des biocides à l'échelle de la ville. Dans notre méthode nous avons effectué un échantillonnage pour l'estimation des dimensions des éléments de toiture à partir de la courbe la moins exigeante (pour une erreur absolue à 16%). Ainsi, si nous voulons améliorer les résultats il convient de choisir des échantillons à partir des courbes les plus exigeantes mais qui sont plus coûteuses en temps de calcul.

La validation de notre méthode est très difficile. D'une part, en pratique il est très difficile de mesurer expérimentalement les émissions des toitures en installant des systèmes de collecte d'eau de pluie sur toutes les toitures d'une ville. D'autre part, les mesures effectuées à partir des eaux pluviales collectées dans les réseaux d'assainissement sont un mélange de contaminants issus de différentes surfaces urbaines. Enfin, à Créteil, aucune donnée expérimentale des émissions du zinc par les toitures ou par d'autres sources n'a été trouvée. Néanmoins, quelques valeurs de flux du zinc ont été identifiées dans la littérature. Nous

distinguons, des flux estimés à partir de l'extrapolation des mesures effectuées dans les eaux de ruissellement des toitures ou des flux mesurés dans les réseaux d'assainissement à l'échelle du bassin versant. Ainsi, nous comparons nos résultats aux valeurs trouvées dans la littérature (cf. Tableau 59).

Tableau 59: Comparaison du flux annuel du zinc issus de différentes sources et dans différents sites (Sellami-Kaaniche *et al.*, 2013)

| Sources | Flux annuels moyens du Zinc ($\text{mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) | Site | Références |
|--|---|--|---|
| Toitures | 315 ($\pm 52,3$) | Créteil (France) : 1,2% des toitures sont en zinc | Notre étude |
| | 478 | Site Résidentiel : 3,3% des toitures sont en zinc (Nantes, France) | (Lamprea, 2009) |
| | 1952 | Site Résidentiel: 50% des toitures sont en zinc (Paris, France) | (Thévenot <i>et al.</i> , 2007) |
| Atmosphère | 34,2 | Créteil (France) | (Robert-Sainte <i>et al.</i> , 2009) |
| | 15 - 140 | France | (Azimi <i>et al.</i> , 2005; Bressy, 2010; Garnaud <i>et al.</i> , 1999; Lamprea, 2009; Sabin <i>et al.</i> , 2005) |
| Eau pluviale à l'échelle du bassin versant | 240 - 430 | Site Résidentiel: 30% des toitures sont en zinc (Noisy-le-Grand, France) | (Bressy, 2010) |
| | 4 - 80 | Site Résidentiel (Florida, USA) | (Wong <i>et al.</i> , 2000) |
| | 39,8 | Site Résidentiel: 3,3% des toitures sont en zinc (Nantes, France) | (Lamprea, 2009) |
| | 50,2 | Site mixte (Nantes, France) | |
| | 54,8 | Site industriel (Lyon, France) | (Becouze, 2010) |

Les évaluations des flux annuels du zinc issus des toitures à grandes échelles sont très limitées dans la littérature (cf. Tableau 59). Nous trouvons quelques travaux menés en France. Dans ce cadre, l'évaluation du flux annuel du zinc issu des toitures a été effectuée à partir d'une extrapolation approximative des mesures effectuées en aval de quelques toitures expérimentales. Dans un site résidentiel à Nantes le flux moyen du zinc issu des toitures est de : $478 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Ce site est caractérisé par des toitures en tuile, en ardoise, en bitume et en zinc. Les toitures en zinc représentent 3,3% de la surface totale des toitures. Dans le quartier du Marais (Paris), où 50% des toitures sont en zinc, le flux annuel de zinc émis par les toitures est de $1952 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Dans ces travaux l'évaluation de l'incertitude n'a pas été effectuée mais les auteurs indiquent qu'il y a beaucoup d'incertitude dans l'extrapolation des données mesurées vers le calcul des flux (Thévenot *et al.*, 2007). Pour Créteil, ayant 1,2% de ses toitures en zinc et 2,6% en acier galvanisé (ayant une émission du zinc non négligeable), le flux moyen de zinc que nous avons calculé est de $315 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Ainsi, cette valeur du flux estimée dans notre étude se situe bien dans la gamme des valeurs rapportées pour des études menées en France.

Pour les eaux pluviales les mesures sont effectuées à l'exutoire dans les réseaux d'assainissement pluviaux (cf. [Tableau 59](#)). Ainsi, à l'échelle du bassin versant le flux du zinc évalué dans les eaux pluviales englobe tous les flux issus de plusieurs sources (toiture, espace vert, chaussée...). Plusieurs études ont évalué le flux de zinc dans différents sites en France et aux Etats-Unis. A l'échelle d'un bassin versant ayant 30% de ses toitures en zinc, le flux du zinc dans les eaux pluviales (issus de différentes sources) est très élevé (entre 240 et 430 $\text{mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) par rapport à celui mesuré dans un site avec 3,3% des toitures en zinc (39,8 $\text{mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$). De plus, dans notre étude nous nous sommes limités à l'évaluation du flux uniquement par les toitures. Ainsi, les toitures sont une source importante d'émission du zinc à l'échelle du bassin versant.

A Créteil, [Robert-Sainte \(2009\)](#) a évalué le flux annuel du zinc issus des retombées atmosphériques (34,2 $\text{mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$). Cette valeur se situe bien dans la gamme des valeurs rapportées dans les sites français. Ainsi, les toitures sont une source importante des émissions du zinc à Créteil par rapport à l'atmosphère, ceci peut s'expliquer par les activités industrielles sont limitées (20% de la surface de Créteil) et donc leur émission du zinc dans l'atmosphère est faible.

4. Synthèse

Dans ce chapitre nous avons concrétisé notre méthode d'évaluation des flux de contaminants issus des toitures à l'échelle urbaine à travers l'évaluation du flux du zinc dans la ville de Créteil.

Nous avons appliqué la méthode statistique développée dans le [Chapitre 3.2](#) et nous avons montré que des tailles d'échantillonnage à partir de la courbe à 16% d'erreur absolue assurent 16,6% d'incertitude sur le flux global du zinc à l'échelle de la ville.

Les règles empiriques élaborées dans le [Chapitre 2.4](#) ont été aussi appliquées mais elles n'étaient pas toujours suffisantes pour avoir des données quantifiées. Ainsi, nous avons utilisé les connaissances et les spécificités de Créteil et le principe de majoration pour résoudre quelques ambiguïtés.

Le découpage de la ville en entités caractérisées par une classe de bâtiments localisée dans une zone historique est bien justifié à travers les résultats du calcul. En effet, nous avons montré qu'il y a vraiment une variabilité de la distribution des matériaux de toitures par classe de bâtiments et par zone historique et ainsi une variabilité d'émission du zinc.

Le rampant est la principale source d'émission du zinc mais les émissions par les autres éléments de toit ne doivent pas être négligées.

Nous avons essayé de valider nos résultats en les comparant à d'autres études que ce soit au niveau du flux calculé ou au niveau de l'incertitude évaluée. La comparaison montre que les résultats de notre étude rentrent bien dans la gamme des valeurs identifiées dans la littérature. Une validation plus approfondie de cette méthode pourrait être effectuée dans le cadre d'un modèle intégré d'évaluation des flux de contaminants issus de différentes sources dans une ville. Mais même avec de telle approche, cette validation demeure difficile car les processus au niveau des réseaux d'assainissement sont très mal connus à ce jour.

Enfin, la méthode développée devra être reformulée sous forme générique pour pouvoir l'appliquer à d'autres contaminants et d'autres villes. Ainsi, la généralisation de la méthode à d'autres contaminants et d'autres villes est décrite dans le [Chapitre 3.4](#) suivant. Notons que cette méthode a fait l'objet d'une publication ([Sellami-Kaaniche et al. 2013b](#)).

Chapitre 3.4. Méthode générale pratique d'évaluation de flux de contaminant à l'échelle d'une ville

Ce travail de thèse nous a permis de développer une méthode générale d'évaluation des flux de contaminants dans le ruissellement des matériaux de toiture à l'échelle d'une ville : cette méthode a été élaborée sur l'exemple du zinc dans la ville de Créteil.

L'objectif de ce chapitre est d'étendre cette méthode à d'autres contaminants et d'autres villes. Ainsi, la première section de ce chapitre est consacrée à présenter les différents principes de la méthode. La deuxième section décrit la démarche opérationnelle d'application de la méthode à d'autres villes et d'autres contaminants. En d'autres termes, c'est la description du « mode d'emploi de la méthode ». Enfin, la dernière section présente des pistes d'approfondissement de la méthode.

Notons que les annexes à la fin du chapitre sont extraits de tout le manuscrit et consistent les éléments nécessaires pour appliquer la méthode.

1. Présentation générale de la méthode

L'objectif de cette section est de décrire les différents principes utilisés pour élaborer la méthode d'évaluation des flux de contaminants émis par les matériaux de toitures à l'échelle d'une ville.

1.1. Finalité de la méthode

Cette méthode permet d'évaluer le flux annuel d'un contaminant émis dans le ruissellement des matériaux des différents éléments de toiture à l'échelle d'une ville.

La description des éléments de toitures (incliné et terrasse) entrant en contact avec l'eau sont illustrés dans les [Figure-A 1](#), [Figure-A 2](#) (à la fin du chapitre).

L'évaluation de l'émission d'un contaminant à grande échelle dépend de deux principaux paramètres : *les dimensions des matériaux des différents éléments du toit (surface ou longueur)* et *les flux unitaires annuels moyens d'émission du contaminant associés à ces matériaux*. Ainsi, la méthode développée pour évaluer ces paramètres est décrite dans la [Figure 122](#).

1.2. Principes de la méthode

La mise en œuvre de la méthode repose, tout d'abord, sur le concept de la *situation-type d'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture à l'échelle du toit*. Elle est définie comme un cas élémentaire d'émission d'un contaminant caractérisé par son appartenance à un matériau et sa localisation sur le toit. A chaque situation-type est associé un *flux unitaire unique* (flux annuel par m² projeté ou par ml projeté de matériau) d'émission d'un contaminant. La notion de situation-type est une notion générale applicable pour tout contaminant. Elle permet le passage de l'échelle du toit à l'échelle urbaine, c'est une nouvelle définition de l'émission à l'échelle du toit incluant uniquement les paramètres pertinents à l'échelle urbaine.

Ensuite, ayant défini toutes les situations-types d'émission d'un contaminant donné, il s'agit de quantifier les dimensions des matériaux des différents éléments de toiture associés à chaque situation-type. La méthode de quantification est basée sur trois étapes :

- La première étape consiste à découper la ville en entités homogènes en termes de classes de bâtiments localisées dans une zone historique.
- La deuxième étape, appliquée à chaque entité, consiste à quantifier les surfaces des familles des matériaux de rampant et leurs longueurs de gouttières et de noues associées à partir d'une approche statistique en conjonction avec l'interprétation des photos aériennes croisée avec des règles d'identification des matériaux de toiture à l'échelle urbaine.
- La troisième étape permet à travers l'application des règles de quantification d'évaluer les dimensions des matériaux de toiture.

Enfin, le flux d'émission F_c d'un contaminant C par les matériaux de toiture s'écrit comme la somme des émissions de toutes les situations-types associées à ce contaminant. Chaque situation-type (ST) se traduit par son flux unitaire (f) et sa dimension (D) pour un matériau donné (cf. Equation 10).

$$\text{Equation 10 : } F_C = \sum_{i=ST} f_i \times D_i$$

La dimension de la situation-type correspond à la dimension du matériau de l'élément du toit. Le flux unitaire correspond à l'émission du contaminant par un matériau localisé sur un élément du toit. Donc l'équation 1 peut être réécrite par l'Equation 11.

$$\text{Equation 11 : } F_C = \sum_{i=\text{matériau}} \left(\sum_{j=\text{élément.toit}} (f_{i,j} \times D_{i,j}) \right)$$

D_{ij} : la dimension peut être une surface (m^2) ou une longueur (ml) de l'élément du toit.

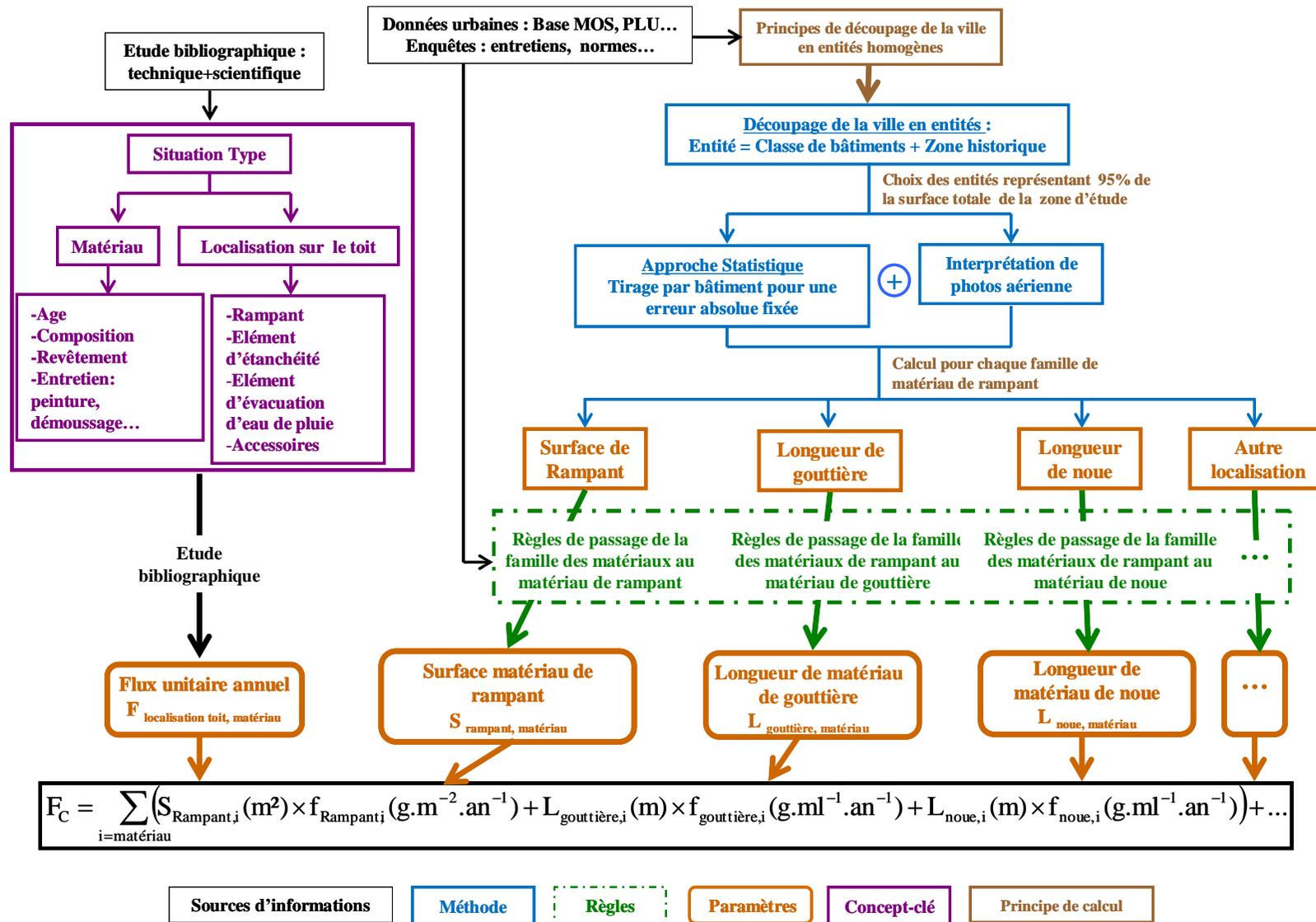
f_{ij} : le flux unitaire pour un matériau localisé sur un élément du toit peut être en $g.m^{-2}.an^{-1}$ ou en $g.ml^{-1}.an^{-1}$.

1.3. Schéma de synthèse de la méthode

Les différentes étapes de l'élaboration de la méthode sont schématisées dans la [Figure 122](#).

Notons que les familles de matériaux et les matériaux employés sur une toiture (incliné et terrasse) sont décrits dans [Tableau-A1](#), [Tableau-A2](#) et [Tableau-A3](#) (à la fin du chapitre).

Figure 122 : Principes de la méthode générale d'évaluation des flux de contaminants dans le ruissellement des matériaux de toiture à l'échelle urbaine



2. Démarche opérationnelle de l'application de la méthode

Dans cette section nous allons décrire les étapes à suivre pour évaluer l'émission d'un contaminant donné à l'échelle d'une ville considérée. Nous avons montré dans le [Chapitre 3.1](#) que Créteil est une ville représentative des autres villes Françaises. Ainsi, il s'agit de montrer que la méthode développée peut être appliquée d'une manière efficace et rapide à d'autres villes et d'autres contaminants en rajoutant quelques adaptations.

2.1. Choix du contaminant et de la ville d'étude

La première étape consiste à choisir le contaminant et la ville d'étude. Ce choix dépendra des objectifs de l'opérateur. Ceci peut être effectué dans le cadre d'un objectif d'évaluation de la contribution des matériaux de toitures à la pollution urbaine ou dans le but de limiter la contamination issue des toitures en programmant des projets de rénovation de toitures.

2.2. Identification des flux unitaires et des situations-types d'émission du contaminant par les matériaux de toiture à l'échelle du toit

Tout d'abord, un travail de hiérarchisation des situations-types d'émission du contaminant choisi devra être effectué. L'objectif sera de limiter le nombre de situations-types à devoir effectivement entièrement renseigner pour faire le calcul final.

Notons que les situations-types renseignées sont limitées dans la littérature, les trois contaminants les plus étudiés sont le zinc, le cuivre et le plomb. La hiérarchisation des situations-types de ces trois contaminants est illustrée dans le [Tableau 60](#). Elle est basée d'une part sur la valeur du flux unitaire et d'autre part sur l'importance de l'utilisation de cette situation-type à l'échelle de la ville.

Tableau 60 : Hiérarchisation des situations-types de la plus importante à la moins importante pour chaque contaminant

| Contaminant | Situation-types prioritaires | | |
|---------------|--|---|---|
| | Matériau | Localisation sur le toit | Mode de présence |
| Zinc | Zinc : - Ancien - Neuf - Prépatiné | - Rampant - Gouttière - Descente - Noue - Elément d'étanchéité | Composant principal en masse |
| | Acier galvanisé : - Neuf - Prépeint | - Rampant | Composant principal du traitement de surface de l'acier galvanisé |
| | Cuivre : - Ancien - Neuf | -Gouttière | Composant secondaire en masse |
| | Aluminium -Prépeint | - Gouttière | Composant secondaire en masse |
| | Aluminium - Neuf | - Rampant | Composant secondaire en masse |
| Cuivre | Cuivre : - Ancien - Neuf | - Rampant -Gouttière -Descente | Composant principal en masse |
| | Plomb : - Ancien - Neuf | - Elément d'étanchéité | Composant secondaire en masse |
| | Aluminium -Prépeint | - Gouttière | Composant secondaire en masse |
| | Zinc : - Ancien - Neuf - Prépatiné | - Rampant - Gouttières - Descente - Noue - Elément d'étanchéité | Composant secondaire en masse |
| Plomb | Plomb : - Ancien - Neuf | - Eléments d'étanchéité - Rampant | Composant principal en masse |
| | PVC | -Gouttière -Descente | Composant secondaire en masse |
| | Zinc : - Ancien | - Rampant - Gouttières - Descente - Noue - Elément d'étanchéité | Composant secondaire en masse |
| | Cuivre : - Ancien - Neuf | -Gouttière -Descente | Composant secondaire en masse |

Pour évaluer l'émission d'un contaminant donné à l'échelle urbaine il convient d'identifier les flux à considérer pour chaque situation-type retenue. Les données de flux unitaires n'étant pas toujours disponibles pour tous les contaminants et toutes les situations-types, il faut suivre la démarche suivante :

- 1^{er} cas : des données existent pour le site d'étude

Il s'agit d'utiliser les données renseignées des situations-types d'émission des contaminants par site : zinc, cuivre et plomb qui sont illustrées dans les tableaux opérationnels (cf. [Tableau-A 4](#), [Tableau-A 5](#), [Tableau-A 6](#) à la fin du chapitre). Les informations sont utilisées en tant que telles. Une recherche supplémentaire doit être effectuée dans le site d'étude pour identifier d'éventuelles nouvelles données de flux existantes non repérées dans ces tableaux. Cette recherche est à réaliser uniquement dans la mesure où celles-ci est nécessaire au calcul du flux total.

- 2^{ème} cas : il n'y a pas de données locales, mais des données existent pour des « cas comparables »

Si aucun flux n'est évalué pour un contaminant donné, il convient d'approximer le flux par les données qui existent dans le même pays ou dans le site le plus proche de même nature (Urbain, Péri-urbain, Industriel, Autoroutier...) (cf. [Tableau-A 4](#), [Tableau-A 5](#), [Tableau-A 6](#) à la fin du chapitre).

Exemple : Si nous voulons évaluer l'émission du cuivre dans la ville de Lyon, nous utiliserons les données des flux unitaires élaborées dans la ville de Créteil.

- 3^{ème} cas : aucune donnée disponible, situation-spécifique

Enfin, si aucune information n'est disponible pour une situation-type donnée devant être renseignée, il convient d'approximer les flux à partir des flux déjà existants. Sachant qu'aucune donnée n'a été produite pour les émissions de contaminants par les noues et les éléments d'étanchéité. Ainsi, il convient de faire les approximations suivantes :

- La noue étant un élément d'évacuation d'eau de pluie, son flux unitaire d'un contaminant donné (ex : zinc) est approximé par celui de la gouttière si celui-ci existe.
- Les éléments d'étanchéité sont mis sur le toit sous formes de bandes rectangulaires, donc leurs flux unitaires d'un contaminant donné sont approximés par ceux du rampant.

2.3. Quantification des surfaces des familles des matériaux de rampants et des longueurs de gouttières et de noues associées

Cette troisième étape nécessite tout d'abord un travail d'identification des bases de données urbaines. Ces bases de données seront adaptées et manipulées avec un SIG (ex : QGIS, Arc-QIG) pour atteindre l'objectif de la quantification.

2.3.1. Identification des bases de données urbaines

Les bases de données urbaines nécessaires pour notre travail sont :

- *une base de mode d'occupation de sol* : en Ile-de-France il s'agit de la base MOS-IAU¹¹⁰ utilisée dans cette thèse. Pour les autres villes il faut identifier les bases existantes. Pour trouver ces bases, il faut s'adresser à la mairie, aux services d'urbanisme de la ville concernée.

- *la base BD-TOPO* : cette base permet une focalisation sur le bâtiment et fournit la surface projetée des toitures ainsi que la hauteur des bâtiments. En France, la base BD-TOPO est fournie par l'IGN est accessible pour toutes les villes. A défaut de cette base, il convient d'utiliser le cadastre numérique.

- *la base BD-ORTHO* : c'est une base d'image aérienne qui permet d'identifier visuellement les matériaux de toiture. En France, la base BD-ORTHO fournie par l'IGN est accessible pour toutes les villes.

La BD-TOPO et la BD-ORTHO sont gratuites pour des fins de recherche et payantes pour une exploitation privée. L'accès à ces bases est à travers ces liens :

- <http://professionnels.ign.fr/bdtopo>

- <http://professionnels.ign.fr/bdortho>

2.3.2. Découpage de la ville d'étude en entités

Le découpage de la ville en entités permet d'avoir des zones homogènes pour lesquelles nous appliquons une approche statistique de quantification des surfaces des familles des matériaux de rampants et des longueurs de gouttières et de noues associées.

Les entités sont formées à partir du croisement d'une carte de classe de bâtiments et d'une carte de zones historiques pour la ville concernée. Ainsi, une entité est définie comme une classe de bâtiments localisée dans une zone historique.

Dans la suite nous expliquons la démarche de création de ces cartes.

a. Elaboration d'une carte de classes de bâtiments

Pour créer cette carte de classe de bâtiments nous utilisons la base de mode d'occupation de sol identifiée. Cette base est composée de différents modes d'occupation de sol. Ces derniers devront être regroupés pour pouvoir obtenir les 12 classes de bâtiments suivantes :

14. Habitat individuel « HI »

¹¹⁰ La base MOS-IAU est à solliciter à l'IUA-IDF : <http://www.iau-idf.fr/cartes/mode-doccupation-du-sol-mos.html>

15. Habitat collectif « HC »
16. Habitat autre « HA » (prison, auberge...)
17. Activité secondaires « A » (industrielle)
18. Classe transport/commerce : Surfaces commerciales (magasin, hypermarché, station de service...) + Transport (gares...)
19. Bureaux « B »
20. Sport (construit) « S »
21. Equipement d'enseignement « EE » (secondaire, supérieur...)
22. Equipement de santé « ES » (hôpital, clinique...)
23. Equipement culturel « EC » (centre de congrès, bibliothèque, médiathèque...)
24. Equipement administratif « EA » (mairie, préfecture...)
25. Entrepôt logistique « EL » (gaz, électricité...)

La démarche de regroupement est détaillée pour la base MOS-IAU dans le [Tableau-A 7](#) (à la fin du chapitre). Cette démarche est la référence du travail de création des classes de bâtiments.

Pour une base d'occupation de sol différente du MOS-IAU, il convient d'analyser cette base en identifiant et comprenant le descriptif des différents modes d'occupation de sol qu'elle décrit. Ces modes d'occupations de sol devront être comparés à ceux de la base MOS-IAU. Le travail de regroupement sera effectué par comparaison à celui effectué avec la base MOS-IAU. Ainsi, deux cas se présentent :

- la base d'occupation du sol est plus détaillée que le MOS-IAU, dans ce cas nous aurons plus de travail de regroupement. Le principe sera de regrouper les MOS appartenant à une catégorie de MOS plus générale. Par exemple, si nous trouvons un MOS gymnase et un MOS salle de sport ces deux MOS seront regroupés dans la classe « sport ».
- la base d'occupation du sol est moins détaillée que le MOS-IAU : dans ce cas il est possible de ne pas retrouver toutes les classes de bâtiments recherchées. A ce niveau, il suffit de se contenter des classes de bâtiments ressorties car il est très difficile d'effectuer un travail de décomposition des modes d'occupation de sol déjà présents dans la base. Par exemple si la base contient un mode d'occupation de sol appelé équipement et qui rassemble tous types d'équipements (administratif, enseignement...) dans ce cas nous gardons ce mode d'occupation de sol tel qu'il est.

b. Elaboration d'une carte historique de la ville d'étude

Pour élaborer une carte historique de la ville concernée, nous avons besoin d'identifier les périodes d'urbanisation de la ville qui seront croisées avec des grandes périodes d'urbanisation qui ont marqué les matériaux de toiture définis dans cette thèse. Ce travail permettra de découper la ville en zones historiques comportant les périodes qui ont influencé les matériaux de toitures.

- Les périodes d'urbanisation de la ville considérée

Il s'agit d'identifier les grandes périodes d'urbanisation de la ville permettant de découper la ville en zones urbaines homogènes temporellement. Ce type d'information peut être existant et facile à avoir dans les bibliothèques ou à partir des Mairies qui possèdent des données historiques accessibles sur leur site ou dans les archives. Le PLU (Plan Local d'Urbanisme) d'une ville pourra également présenter de telles informations historiques. Généralement un descriptif historique de l'urbanisation de la ville est disponible dans le PLU.

- Les grandes périodes d'urbanisation qui ont marqué les matériaux de couverture : Elles sont six et sont générales à toute la France :

- Avant 1850 (Avant la révolution industrielle) ;*
- 1850-1918 (La révolution industrielle) ;*
- 1918-1945 (Après la première guerre mondiale) ;*
- 1945-1974 (Les trente glorieuses après la deuxième guerre mondiale) ;*
- 1974-2000 (mise en œuvre des nouvelles idées architecturales) ;*
- 2000 - 2013 (Prise en compte de la notion d'écologie dans la construction).*

Exemple de croisement de l'histoire urbaine de la ville et des grandes périodes d'urbanisation : Pour la ville d'étude soit nous trouvons toutes les six périodes soit une partie. Par exemple la ville est construite à partir des trente glorieuses dans ce cas nous obtenons uniquement trois périodes (1945-1974 ; 1974-2000 ; 2000-2013). Ou encore certaines périodes seront fusionnées par exemple si une ville a été construite dans la période des trente glorieuses et elle n'a pas subi d'autres changements jusqu'à l'année 2000 donc nous aurons une période qui s'étend de 1945 à 2000.

- La délimitation des zones historiques obtenues sera effectuée avec un SIG : une carte historique de la ville d'étude sera ainsi obtenue.

c. *Elaboration d'une carte d'entités*

Il s'agit de croiser les deux cartes pour obtenir les entités « classes de bâtiments localisées dans zones historiques ». Cette carte sera croisée avec la BD-TOPO et la BD-ORTHO ou leur équivalent.

d. *Choix des entités*

Pour optimiser le temps de calcul, il s'agit d'effectuer le calcul pour les classes de bâtiments représentant 95% en cumul de la surface totale des toitures (fournie par le croisement avec la BD-TOPO) d'une zone historique de la ville.

La Figure 123 montre un exemple de choix des entités pour la ville de Créteil.

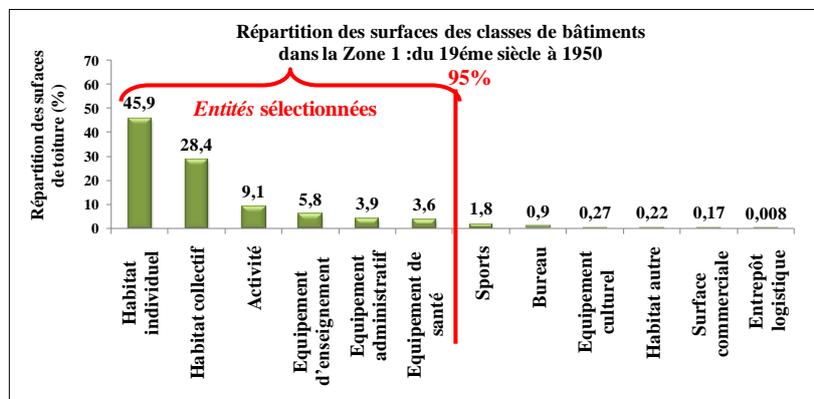


Figure 123 : Répartition hiérarchique des classes de bâtiments dans la zone historique 1 de la ville de Créteil

2.3.3. *Approche statistique et calcul d'incertitude*

L'approche statistique sera appliquée pour chaque entité choisie. Elle est basée sur le tirage d'un échantillon de bâtiments à partir des bâtiments de l'entité. Ensuite, à l'aide des SIG et des images aériennes nous identifions visuellement les matériaux des éléments de toiture. Pour mieux identifier ces matériaux, un travail d'identification des matériaux interdits ou préconisés dans la ville d'étude est indispensable.

a. *Identification des matériaux interdits ou préconisés dans la ville d'étude*

Il s'agit d'étudier les réglementations d'urbanisme de la ville ou de la zone urbaine considérée pour identifier les matériaux interdits ou préconisés. Les documents réglementaires à solliciter sont :

- Le Règlement national d'urbanisme (RNU) : utilisé pour les villes et villages ne disposant ni d'un plan local d'urbanisme, ni d'une carte communale, ni d'un document en tenant lieu;
- La Directive territoriale d'aménagement et de développements durables (DTADD) ;
- Le Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT) (anciennement le Schéma Directeur (SD)) ;
- Le Plan Local d'Urbanisme (PLU) ;
- La carte communale ;
- Le Schéma Directeur de la Région Île-de-France (SDRIF).

Dans ces textes, il est possible d'autoriser/préconiser ou même interdire l'utilisation d'un matériau de toiture. Donc, l'identification de ces matériaux sera croisée avec les [Tableau-A1](#), [Tableau-A2](#) et [Tableau-A3](#) (à la fin du chapitre) des matériaux de toiture et ainsi obtenir une liste des matériaux potentiellement existants.

b. Base de donnée d'une entité

Chaque *entité* est représentée par une base de ses bâtiments en fonction de leurs surfaces de toitures ([cf. Tableau 61](#)). Cette base est obtenue par le croisement de la BD-TOPO avec la carte de l'entité à l'aide d'un système d'informations géographiques SIG (ex : QGIS, ArcGIS) ([cf. Figure 124](#)). Le nombre total des bâtiments de l'entité est N.

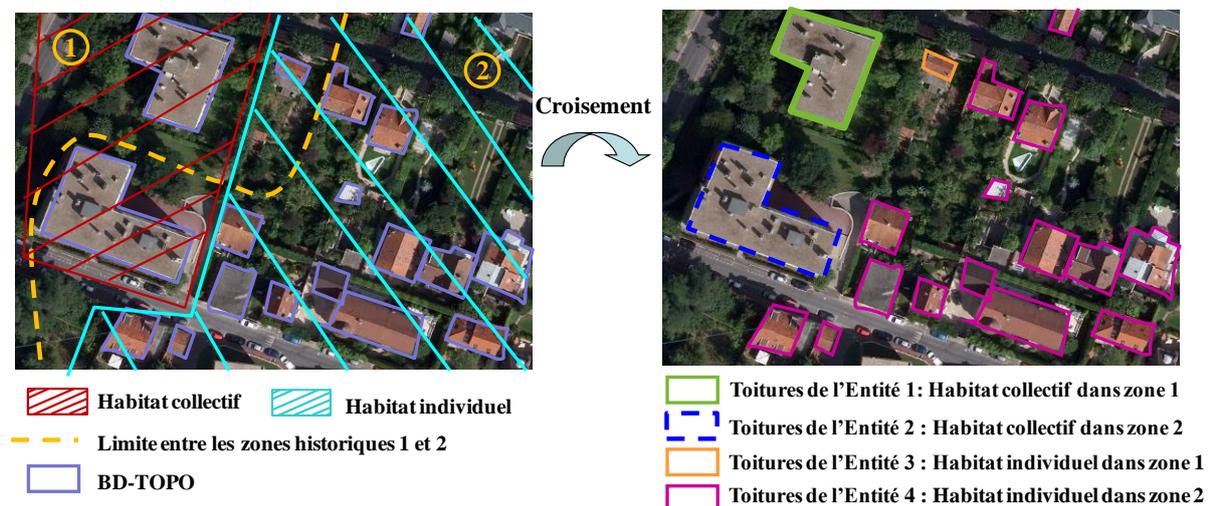


Figure 124 : Création de la base de bâtiments pour une entité donnée

Tableau 61 : Base de données pour une entité

| T | Bâtiment | Surface du toit S_b (m ²) |
|---|--|---|
| | 1 | $S_1=100$ |
| | 2 | $S_2=256$ |
| | ... | ... |
| N | S_N =surface totale des toitures de l'entité | |

c. Echantillonnage

Pour chaque *entité* choisie nous tirons aléatoirement sans remise, du [Tableau 61](#), un échantillon de taille choisie à partir des abaques de la [Figure-A 3](#) (à la fin du chapitre). Ainsi, pour une *entité* ayant N comme nombre de bâtiment, la taille d'échantillon n à tirer pour assurer une erreur absolue à :

- 16% : $n = 22,77 \times N^{0,15}$
- 12% : $n = 27,39 \times N^{0,18}$
- 8% : $n = 12,67 \times N^{0,38}$
- 4% : $n = 20,69 \times N^{0,38}$
- 2% : $n = 6,47 \times N^{0,632}$

Remarque : Le choix de la courbe s'effectue en fonction de l'exigence accordée au résultat que nous voulons obtenir (cf. exemple dans la [Figure-A 3](#)).

Un nouveau tableau T_e est obtenu, il contient les bâtiments tirés avec leurs surfaces de toitures (cf. [Tableau 62](#)).

Tableau 62 : Bâtiments de l'échantillon tiré

| T _e | Bâtiment | Surface du toit S_b (m ²) |
|----------------|----------|---|
| | 4 | $S_4=57$ |
| | 105 | $S_{105}=305$ |
| | ... | ... |
| n | S_n | |

d. Interprétation de la photo-aérienne

A l'aide du SIG, pour chaque échantillon tiré de chaque *entité*, nous renseignons toiture par toiture la famille des matériaux de rampant et nous mesurons les longueurs de gouttières, de noues, de descente et des éléments d'étanchéité (fenêtres, cheminée...) (cf. [Figure 125](#)). Les différentes familles de matériaux susceptibles d'être rencontrées sont illustrées dans le [Tableau-A8](#) (à la fin du chapitre). Les différentes formes de toitures sont illustrées dans [Figure-A 4](#) (à la fin du chapitre).

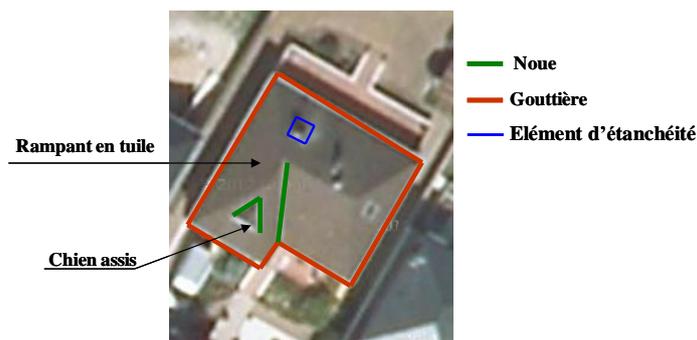


Figure 125 : Repérage de la famille de matériaux de rampant, de gouttières et de noues dans une toiture à partir d'une photo-aérienne

Toutes les données sont rassemblées dans le [Tableau 63](#). Le calcul effectué pour chaque échantillon comprend :

- la surface totale de ses toitures S_e
- la longueur totale de ses gouttières $l_{g,e}$
- la longueur totale de ses noues $l_{n,e}$

Tableau 63 : Résultats de l'interprétation de la photo-aérienne pour les caractéristiques des toitures de l'échantillon tiré

| Tr | Bâtiment b | Surface du toit S_b (m ²) | Famille de matériau | Longueur gouttière $l_{g,b}$ (m) | Longueur noues $L_{n,b}$ (m) |
|-------|--------------------------|---|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| | 4 | $S_4=57$ | Tuile | 10 | 0 |
| | 105 | $S_{105}=305$ | Ardoise | 30 | 5 |
| | ... | ... | ... | ... | ... |
| | n | $S_n=450$ | Zinc | 75 | - |
| Total | $S_e = \sum_{b=1}^n S_b$ | - | $l_{g,e} = \sum_{b=1}^n l_{g,b}$ | $l_{n,e} = \sum_{b=1}^n l_{n,b}$ | |

(-) Les noues des toitures métalliques font partie du rampant et ne sont pas comptabilisées.

Dans chaque échantillon e tiré d'une *entité* donnée, nous obtenons pour chaque famille de matériaux de rampant i : sa surface $S_{i,e}$ (%), la longueur totale de gouttières $l_{g,i,e}$ (m) et de noues $l_{n,i,e}$ (m) (cf. [Tableau 64](#)).

Tableau 64 : Evaluation des éléments de toitures par famille de matériaux de rampant dans l'échantillon

| Famille de matériau i | Surface $S_{i,e}$ (m ²) | Longueur gouttière $l_{g,i,e}$ (m) | Longueur noues $l_{n,i,e}$ (m) |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Tuile | 4435 | 969 | 125 |
| Ardoise | 520 | 63 | 0 |
| ... | ... | ... | ... |
| Zinc | 1178 | 214 | - |

e. Calcul d'incertitude

Le calcul d'incertitude se base sur le calcul d'intervalle de confiance. Tout d'abord, nous définissons les ratios suivants :

- La répartition des familles des matériaux de rampant dans l'échantillon :

$$p_{i,e} = \frac{S_{i,e}}{S_e}$$

- Le ratio entre la longueur de gouttières totale dans l'échantillon $l_{g,e} (m)$ et celle calculée pour chaque famille de matériau de rampant dans l'échantillon $l_{g,i,e} (m)$:

$$R_{g,i,e} = \frac{l_{g,i,e}}{l_{g,e}}$$

- Le ratio entre la longueur de noues totale dans l'échantillon $l_{n,e} (m)$ et celle calculée pour chaque famille de matériau de rampant dans l'échantillon $l_{n,i,e} (m)$:

$$R_{n,i,e} = \frac{l_{n,i,e}}{l_{n,e}}$$

Le calcul des intervalles de confiance IC_{T_i} est comme suit :

- Calcul de l'écart-type :

$$\sigma_{T,i} = \sqrt{\frac{T_{i,e}(1-T_{i,e})}{n} \times (1 - \frac{n}{N})}$$

- L'intervalle de confiance obtenu à 95% est :

$$T_i \in [T_{i,e} - 1,96.\sigma_{T,i}, T_{i,e} + 1,96.\sigma_{T,i}]$$

$$IC_{T_i} = \pm 1,96.\sigma_{T,i}$$

avec $T_i \in \{p_i; R_{n,i}; R_{g,i}\}$; $T_{i,e} \in \{p_{i,e}; R_{n,i,e}; R_{g,i,e}\}$

p_i : répartition des familles de matériaux de rampant estimée dans l'entité

$R_{g,i}$: ratio estimé pour les gouttières dans l'entité

$R_{n,i}$: ratio estimé pour les noues dans l'entité

f. Evaluation pour toute l'entité

Au niveau de l'entité nous obtenons :

- la surface des familles des matériaux de rampant $S_i (m^2)$: $S_i = p_{i,e} \times S_N$; (S_N =surface totale des toitures de l'entité)

- la longueur totale de gouttières $l_{g,i} (m)$: $l_{g,i} = \frac{l_{g,i,e}}{S_{i,e}} \times S_i$

- la longueur totale de noues $l_{n,i}(m)$: $l_{n,i} = \frac{l_{n,i,e}}{S_{i,e}} \times S_i$

Nous obtenons ainsi un tableau comportant par entité pour chaque famille de matériau : la surface de rampant, la longueur totale des gouttières et la longueur totale de noues (cf. [Tableau 65](#)).

Tableau 65 : Forme de résultat de la quantification des surfaces des familles des matériaux de rampants et leurs longueurs des différents éléments de toit associées

| | Famille de matériaux i | Surface de rampant $S_i (m^2) \pm IC_r$ | Longueur de gouttière $l_{g,i}(m) \pm IC_g$ | Longueur de noue $l_{n,i}(m) \pm IC_n$ |
|-----------------|--------------------------|---|---|--|
| Entité 1 | Tuile | 278648±21123 | 71676±5143 | 7060±568 |
| | Zinc | 845±9 | 335±4 | - |
| | ... | ... | ... | ... |
| Entité 2 | Ardoise | 5306±134 | 1280±32 | 1581± 123 |
| | ... | ... | ... | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... |

2.4. Quantification des matériaux de rampants et des autres éléments de toit

Ayant obtenu la répartition de chaque famille de matériaux de rampant et les longueurs de gouttière et de noue associées dans chaque entité, il reste à évaluer les répartitions des matériaux de rampant et les matériaux de gouttières et de noues. Pour cela, il s'agit d'appliquer les différentes règles développées dans les [Chapitre 2.4](#) (cf. [Tableau-A 9](#) (à la fin du chapitre)). Ces règles sont appliquées lorsque le matériau est non reconnaissable à partir d'une image aérienne.

Avant d'appliquer les règles, un travail d'identification des matériaux des différents éléments de toiture est indispensable. Il s'agit d'effectuer une analyse par zone historique en utilisant le tableau historique des matériaux de toiture du [Chapitre 1.2](#) qui est général et applicable à toute échelle urbaine.

a. Identification des matériaux des rampants, des gouttières et des noues

Pour identifier les matériaux de rampant, de gouttière et de noue existants dans toutes les entités d'une même zone historique, il convient de croiser le tableau historique (cf. [Chapitre 1.2](#)) et la période de construction de la zone.

Exemple 1 : pour une zone historique construite entre 1900 et 1950 présentant des toitures en ardoise le matériau sera de l'ardoise naturelle car d'après le tableau historique, l'ardoise en fibres ciments est utilisée en couverture à partir de 1950.

Exemple 2 : les toitures d'une zone historique construite avant 1980 ne présentent pas de gouttières en PVC. Celles-ci sont apparues à partir des années 1980.

b. Identification de l'âge du matériau de rampant, de gouttière et de noue

Pour identifier l'âge du matériau concerné, il s'agit de croiser sa localisation dans une zone historique et les règles associées à son renouvellement.

Exemple : Les matériaux en aciers sont renouvelés tous les 100 ans. D'après le tableau historique, l'acier laqué est apparu sur les toitures en 1975. Ainsi, dans une zone construite entre 1900 et 1980 les toitures en acier laqué sont construites à partir de 1975 et donc elles sont aujourd'hui âgées au maximum de 39 ans.

Notons que si pour un matériau ancien une seule valeur du flux unitaire du contaminant métallique choisi est disponible et associée à un seul âge, dans ces cas, cette valeur sera utilisée pour tous les matériaux anciens indépendamment de leurs âges.

c. Quantification des matériaux des différents éléments du toit

Il s'agit d'appliquer les règles de quantification par entité c'est-à-dire par zone historique et par classe de bâtiments en fonction de leurs disponibilités (cf. [Tableau-A 9](#)).

Exemple 1 : Dans une zone historique construite après les années 1980, les toitures en ardoises présentent 85% de gouttières en zinc naturel contre 15% en zinc prépatiné en gris foncé.

Exemple 2 : En banlieue parisienne, les toitures en ardoise sont réparties entre 80% d'ardoise naturelle et 20% en ardoise en fibres ciment.

Si aucune règle de quantification n'est disponible nous utiliserons le principe de majoration par rapport à l'évaluation de l'émission du contaminant en question.

Exemple : Si nous ne pouvons pas trancher sur la répartition de matériaux de gouttière d'une zone donnée, alors nous pouvons utiliser le principe de majoration. Ainsi, si notre objectif est d'évaluer l'émission du cuivre et dans une zone donnée et que nous doutons la répartition entre gouttière en cuivre et en PVC nous affecterons alors une répartition majorant de 95% pour le cuivre contre 5% pour le PVC.

d. Calcul de l'incertitude sur le flux

Le calcul de l'incertitude sur le flux s'effectue en utilisant l'Équation 12. Ce calcul combine l'incertitude sur le flux unitaire du contaminant et l'incertitude sur la dimension de l'élément du toit établie dans le Tableau 65. Les incertitudes sont sous forme de demi-intervalle de confiance ($IC = \pm 1,96.\sigma$). L'incertitude due à l'application des règles de quantification n'est pas prise en compte car elle n'est pas encore quantifiable à ce jour. Le calcul est effectué par entité comme décrit dans le Chapitre 3.3.

$$\text{Équation 12 : } IC_{\text{matériau}} = \sqrt{(D \times IC_f)^2 + (f \times IC_e)^2}$$

$$IC_{\text{entité}} = \sqrt{\sum_{i=\text{matériau}} (IC_i^2)}$$

$$IC_{\text{ville}} = \sqrt{\sum_{i=\text{entité}} (IC_i^2)}$$

Avec :

- $IC_{\text{matériau}}$: demi-intervalle de confiance sur l'évaluation du flux d'un contaminant donné émis par un matériau.
- D : dimension qui peut être une surface (m^2) ou une longueur (ml) du matériau de l'élément du toit
- f : le flux unitaire pour un matériau localisé sur un élément du toit peut être en $g.m^{-2}.an^{-1}$ ou en $g.ml^{-1}.an^{-1}$.
- IC_e : demi-intervalle de confiance sur l'évaluation de la dimension de l'élément du toit établi dans Tableau 65.
- IC_f : demi-intervalle de confiance sur l'évaluation des flux unitaires d'un contaminant donné.
- $IC_{\text{entité}}$: demi-intervalle de confiance sur l'évaluation du flux d'un contaminant donné dans une entité.
- IC_{ville} : demi-intervalle de confiance total sur l'évaluation du flux d'un contaminant donné dans la ville d'étude.

Exemple de calcul d'incertitude :

| Matériau | Surface de rampant $S \pm IC_r (m^2)$ | Flux unitaire d'émission du zinc $f \pm IC_f (g/m^2/an)$ | Incertitude totale $IC = \sqrt{(S \times IC_f)^2 + (f \times IC_r)^2}$ | Flux total du zinc $F_{Zn} \pm IC$ |
|---------------------|--|---|---|---------------------------------------|
| Zinc naturel ancien | 1286 ± 33 | 4,52±0,753 | 153 | 5813±153 (g/m ²) |

3. Synthèse

A ce jour, et dans le cadre de cette thèse nous estimons avoir rempli l'objectif de notre recherche en termes de production d'une méthode générale d'évaluation des flux de contaminants à l'échelle de la ville. Cette méthode opérationnelle nécessite des améliorations. En effet, il faudra élaborer une démarche de calcul des incertitudes liées à l'application des règles de quantification des matériaux des différents éléments de toitures. De plus, la méthode statistique doit être élargie à la quantification des éléments d'étanchéité et des descentes. Pour les descentes, elles ne sont pas visibles à partir d'une image aérienne. Donc, il faudra ajouter une autre information sur la hauteur du bâtiment (disponible dans la base BD-TOPO) et le nombre de descente par m² de surface de toiture (une descente de diamètre 120 mm pour une surface de 115 m² d'après DTU 60.11). Pour les éléments d'étanchéité, il convient d'effectuer un travail typologique pour mieux identifier ces éléments sur une toiture. Enfin, les différentes limites sont discutées dans la conclusion générale de cette thèse.

Figure-A 1 : Terminologie et principaux composants d'une couverture rentrant en contact avec l'eau (NF P 30-101)

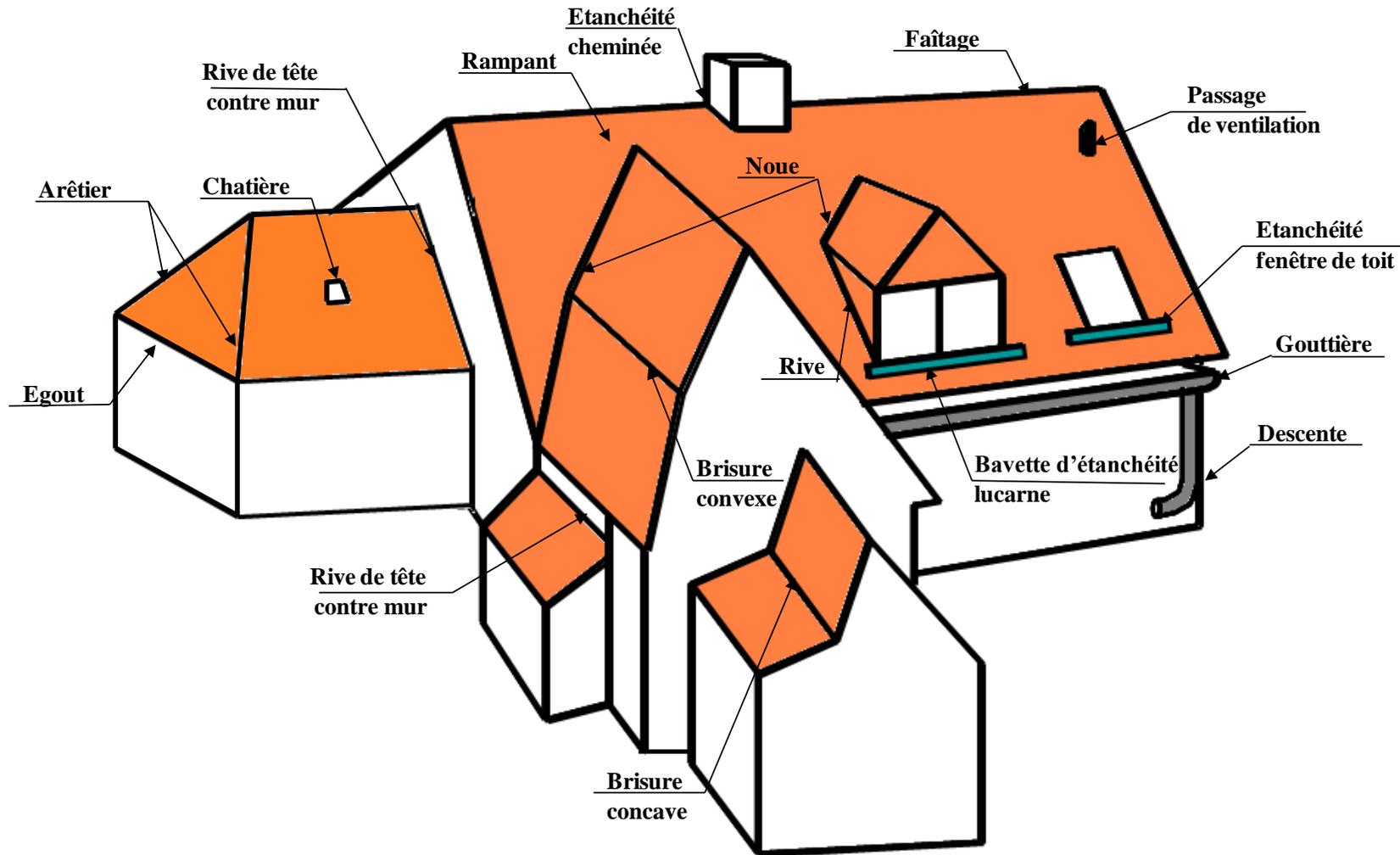
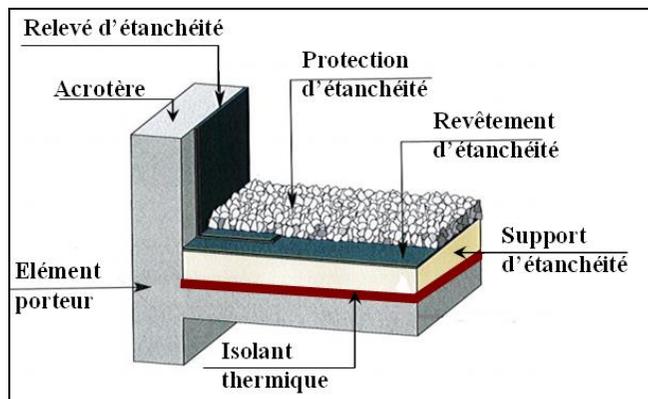
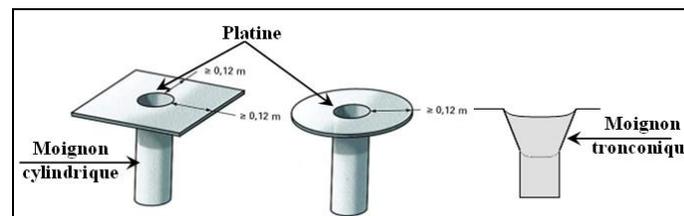


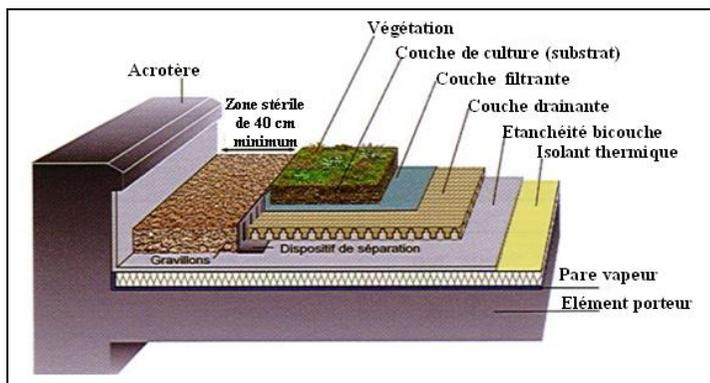
Figure-A 2 : Terminologie et principaux composants d'une toiture-terrasse rentrant en contact avec l'eau



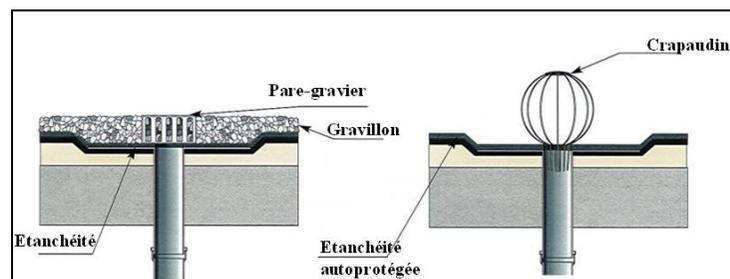
Composition d'une toiture-terrasse



Système d'entrée d'eau pluviale dans une terrasse



Composition d'une toiture végétalisée



Exemple de crapaudine et de galerie garde-grève destiné à arrêter les débris capables de provoquer un engorgement des descentes

Tableau-A 1 : Les familles des matériaux et leurs variétés utilisées sur les différents éléments d'une toiture inclinée

| Famille de matériau | Matériau |
|--|--|
| Acier | Naturel |
| | Inoxydable |
| | Galvanisé |
| | Prélaqué |
| Aluminium | Les alliages d'aluminium : - Alliage Cu et Mg - Alliage de silicium affiné au sodium |
| | L'aluminium prélaqué |
| | |
| Ardoise | Naturelle |
| | Fibres ciment |
| | <i>Amiante</i> |
| Bardeaux bitumeux | Bardeaux bitumeux |
| Bitume | Bitume |
| Cuivre | Cu-b (Cu-DHP) |
| | Le cuivre allié |
| | Cuivre prépatiné |
| Matériaux en fibres ciment | Fibres ciment |
| | <i>Amiante</i> |
| Plastique | Polyester |
| | PVC |
| | Polycarbonate |
| | PMMA |
| Plomb | Plomb |
| Tuile | Terre cuite |
| | Terre cuite engobée |
| | Terre cuite émaillée |
| | Terre cuite siliconée |
| | Béton |
| | Métallique (acier laqué) |
| | Plastique |
| Zinc | Naturel allié (Zn-Cu-Ti-Al) |
| | Prépatiné |
| | Bi-laqué |
| | Coloré en masse |
| | Allié au cadmium |
| <i>Amiante : c'est un matériau qui n'existe plus sur le marché (interdit en 1997).</i> | |

Tableau-A 2 : Les différents revêtements d'étanchéité appliqués sur les toitures-terrasses

| Revêtement | | Type de couche | Composition des couches | Protection |
|---|-----------------|--------------------------------------|--|--|
| Asphalte | | Bicouche Epaisseur : 20 - 25 mm | - asphalte pure étanchéité (5mm) - asphalte sablé (15mm) | Autoprotection minérale (grâce aux sables) |
| | | | - asphalte pure étanchéité - asphalte gravillonné (20mm) | Autoprotection par gravillons |
| | | Monocouche Epaisseur : 20 mm | asphalte gravillonné ⁽¹⁾ | Autoprotection par gravillons |
| Feuille à base de bitume oxydé⁽²⁾ | | Multicouche | Feutres bitumés | - Autoprotection minérale |
| | | | Chapes de bitume armé | - Autoprotection par des feuilles métalliques - Protection rapportée |
| Feuille à base de bitume modifié⁽³⁾ | | Bicouche Epaisseur : 5 mm | Deux feuilles bitumineuses élastomère SBS | - Autoprotection minérale |
| | | | Deux feuilles bitumineuses plastomère APP | - Protection rapportée |
| | | | Une feuille bitumineuse élastomère SBS + feuille bitumineuse élastomérique SBS | - Autoprotection métallique (feuille d'Al, de Cu, ou d'inox) - Protection rapportée |
| | | Monocouche Epaisseur : 4 mm | Une feuille bitumineuse élastomère SBS | - Autoprotection minérale |
| | | | Une feuille bitumineuse plastomère APP | - Protection rapportée |
| Membranes synthétiques | Thermoplastique | Monocouche Epaisseur : 1,2 -1,5mm | PVC-P | - Protection rapportée |
| | | | FPO | |
| | Vulcanisée | Monocouche Epaisseur : 1,2-1,5mm | EPDM | |
| <p>(1): l'asphalte gravillonné utilisé en monocouche n'est applicable que dans le cas d'une isolation inversée.</p> <p>(2): les membranes bitumineuses oxydées ne sont plus utilisées, et elles sont remplacées par les membranes à base de bitume modifié.</p> <p>(3): ce type de revêtement est le plus utilisé, et le plus répandu dans le marché.</p> | | | | |

Tableau-A 3 : Matériaux des entrées d'eaux pluviales

Les matériaux des entrées d'eau pluviale peuvent être :

- en plomb de 2,5 mm d'épaisseur minimale
- en tôle d'acier inoxydable de 1,0 mm d'épaisseur minimale
- en cuivre de 0,6 mm d'épaisseur minimale
- en aluminium de 1,0 mm d'épaisseur minimale
- en matériau adapté (plus particulièrement pour les membranes synthétiques)

Tableau-A 4: Les différentes situations-types renseignées d'émission du zinc par les matériaux de toiture

| Matériau | Localisation sur le toit | Mode de présence | Flux unitaires moyens (g.m ⁻² .an ⁻¹) (g.m ⁻¹ .an ⁻¹)* | Site (Localisation) | |
|----------------|--------------------------|------------------------------|--|---|--|
| Zinc neuf | Rampant | Composant principal en masse | 3,87 | Urbain - Créteil (France) | |
| | | | 3,34 | Urbain - Bern (Suisse) | |
| | | | 3 | Urbain - Stockholm (Suède) | |
| | | | 18,1 | Urbain avec industrie (Belgique) | |
| | | | 3,3 | Péri-Urbain Champ sur Marne (France) | |
| | | | 3,6 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) | |
| | | | 8,72 | Autoroutier- Härkingen (Suisse) | |
| | | | 8,72 | Industriel – Normandie (France) | |
| | | | 6,4 | Industriel - Olen (Belgique) | |
| | | | 4 | Rural - Payerne (Suisse) | |
| | 2,6 | Rural (Belgique) | | | |
| | | Gouttière* | Composant principal en masse | 0,87 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,7 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) | |
| Zinc ancien | Rampant | Composant principal en masse | 3 | Urbain - Stockholm (Suède) | |
| | | | 4,17 | Urbain - Créteil (France) | |
| | | | 3,5 | Urbain - Stockholm (Suède) | |
| | | | 14,6 | Urbain avec industrie (Belgique) | |
| | | | 4,15 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) | |
| | | | 7,1 | Industriel - Olen (Belgique) | |
| | | | 7,6 | | |
| | 39 ans | 7,9 | | | |
| | 40 ans | Gouttière* | Composant principal en masse | 0,81 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,8 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) | |
| Anthra zinc | Rampant | Composant principal en masse | 2,3 | Urbain - Créteil (France) | |
| | | | 1,35 | Urbain - Stockholm (Suède) | |
| | | | 11,9 | Urbain avec industrie (Belgique) | |
| | | | 2,1 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) | |
| | | | 1,9 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) | |
| | | | 4,2 | Industriel - Olen (Belgique) | |
| | | | 1,9 | Rural (Belgique) | |
| | | Gouttière* | Composant principal en masse | 0,5 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | | 0,33 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Quartz zinc | Rampant | Composant principal en masse | 1,15 | Urbain - Stockholm (Suède) | |
| | | | 13 | Urbain avec industrie (Belgique) | |
| | | | 3,2 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) | |
| | | | 4,15 | Industriel - Olen (Belgique) | |
| | | | 1,95 | Rural (Belgique) | |
| Zinc prépatiné | Rampant | Composant principal en masse | 3,5 | Zone avec faible concentration de SO ₂ | |

| Matériau | Localisation sur le toit | Mode de présence | Flux unitaires moyens (g.m ⁻² .an ⁻¹) (g.m ⁻¹ .an ⁻¹)* | Site (Localisation) |
|---------------------------|--------------------------|---|--|--|
| Acier galvanisé | Rampant | Composant principal du traitement de surface de l'acier galvanisé | 1,97 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 2,74 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 1,87 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | | | 2,4 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) |
| | Crochet de fixation | | 0,046 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0438 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Acier galvanisé prépeint | Rampant | Composant principal du traitement de surface de l'acier galvanisé | 0,0246 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,07 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 0,0074 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Acier prépeint | Rampant | Composant principal du traitement de surface de l'acier galvanisé | 0,72 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| Acier inoxydable | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,00014 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Plomb neuf | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0524 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0431 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Plomb ancien (50 ans) | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,113 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0866 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Aluminium | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0337 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,540 | Marin – Brest (France) |
| | Gouttière* | | 0,0357 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Aluminium prépeint | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0112 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Cuivre neuf | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,002 | Urbain - Créteil (France) |
| Cuivre ancien 20 à 25 ans | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0214 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0206 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |

Tableau-A 5 : Les différentes situations-types renseignées d'émission du cuivre par les matériaux de toiture

| Matériau | Localisation sur le toit | Mode de présence | Flux unitaires moyens (g.m ² .an ⁻¹) (g.m ⁻¹ .an ⁻¹)* | Site |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|---|--|
| Zinc neuf | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0023 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,006 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Anthra-zinc | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0014 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,006 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Zinc ancien (35 ans) | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0016 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,009 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Gouttière* | | 0,0033 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0023 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Cuivre neuf | Gouttière* | Composant principal en masse | 0,416 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,323 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Rampant | Composant principal en masse | 1,58 | Urbain - Milan (Italie) |
| | | | 0,35 | Urbain - Bern (Suisse) |
| | | | 1,4 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 1,38 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) |
| | | | 0,11 | Autoroutier- Härkingen (Suisse) |
| | | | 3,93 | Industriel -Normandie (France) |
| | | | 0,8 | Rural - Hoboken (Suède) |
| | | | 0,58 | Rural - Payerne (Suisse) |
| 1,61 | Marin (France) | | | |
| Cuivre ancien | Rampant | Composant principal en masse | 1,4 | Urbain - Stockholm (Suède) |
| | | | 2,1 | |
| | | | 1,9 | |
| | | | 1,74 | |
| | | | 1,36 | Marin (France) |
| Cuivre ancien 20 à 25 ans | Gouttière* | Composant principal en masse | 0,631 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,429 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Plomb neuf | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,007 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0042 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Plomb ancien (50 ans) | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0087 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,017 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |

| Matériau | Localisation sur le toit | Mode de présence | Flux unitaires moyens (g.m².an⁻¹) (g.m⁻¹.an⁻¹)* | Site |
|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| Acier galvanisé prépeint | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,002 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,004 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Acier galvanisé | Crochet de fixation | Composant secondaire en masse | 0,00038 | Urbain - Créteil (France) |
| Acier inoxydable | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,006 | Urbain - Créteil (France) |
| | Crochet de fixation | | 0,000035 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | | | 0,000021 | Urbain - Créteil (France) |
| Aluminium | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,004 | Urbain - Créteil (France) |
| | Gouttière* | | 0,004 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Aluminium prépeint | Gouttière | Composant secondaire en masse | 0,0016 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |

Tableau-A 6 : Les différentes situations-types renseignées d'émission du plomb par les matériaux de toiture

| Matériau | Localisation sur le toit | Mode de présence | Flux unitaires moyens (g.m ² .an ⁻¹) (g.m ⁻¹ .an ⁻¹)* | Site |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|---|--|
| Plomb neuf | Rampant | Composant principale en masse | 7,2 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 4,3 - 6,6 | Urbain (Pays-Bas) |
| | | | 4 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) |
| | | | 7,7 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Rive contre mur | Composant principale en masse | 0,88 | Urbain (Pays-Bas) |
| Plomb ancien | Rampant (50ans) | Composant principale en masse | 22,5 | Urbain - Créteil (France) |
| | Rampant | | 11,1 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | | | 7,65 | Urbain (Pays-Bas) |
| Zinc neuf | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0005 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0003 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0009 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0002 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Anthra zinc | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0007 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0006 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0003 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0001 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Zinc ancien (35 ans) | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,019 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,016 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0024 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,002 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Cuivre neuf | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0014 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0002 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Cuivre ancien | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0009 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0004 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Acier galvanisé | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0003 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0004 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| | Crochet de fixation | Composant secondaire en masse | 0,000027 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,000013 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Acier galvanisé prépeint | Rampant | Composant secondaire en masse | 0,0004 | Urbain - Créteil (France) |
| | | | 0,0005 | Péri-Urbain - Champ sur Marne (France) |
| Acier inoxydable | Crochet de fixation | Composant secondaire en masse | 0,00005 | Urbain en Créteil 2006-2008 |
| Aluminium | Rampant | Composant secondaire en masse | <0,01 | Péri-Urbain - Dübendorf (Suisse) |
| | | | 0,0021 | Urbain - Créteil (France) |
| | Gouttière* | Composant secondaire en masse | 0,0002 | Péri-Urbain - Champ sur Marne |

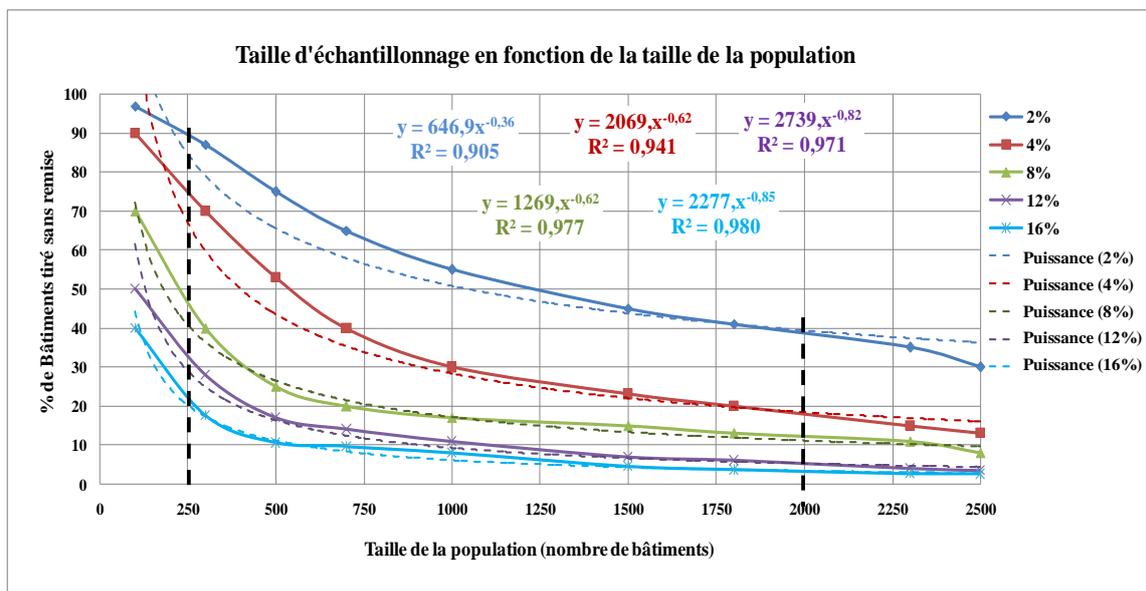
Tableau-A 7 : Démarche de regroupement des MOS-IAU pour obtenir les 12 classes de bâtiments

La base MOS-IAU est formée par 5 niveaux hiérarchiques. Chaque niveau comporte des modes d'occupation du sol. Le niveau V est le plus détaillé. Pour le regroupement des MOS, nous partons du niveau V en remontant vers le niveau II. Les MOS retenues sont signalés en gras italique.

| Niveau I | Niveau II | Niveau III | Niveau IV | Niveau V | | | | |
|--|---|--|---|---|---|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Mode Urbain Construit « MUC » | <i>Habitat individuel*</i> | Habitat individuel | Habitat individuel | Habitat individuel | | | | |
| | | | Ensembles d'habitat individuel identique | Ensembles d'habitat individuel identique | | | | |
| | | | Habitat rural | Habitat rural | | | | |
| | Habitat collectif | <i>Habitat collectif*</i> | | Habitat continu bas | Habitat continu bas | | | |
| | | | | Habitat collectif continu haut | Habitat collectif continu haut | | | |
| | | | | Habitat collectif discontinu | Habitat collectif discontinu | | | |
| | | <i>Habitat autre*</i> | Habitat autre | Prisons Habitat autre | | | | |
| | Activités | <i>Activité secondaire*</i> | | Activités en tissu urbain mixte | Activités en tissu urbain mixte | | | |
| | | | | Zones ou lotissement affectés aux activités | Zones ou lotissement affectés aux activités | | | |
| | | Activité tertiaires | | | <i>Surfaces commerciales*</i> | Centres commerciaux Hypermarchés Grands magasins Stations-service Autres commerces | | |
| | | | | | <i>Bureaux*</i> | Bureaux | | |
| | | | | | <i>Sport* (construit)</i> | Bâtiments ou installations de sport | Installations sportives couvertes | Installations sportives couvertes |
| | | | | | | | Piscines couvertes | Piscines couvertes |
| | Equipements | <i>Equipements* d'enseignement</i> | Etablissements d'enseignement | Enseignement de premier degré | Enseignement de premier degré | | | |
| | | | | Enseignement secondaire | Enseignement secondaire | | | |
| | | | | Enseignement supérieur | Enseignement supérieur | | | |
| | | | | Enseignement autre | Enseignement autre | | | |
| | | <i>Equipements de santé*</i> | Etablissements de santé | Hôpitaux, cliniques | Hôpitaux, cliniques | | | |
| | | | | Autres équipements de santé | Autres équipements de santé | | | |
| | | <i>Autres équipements locaux, administrations</i> <i>Equipements administratifs</i> | Grandes administrations, organismes officiels | | <i>Equipements culturels</i> | Lieux de culte Grands équipements culturels | | |
| | | | | | Mairies | Mairies | | |
| | | | | | Equipements de proximité | Equipements de proximité | | |
| | | | | | Sièges d'administrations territoriales | Sièges d'administrations territoriales | | |
| | | | | | Equipements de missions de sécurité civile | Equipements de missions de sécurité civile | | |
| | | | | | Administrations autres | Administrations autres | | |
| | <i>Grands équipements Entrepôts logistiques</i> | Equipements pour eau, assainissement, énergie | | Production d'eau | Production d'eau | | | |
| | | | | Assainissement | Assainissement | | | |
| | | | | Electricité | Electricité | | | |
| | | | | Gaz | Gaz | | | |
| | | | | Pétrole | Pétrole | | | |
| | | | Infrastructures autres | Infrastructures autres | | | | |
| <i>Transport*</i> | Transport | Transport | Transport | Transport | | | | |

**MOS retenu ; MOS : MOS renommé*

Figure-A 3 : Evaluation des tailles d'échantillonnage en fonction de la taille de l'entité pour différentes erreurs absolues



Cette figure montre que plus on est exigeant plus la taille de l'échantillonnage devient grande et ce qui induit à un temps de calcul plus grand. Ainsi, pour une entité de 250 bâtiments un choix de tirage de la courbe 2% implique le renseignement de presque la totalité de l'entité et donc ce choix n'est pas bon. Pour une entité de 2000 bâtiments un choix de la courbe 2% abouti à un tirage d'environ 40% de l'entité.

| Nombre de bâtiments dans une entité | Nombre de bâtiments constituant l'échantillon tiré à partir des 5 courbes | | | | |
|-------------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|
| | 16% | 12% | 8% | 4% | 2% |
| 250 | 52 | 74 | 104 | 167 | 213 |
| 2000 | 72 | 108 | 228 | 372 | 790 |

Notons que dans la ville de Créteil le choix des tailles d'échantillonnages de toutes les entités à partir de la courbe 16% a permis d'obtenir une erreur relative de 16% sur le calcul du flux global d'émission du zinc dans la ville.

Figure-A 4 : Localisation des gouttières et des noues pour les différentes formes de toitures

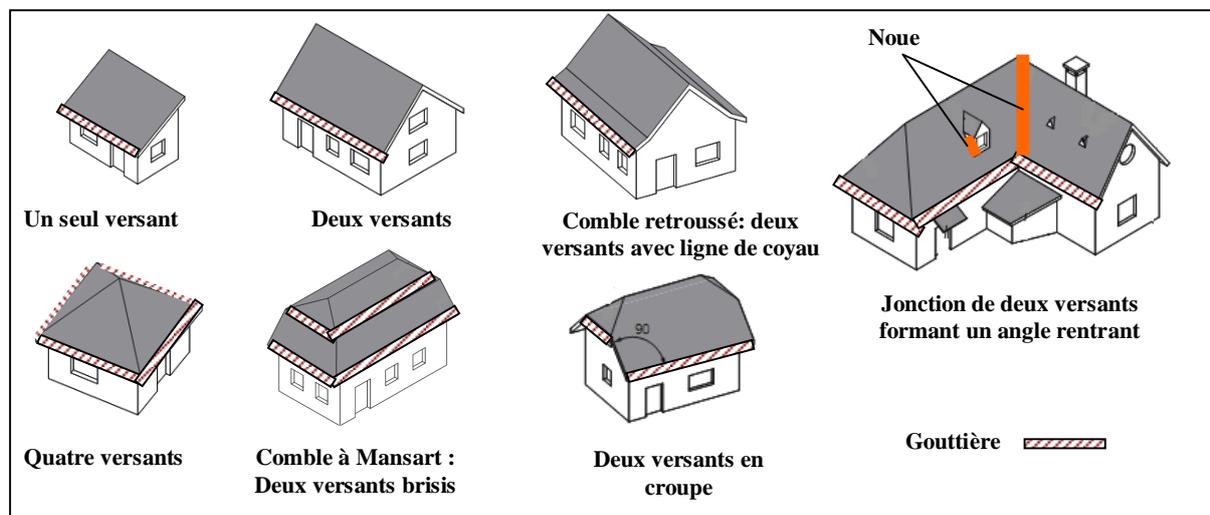


Tableau-A 8 : Les différentes familles de matériaux de rampant

| | | | |
|--|---|--|--|
|  <p>Élément en ardoise</p> |  <p>Ardoise en fibres ciment blanchie</p> |  <p>Toiture en cuivre</p> | |
|  <p>Toiture en zinc</p> |  <p>Exemple de bardeaux bitumeux</p> |  <p>Exemple de plaque en fibres ciment</p> | |
|  <p>(a)</p> |  <p>(b)</p> |  <p>(c)</p> |  <p>(d)</p> |
| <p>(a) Tuiles en terre cuite engobées ; (b) Tuile en terre cuite émaillées ; (c) Tuile béton; (d) Tuile métallique</p> | | | |
|  <p>Exemple de plaques en plastique</p> | | | |
|  <p>Matériaux en acier : (a) Profil nervé; (b) Profil ondulé; (c) Profil trapézoïdale</p> | | | |
|  <p>Toiture ancienne de la Cathédrale El Burgo d'Osma (Espagne) en plomb</p> | | | |

Tableau-A 9 : Règles de quantification des matériaux des différents éléments de toiture

Deux types de règles sont définis :

- des *règles qualitatives* permettant de décrire et d'identifier d'une manière précise l'utilisation des matériaux des différents éléments de toit. Par exemple, dans certains quartiers ou zones quelques matériaux ne sont pas utilisés en toiture.
- des *règles quantitatives* permettant d'avoir des données chiffrées de la répartition des différents matériaux de toit. Par exemple, à l'échelle de la ville les toitures en plomb représentent moins de 1%.

Trois classes de règles sont attribuées en fonction de leurs fiabilités :

- *Règle classe A* : C'est une règle certaine.
- *Règle classe B* : C'est une règle probable opérationnellement acceptable.
- *Règle classe C* : C'est une règle incertaine. Ce type de règle peut utiliser comme une première approche en cas d'absence d'autres informations quantifiées

Règles d'identification des matériaux de rampants

| Famille des matériaux | Règles d'identification |
|---|--|
| Acier | <ul style="list-style-type: none"> - RIMA 1 : L'acier galvanisé et l'acier laqué peuvent être utilisés pour les bâtiments annexes d'une maison (ex : garage, un abri de jardin). - RIMA 2 : Le renouvellement d'une toiture en acier se fait tous les 100 ans. |
| Aluminium | <ul style="list-style-type: none"> - RIFAI 1 : Le renouvellement d'une toiture en aluminium se fait tous les 100 ans. |
| Ardoise | <ul style="list-style-type: none"> - RIMAr 1 : Le renouvellement d'une toiture en ardoise se fait avec le même matériau initial. - RIMAr 2 : Le renouvellement d'une toiture en ardoise naturelle se fait tous les 100 ans. - RIMAr 3 : Le renouvellement d'une toiture en ardoise en fibres ciment se fait tous les 50 ans. |
| Bardeaux bitumineux | <ul style="list-style-type: none"> - RIB 1 : Le renouvellement d'une toiture en bardeaux bitumineux se fait tous les 25 ans. |
| Cuivre | <ul style="list-style-type: none"> - RIFC 1 : Le cuivre est un matériau noble et très cher, il est utilisé dans quelques bâtiments publics dans des cas très exceptionnels. - RIFC 2 : Le cuivre est renouvelé au minimum tous les 100 ans. |
| Étanchéités des toitures-terrasses | <ul style="list-style-type: none"> - RIFT 1 : Entre 1955 et 1980 les étanchéités bitumineuses sont en bitume oxydé. - RIFT 2 : Depuis les années 1980 le bitume oxydé est remplacé par le bitume modifié. - RIFT 3 : Les membranes bitumineuses ont une durabilité comprise entre 20 et 40 ans. - RIFT 4 : Le renouvellement des membranes synthétiques est tous les 30 ans. |
| Plomb | <ul style="list-style-type: none"> - RIP 1 : Le renouvellement d'une toiture en plomb se fait tous les 200 ans. - RIP 2 : Les couvertures en plomb sont utilisées sur les bâtiments très anciens et prestigieux. |
| Tuile | <ul style="list-style-type: none"> - RIMT 1 : Les tuiles béton sont utilisées sur les constructions neuves de l'Île-de-France. - RIMT 2 : Les tuiles métalliques sont plutôt utilisées dans les régions montagneuses. - RIMT 3 : Le renouvellement d'une toiture en tuile en terre cuite se fait au moins tous les 100 ans. - RIMT 4 : Le renouvellement d'une toiture en tuile béton se fait tous les 50 ans. |
| Zinc | <ul style="list-style-type: none"> - RIMZ 1 : Le cadmium existait dans le zinc naturel produit entre 1960 et 1983. - RIMZ 2 : La rénovation d'une toiture en zinc se fait tous les 50 ans. - RIMZ 3 : Le zinc naturel est utilisé pour la rénovation des toitures en zinc ancien. - RIMZ 4 : Le zinc prépatiné est plus utilisé dans les nouvelles constructions. - RIMZ 5 : Le quartz zinc gris est plus utilisé que l'antra-zinc gris foncé. |

Règles de quantification pour le passage de la famille des matériaux de rampant au matériau du rampant

| Famille des matériaux | Classe de règles | | |
|---|--|---|--|
| | Classe A | Classe B | Classe C |
| Ardoise | <p>- RQMar-A 1 : En France, pour les bâtiments construits entre 2000 et 2011 les toitures en ardoises sont réparties entre 71,75% d'ardoise naturelle contre 28,25% d'ardoise en fibres ciment.</p> <p>- RQMar-A 2 : Avant les années 1950, 100% des toitures en ardoise sont en ardoise naturelle</p> | - | <p>- RQMar-C 1 : En banlieue parisienne, les toitures en ardoise sont réparties entre 80% d'ardoise naturelle 20% en ardoise en fibres ciment.</p> <p>- RQMar-C 2 : A Paris, les toitures en ardoise sont réparties entre 90% d'ardoise naturelle et 10% d'ardoise en fibres ciment.</p> |
| Acier | - | <p>- RQMA-B 1 : La famille des aciers est répartie entre 85% de l'acier galvanisé, 10% de l'acier laqué et 5% de l'acier inoxydable.</p> | <p>- RQMA-C 1 : Dans les zones agressives (montagne et littoral), 80% d'acier laqué est utilisé contre 20% d'acier galvanisé.</p> |
| Étanchéités des toitures-terrasses | <p>- RQMT-A 1 : En France, pour les bâtiments construits entre 2000 et 2011 les étanchéités terrasse sont réparties entre 58,4% de membranes bitumineuses modifiées SBS, 14,6% de membranes bitumineuses modifiées APP, 18% pour les membranes synthétiques, 7% pour l'asphalte et 2 pour les étanchéités liquides.</p> | - | <p>- RQMT-C 1 : Les membranes bitumineuses sont réparties entre 90% membranes bitumineuses modifiées et 10% membranes bitumineuses oxydées.</p> |

| Famille des matériaux | Classe de règles | | |
|-----------------------|--|--|--|
| | Classe A | Classe B | Classe C |
| Tuile | <ul style="list-style-type: none"> - RQMT-A 1 : Dans une ville les tuiles métalliques représentent moins de 1% des matériaux de toiture. - RQMT-A 2 : Avant les années 1960, 100% des toitures en tuiles sont en terre cuite. - RQMT-A 3 : En France, pour les bâtiments construits entre 2000 et 2011 les toitures en tuiles sont réparties entre 89,9% de tuile en terre cuite, 9,2% de tuile béton et 0,9% de tuile métallique. | <ul style="list-style-type: none"> - RQMT-B 1 : A partir de 1960, en Île-de-France, les toitures en tuiles sont réparties entre 80% des tuiles en terres cuites et 20% des tuiles béton. | - |
| Zinc | <ul style="list-style-type: none"> - RQMZ-A 1: Avant 1980, les toitures en zinc sont à 100% du zinc naturel - RQMZ-A 2 : A partir de 1980 pour la rénovation des toitures anciennes en zinc, 90% du zinc naturel est utilisé contre 10% du zinc prépatiné. - RQMZ-A 3: Les toitures neuves en zinc sont réparties entre 70% du zinc prépatiné et 30% du zinc naturel. | <ul style="list-style-type: none"> - RQMZ-B 1: Dans la banlieue parisienne, les toitures en zinc sont réparties entre 75% de zinc naturel et 25% du zinc prépatiné (surtout quartz). | <ul style="list-style-type: none"> - RQMZ-C 1 : Pour les bâtiments construits à partir de 2005 les toitures en zinc sont réparties entre 80% du zinc naturel, 15% du zinc prépatiné et 5% du zinc coloré en masse. |

Règles d'identification des matériaux de gouttières suivantes :

- **RIG 1 :** Avant les années 1980 les matériaux de gouttières sont majoritairement en zinc et un peu de cuivre.
- **RIG 2 :** Le renouvellement des gouttières des bâtiments construits avant les années 1980 se fait majoritairement avec le même matériau.
- **RIG 3 :** La gouttière en cuivre est plutôt utilisée dans les régions montagneuses, sur les monuments et les constructions nobles.
- **RIG 4 :** Les gouttières en zinc sont remplacées par le même matériau en zinc.
- **RIG 5 :** Dans une toiture en ardoise naturelle, le matériau de gouttière est remplacé par le même matériau.
- **RIG 6 :** La plupart des renouvellements de gouttières des toitures en tuile sont faits par le même matériau.
- **RIG 7 :** La durée de vie d'une gouttière en zinc est de 50 ans.
- **RIG 8 :** Aujourd'hui le choix des matériaux de gouttière s'oriente vers le moins cher dans la construction économique.
- **RIG 9 :** Avant les années 2000 l'aluminium n'est utilisé en gouttières.
- **RIG 10 :** Avant les années 1980 le PVC n'est utilisé en gouttières.
- **RIG 11 :** Le matériau aluminium utilisé en gouttière est de l'aluminium laqué.
- **RIG 12 :** Les gouttières en PVC et en aluminium laqué sont majoritairement utilisées dans des ouvrages économiques.
- **RIG 13 :** L'acier inoxydable est utilisé en gouttière/chéneau très long à la place du zinc (cas marginaux).
- **RIG 14 :** La durée de vie d'une gouttière en PVC est comprise entre 10 ans et 30 ans ; il s'agit du matériau de gouttière le plus fragile.

Règles de corrélation entre la famille des matériaux/matériau de rampant et les matériaux de gouttière ou descente

| Famille des matériaux/Matériau | Classe de règles | | |
|---|--|---|---|
| | Classe A | Classe B | Classe C |
| Ardoise naturelle | - | -RCGA-B 1 : A partir des années 1980, pour les toitures en ardoise les matériaux de gouttières en zinc sont répartis entre 85% du zinc naturel et 15% de zinc prépatiné en gris foncé. | - |
| Matériaux économiques : Bardeaux bitumineux, Ardoises en fibres ciment, Acier laqué, Acier galvanisé, Plaque en plastique, Plaque en fibres ciments et Plaque bitumineuses | - RCGME-A-1 : Pour les couvertures en plastique les gouttières en PVC sont toujours utilisées. - RCGME-A 2 : Depuis les années 1980, pour une couverture économique (acier laqué, acier galvanisé, bardeaux bitumineux et ardoise fibrociment) la répartition des matériaux de gouttières est de 80% en PVC et 20% en matériaux autres. | - | - RCGME-C 2 : Depuis les années 1980 pour les bardeaux bitumineux les matériaux de gouttières sont répartis entre 70% de zinc et 30% de PVC. |
| Famille ou matériaux métalliques nobles : zinc, cuivre, acier inoxydable, aluminium, plomb et cuivre | - RCGMN-A : Pour une couverture métallique noble (zinc, cuivre, acier inoxydable, aluminium, plomb et cuivre) la gouttière et tous les accessoires de la toiture sont du même matériau que le rampant. | - | - |
| Tuile | | -RCGT-B 1 : Pour les toitures en tuiles construites avant les années 1950, la répartition des matériaux de gouttières est de 95% en zinc et de 5% en cuivre. -RCGT-B 2 : Entre 1950 et 1980 la réparation des matériaux de gouttières, pour les toitures en tuile est 60% en zinc et 40% en autres matériaux. -RCGT-B 3 : Entre les années 1980 et 2000, pour les toitures en tuile, les matériaux de gouttières sont répartis entre 70% zinc naturel, 20% PVC, 5% Aluminium laqué et 5% matériaux autres (cuivre, acier inoxydable et acier galvanisé). | |

Règles de corrélation entre le matériau du rampant et le matériau de la noue (RCRN)

| | |
|-------------------------------|---|
| <p>Règles classe A</p> | <p>-RCRN-A 1 : Pour une couverture métallique la noue est du même matériau que la couverture.</p> <p>- RCRN-A 2 : Jusqu'à 1900 les noues des toitures non métalliques étaient en Plomb.</p> <p>-RCRN-A 3 : Avant les années 1980, pour les toitures en ardoise, les matériaux de noues sont à 100% en zinc naturel.</p> <p>-RCRN-A 4 : A partir des années 1980, pour les toitures en ardoise, les matériaux de noues sont répartis entre 90% du zinc naturel et 10% de zinc gris foncé (anthra-zinc).</p> <p>- RCRN-A 5 : Pour les tuiles les noues sont à 100% en zinc naturel.</p> <p>- RCRN-A 6 : Pour les bardeaux bitumineux les noues sont à 100% en bardeaux.</p> |
|-------------------------------|---|

Règles de corrélation entre le matériau des éléments d'étanchéité et le matériau de la noue (RCRE)

| | |
|-------------------------------|--|
| <p>Règle classe A</p> | <p>-RCRE-A 1 : Pour une couverture métallique les éléments d'étanchéités sont du même matériau que la couverture.</p> |
| <p>Règles classe C</p> | <p>- RCRE-C 1 : Pour les bardeaux bitumineux les éléments d'étanchéité sont aussi en bardeaux et de temps en temps le mastic est employé pour combler certains petits trous.</p> <p>- RCRE-C 2 : Les matériaux utilisés pour l'étanchéité des fenêtres, cheminées et autres petits éléments des toitures non métalliques sont répartis entre 60% du zinc et 40% du plomb</p> <p>- RCRE-C 3 : Pour les toitures-terrasses, les éléments d'étanchéités (de la cheminée...) sont du même matériau que l'étanchéité de la toiture</p> |

Tableau-A 10 : Calcul des demi-intervalles de confiance sur l'évaluation des flux unitaires pour les contaminants métalliques établis dans la thèse de Robert-Sainte (2009).

$$IC_f = 1,96 \times f \times cv$$

Avec :

cv : coefficient de variation

f : flux unitaire

| Contaminant | 1,96 × <i>cv</i> |
|--------------------|-------------------------|
| Al | 0,184 |
| Ba | 0,047 |
| Cd | 0,184 |
| Co | 0,262 |
| Cr | 0,42 |
| Cu | 0,472 |
| Fe | 0,165 |
| Li | 0,073 |
| Mn | 0,092 |
| Ni | 0,080 |
| Pb | 0,13 |
| Sr | 0,071 |
| Ti | 0,24 |
| Zn | 0,167 |

CONCLUSION GENERALE

« Toute science commence comme philosophie et se termine en art. »

Will Durant

La méthode développée prend sens dans sa globalité comme une *œuvre d'art*. Elle est riche à travers la diversité des connaissances utilisées. Elle mobilise et met en cohérence des données et des outils issus de disciplines différentes : hydrologie urbaine, urbanisme, architecture, géographie, chimie, science humaine et science de l'ingénieur. La démarche employée montre, que ce n'est pas nécessaire d'être spécialiste dans un domaine mais il suffit de parvenir à opérer le rassemblement et l'intégration des éléments très différents pour appréhender et répondre à notre problématique sans pourtant avoir besoin d'approfondir chaque élément employé. Ainsi, dans notre thèse nous avons développé une méthode générale (applicable à tout contaminant et toute ville), opérationnelle et économique (les outils et les approches utilisées sont accessibles) pour évaluer les flux de contaminants émis par les matériaux de toiture à l'échelle urbaine.

Cette dernière partie de la thèse débute par une rétrospective des grandes lignes et des étapes marquantes du travail engagé. Aussi, une description des pistes d'amélioration de la méthode développée est effectuée. Le tout se termine par la présentation de quelques pistes de réflexion sur la démarche d'acquisition de données de flux annuels unitaires à petites échelles.

1. Une démarche novatrice pour l'évaluation des flux de contaminants à l'échelle urbaine

Aujourd'hui, nous assistons à un intérêt grandissant à évaluer et maîtriser l'impact d'une ville sur l'environnement. Ainsi, la notion de « ville durable » émerge et signifie une ville qui prend en compte les enjeux sociaux et économiques de l'urbanisme et participe aux principes de protection de l'environnement. Pour atteindre ce dernier objectif des travaux de recherche sont menés pour comprendre les processus et les phénomènes sociaux et économiques dans la ville causant des perturbations à l'environnement. La plupart des travaux se sont focalisés sur des études à petites échelles (bâtiment, quartier...). Les nouvelles recherches s'orientent de plus en plus vers la modélisation urbaine en développant des méthodologies et des outils, en particulier des modèles, pour mieux caractériser, concevoir, gouverner et gérer la ville (Tapadinhas *et al.*, 2012).

Notre travail s'est clairement inscrit dans cette logique. La méthode d'évaluation des flux de contaminants issus des ruissellements des toitures à l'échelle de la ville que nous avons développée peut être utilisée comme un outil d'aide à la décision pour les prescripteurs, les urbanistes et les aménageurs pour mettre en place des politiques de réduction des émissions

de contaminants par les matériaux de toiture. Cette méthode innovante permet d'établir un état des lieux des émissions par les toitures existantes dans la ville. Sur la base de cet état des lieux les différents acteurs peuvent définir d'une part un programme argumenté et orienté de renouvellement des toitures existantes sur le territoire urbain et, d'autre part, une stratégie de choix des matériaux de toiture pour les constructions dans les nouvelles zones à urbaniser.

1.1. Synthèse des grandes lignes de la démarche

L'échelle urbaine est une échelle complexe formée de plusieurs éléments (bâtiment, route, jardin, homme...). Pour aborder cette complexité, il ne faut pas dissocier ces éléments mais considérer toutes les interactions qui peuvent se produire entre les composantes. Parfois, la compréhension d'un phénomène se fait par la compréhension de son opposé ou de ses interactions avec d'autres phénomènes. Tel est le cas dans notre étude, l'émission de contaminants par les matériaux de toitures à l'échelle urbaine est un phénomène lié au bâtiment. Pour comprendre et évaluer ce phénomène nous avons sollicité et mis en cohérence d'autres connaissances telles que l'étude de l'histoire des matériaux de toitures, l'histoire de l'évolution du paysage urbain et l'histoire de l'architecture, l'étude du phénomène d'émission de contaminants à l'échelle du toit et l'étude des modes d'occupation du sol.

Un grand travail bibliographique a été engagé dans cette thèse afin de disposer d'une vision synoptique des matériaux de toiture nouveaux et anciens utilisés à l'échelle urbaine. Ainsi, des tableaux opérationnels ont été produits : deux tableaux listant les matériaux actuels des toitures inclinées et des toitures-terrasses et un tableau décrivant l'évolution historique des matériaux de toiture (apparition, disparition, évolution de composition...). Ces tableaux sont généraux et peuvent être utilisés à n'importe quelle échelle urbaine. Au niveau des émissions de contaminants par ces matériaux nous avons noté un manque d'informations. L'étude de la composition des matériaux montre un grand nombre de composants susceptibles d'être émis par les matériaux. Néanmoins, ces composants ne sont pas tous connus du fait qu'ils relèvent des « secrets de fabrication ». De plus, malgré l'importance accordée à l'étude des émissions par les matériaux de toiture, les travaux de caractérisation et de quantification des émissions de contaminants demeurent limités. En particulier, les données disponibles en termes de production de flux unitaires sont encore peu nombreuses.

La démarche de changement d'échelle – du toit à l'échelle urbaine – repose sur la notion de *situation-type d'émission* d'un contaminant par un matériau de toiture à laquelle est associé un flux unitaire unique. Cette notion propose une nouvelle définition de l'émission à l'échelle

du toit incluant *uniquement* les paramètres pertinents à l'échelle urbaine. C'est une notion générale applicable à tout contaminant émis par les matériaux des différents éléments de toitures. Nous avons dressé trois tableaux opérationnels des situations-types renseignées pour les trois contaminants métalliques les plus étudiés dans la littérature : le zinc, le plomb et le cuivre. Les situations-types associées à ces trois contaminants ne sont pas toutes renseignées faute de données de flux unitaires. Le manque de données de flux unitaires annuels concernent certains contaminants métalliques (ex : cadmium, nickel) et surtout les contaminants organiques (ex : biocides, phtalates). Ainsi, une réflexion sur la démarche d'acquisition de données de flux annuels unitaires à petites échelles sera menée dans la [Section 2](#).

Le calcul du flux à l'échelle urbaine est basé sur l'utilisation de différents *principes* méthodologiques *hiérarchisation, croisement, découpage, regroupement* et *majoration*. Ces principes sont des moyens très efficaces pour résoudre la problématique de changement d'échelle. Le principe de *hiérarchisation* est utile pour choisir, pour un contaminant donné, les situations-types émettrices les plus importantes à l'échelle urbaine qu'il convient alors de renseigner, les autres pouvant être négligées. Ainsi, dans le cas du zinc, les contributions des situations-types correspondants aux éléments d'étanchéités sont considérées comme d'ordre 2 par rapport aux autres éléments de toiture : le rampant, la gouttière et la noue. Donc, quelque soit l'échelle urbaine considérée, ces situations-types ne sont pas à prendre en compte dans le calcul du flux du zinc.

La quantification des émissions des situations-types choisies à l'échelle urbaine se traduit par la quantification des dimensions des différents éléments de toit. Ainsi, une démarche originale est employée pour exploiter des *bases de données urbaines* existantes (base des modes d'occupation du sol, cadastre, images aériennes) et les adapter ou les interpréter au prisme de la problématique particulière des émissions de toitures. Ainsi, les principes de *découpage* et de *croisement* sont utilisés pour diviser l'échelle urbaine en *entités homogènes*. Une entité consiste en un regroupement de bâtiments, caractérisée par une répartition propre de matériaux de toitures. Ces entités sont obtenues en croisant une *étude typologique* des bâtiments (élaborée à partir de la base des modes d'occupation du sol MOS) avec *l'histoire urbaine* et avec *l'histoire des matériaux de toiture*. Ainsi, le *principe de regroupement* des MOS a été utilisé pour aboutir aux classes de bâtiments ayant une même signature d'utilisation des matériaux de toiture. Le *croisement* de l'évolution urbaine de la ville d'étude et le tableau historique des matériaux de toiture a engendré le découpage la ville en zones historiques. Ce travail de découpage de la ville, bien justifié, a permis d'une part de mieux

quantifier les matériaux des différents éléments de toit et d'autre part d'identifier l'âge de ces matériaux. En effet, nous avons montré à travers le calcul du flux du zinc qu'il existe une variabilité de la distribution des matériaux de toitures par classe de bâtiments et par zone historique et ainsi une variabilité d'émission du zinc. Ceci montre que le phénomène d'émission dépend énormément de la morphologie urbaine de la ville (histoire et typologie de bâtiment). De nouveau le principe de *hiérarchisation* a été utilisé en limitant le calcul du flux à l'échelle de la ville de Créteil pour les classes de bâtiments représentant en cumul 95% de la surface totale de la zone historique.

La quantification des dimensions des différents éléments de toiture est effectuée pour chaque entité à partir d'une approche statistique. Il s'agit de déterminer à travers un échantillonnage aléatoire sans remise de bâtiments d'une entité donnée, la répartition des familles des matériaux de rampant ainsi que leurs longueurs de gouttières et de noues associées. Cette approche est complétée par un ensemble de *règles empiriques* permettant la quantification des matériaux des différents éléments de toitures à l'échelle de la ville. Ces règles sont élaborées à partir d'une enquête et d'entretiens menés auprès d'experts des matériaux de toitures (fabricants, syndicats...) ainsi que d'une étude historique et d'une étude du marché des matériaux de toiture. Ces règles, malgré les faiblesses qu'elles présentent, sont un outil très intéressant qui nous a permis d'avoir des données quantifiables à partir des informations qualitatives. En cas de manques de données, nous avons eu recours à l'application du *principe de majoration* correspondant à un calcul majorant le flux du contaminant émis, dans notre étude le zinc. Par exemple, dans la zone historique 1 (1900-1950) nous n'avons pas la répartition des matériaux de gouttières pour les toitures en ardoise. Ainsi, comme notre objectif est l'évaluation des émissions du zinc nous avons attribué une répartition majorant de 95% pour le zinc contre 5% pour le cuivre. Enfin, l'exploitation des spécificités de la ville (ex: matériaux interdits, histoire de la ville) a permis d'optimiser le travail de quantification.

Le développement et l'illustration de la méthode sont rendus possibles à travers l'évaluation du flux du zinc émis par l'ensemble des toitures de Créteil, à savoir 813 kg.an^{-1} avec une incertitude de 16,6% (Cette incertitude ne comprend pas l'incertitude liée à l'application des règles). Il s'est avéré que le rampant est la principale source d'émission du zinc mais les émissions par les autres éléments de toit ne doivent pas être négligées. Ainsi, l'émission par les noues reste faible à l'échelle de la ville, mais elle ne doit pas être complètement négligée surtout pour les classes habitats individuels et habitats collectifs. En d'autres termes, pour un gain de temps il sera possible de se limiter à l'identification des noues pour ces deux classes uniquement sans affecter trop le résultat final.

Les principes utilisés pour le changement d'échelle ont été tous très utiles pour atteindre notre objectif. Les principes de *découpage* et de *croisement* ont montré leur pertinence, d'une part pour passer de l'échelle du toit à l'échelle urbaine *via* la création d'entités homogènes, et, d'autre part, pour mieux appréhender la distribution des matériaux de toiture et leurs âges. Le principe de *regroupement* a permis d'adapter et d'exploiter les bases de données urbaines existantes, sa performance a été validée lors du calcul du flux du zinc dans la ville de Créteil. Néanmoins, quelques limites peuvent être signalées. Le choix des situations-types par hiérarchisation était dans le but d'optimiser le temps de calcul limité dans le cadre de cette thèse et donc il faudra étudier les situations-types correspondants aux éléments d'étanchéités. En effet, pour certains matériaux et contaminants, ces situations-types ne correspondent pas à des contributions qui peuvent être négligées, comme le cas du plomb émis par les étanchéités en plomb (Petrucci *et al.*, 2014). Le principe de *majoration* est un outil pour résoudre le manque de données et de moyens pour quantifier les matériaux de toitures.

Par rapport à la littérature, certains de ces principes ont été exploités dans les travaux de changement d'échelle. Ainsi, les principes de *regroupement*, de *majoration* et de *hiérarchisation* ont été utilisés dans le cadre d'une étude sur le développement de la récupération de l'eau de pluie à grande échelle dont la présente thèse s'est directement inspirée (Belmeziti *et al.*, 2013). Le principe de *regroupement* a été aussi utilisé dans une étude d'évaluation et d'exploitation du potentiel énergétique lié au bâtiment à l'échelle de la ville (Alessandrini, 2011). Une approche typologique a été privilégiée en regroupant les territoires en fonction de leurs ressources énergétiques. Le principe de *croisement* a été implicitement utilisé dans plusieurs études d'évaluation des phénomènes liés au bâtiment à l'échelle urbaine (Alessandrini, 2011; Izquierdo *et al.*, 2008; Bergamasco et Asinari, 2011; Belmeziti *et al.*, 2013). Par exemple, dans le cadre d'une méthode d'évaluation de la performance des toitures végétalisées intégrées dans une zone urbaine, le croisement des bases de données urbaines (ex : image 3D) avec des données sur la température et la pluviométries a été effectué (Hongbing *et al.*, 2011).

La méthode statistique comparée avec la méthode de traitement d'images aériennes a montré de meilleurs résultats pour la quantification des matériaux de rampant. Actuellement, des méthodes plus performantes de reconnaissance automatique des matériaux sont en cours de développement en France. Par exemple, une méthode basée sur l'analyse des images multispectrales croisées avec un modèle 3D permet de mieux quantifier les matériaux de toiture (Martinoty, 2005). L'avantage du modèle 3D est qu'il permet de distinguer entre une toiture inclinée et une toiture-terrasse. Pour des images de très haute résolution, ce modèle

permet de détecter une cheminée et un chien-assis mais toujours pas les autres éléments de toitures (gouttière, noue...). D'autres travaux sont en cours de développement au laboratoire MATIS : ils consistent à utiliser les images hyperspectrales de très haute résolution spatiale pour mieux différencier les matériaux de toitures. Ce type d'images reste assez rare et il est en cours d'acquisition par le MATIS pour les villes d'Amiens et Toulouse (Adeline *et al.*, 2013). Enfin, pour mieux quantifier les matériaux de toitures, A. Le Bris, propose de croiser la classification avec l'outil AVET (cf. Chapitre 3.3) avec un modèle numérique de surface (MNS). Ce modèle permet surtout de différencier une toiture inclinée et une toiture-terrasse ce qui permet de lever les confusions entre les matériaux de ces deux types de toitures. Néanmoins, ce modèle MNS n'est disponible que pour quelques villes en France comme Amiens, Toulouse et Paris. Ces méthodes de reconnaissance automatique des matériaux de toiture bien qu'elles sont automatisables avec des outils de plus en plus développés présentent des limites. Tout d'abord, elles vont prendre encore plus de temps pour être mises au point et encore plus de temps pour être généralisées à toute la France en particulier pour les données hyperspectrales et le modèle MNS. Ensuite, les outils employés dans ces méthodes ne sont pas accessibles (dans notre thèse la classification a été établie dans le cadre d'une collaboration avec le MATIS). De plus, l'évaluation des matériaux des différents éléments de toiture tels que la gouttière, la noue et même la descente n'est pas prise en compte dans ces méthodes.

Notre méthode est donc susceptible de devenir la méthode de référence pour l'évaluation des émissions de contaminants dans le ruissellement des toitures à l'échelle de la ville. Elle permet de mieux quantifier les matériaux des éléments de toitures. Elle est accessible, opérationnelle et surtout applicable à toute échelle urbaine. Les outils employés dans cette méthode ne sont pas coûteux et il n'y a pas besoin d'utiliser un outil de classification, lequel n'est pas toujours accessible. Enfin, l'incertitude générée par cette méthode dans le cas du calcul du flux du zinc est satisfaisante (16,6%) mais elle peut être optimisée.

1.2. Vers une méthode plus performante

Le travail effectué durant cette thèse a présenté des limites qui ouvrent de nouvelles pistes de recherche. Tout d'abord, *l'étude et la validation des règles* nécessite un travail plus approfondi. Ensuite, la *méthode statistique de quantification des dimensions des éléments de toitures* doit être élargie à l'évaluation des autres éléments de toit. En outre, un grand manque de *données de flux unitaires associés aux situations-types* doit être comblé. Ainsi, il faut

définir une stratégie de production de ces données. Cette discussion sera effectuée dans la [Section 2](#). Enfin, la méthode générale proposée peut être associée à un modèle intégré pour une validation approfondie.

Le travail sur les règles devra être renforcé. En effet, les règles empiriques élaborées dans le [Chapitre 2.4](#) et appliquées dans la ville de Créteil n'ont pas toujours été suffisantes pour aboutir à des données quantifiées. De plus, la fiabilité de certaines n'est actuellement pas suffisamment avérée. Ainsi, il a été nécessaire d'utiliser des éléments de connaissances spécifiques à Créteil et le principe de majoration pour résoudre quelques ambiguïtés.

Pour résoudre cette faiblesse dans la perspective de l'utilisation des règles sur un autre cas d'étude la stratégie suivante pourra être adoptée. En *cas d'absence de règles quantifiées* (tel est le cas notamment des répartitions des matériaux d'étanchéité pour les toitures-terrasses ainsi que les matériaux des étanchéités des éléments de la toiture inclinée), il est nécessaire de mener d'autres entretiens ciblés avec des experts (fabricants, étancheurs) des matériaux des étanchéités des toitures-terrasses et des couvreurs pour les toitures inclinées. En cas de *règles existantes*, les règles de classe A sont considérées comme validées. En revanche, les règles B et C nécessitent un travail de validation, voire de correction. Pour réaliser ce travail nous proposons d'élaborer une analyse de sensibilité croisée avec un travail d'enquête. Ainsi, afin de tester l'influence des règles sur le calcul total de flux de contaminants, il convient d'attribuer des poids (1 ; 0,5 ; 0,9...) à chaque règle appliquée et de tester la variabilité du flux global en fonction des poids attribués. Pour les règles non validées et qui se révéleraient avoir une grande sensibilité sur le calcul de flux, il convient d'effectuer une enquête ciblée afin de solidifier et valider les règles en questions. Il s'agira de reprendre et ajuster les questionnaires déjà utilisés dans notre enquête et de la réaliser auprès d'une population complémentaire d'experts. Il faudra se focaliser sur les experts leaders du matériau en question ainsi que des couvreurs et de réaliser des entretiens approfondis avec eux.

La méthode statistique de quantification des dimensions des éléments de toitures développée devient de moins en moins coûteuse pour des entités très grandes. En effet, pour assurer une erreur absolue de 4%, il faut tirer 218 bâtiments d'une entité de 500 bâtiments contre 283 bâtiments pour une entité de 1000 bâtiments. Le choix des tailles d'échantillonnage s'effectue à partir des abaques développés dans le [Chapitre 3.2](#). Pour le calcul à Créteil nous avons utilisé la courbe la moins exigeante pour une erreur absolue tolérée à 16%. Ce choix, nous a permis d'obtenir une erreur relative de 16,6% sur le calcul du flux total de zinc à l'échelle de la ville de Créteil. Ainsi, pour améliorer ce résultat, il convient de choisir des tailles

d'échantillonnages à partir des autres courbes à 12% ou 8%. Pour les courbes à 4% et 2%, il n'est pas nécessaire de les utiliser car elles sont très coûteuses.

La méthode a été validée pour l'évaluation des surfaces des familles des matériaux de rampants ainsi que les longueurs de gouttières. Par contre, nous avons noté que l'incertitude calculée sur les longueurs des noues à partir du Théorème sur les proportions est sous-estimée. Mais, à travers la concrétisation de la méthode à Créteil, nous remarquons bien que la contribution des noues en termes de flux est très faible (1,3% de l'émission globale du zinc) à l'échelle de la ville par rapport à la gouttière et au rampant. Aussi, approfondir le calcul d'incertitude sur les noues ne nous paraît pas nécessaire pour les raisons suivantes, tout d'abord, à partir des années 1900, les noues sont toutes en zinc ainsi la situation-type d'émission du zinc par les noues est la plus importante situation-type associée à la noue et qui a été étudiée dans cette thèse. Ensuite, les noues ne sont pas toujours présentes sur les toitures. Les classes « habitats individuels » et « habitats collectifs » sont les classes ayant la plus grande probabilité d'avoir des noues et même dans ces classes la contribution des noues en termes d'émission demeurent très faibles (moins de 2,5%). Enfin, les règles de quantification des matériaux de noues sont de classe A, donc validées. Dans ce cadre, le calcul effectué pour la plus importante situation-type associée à la noue pour des classes de bâtiments appartenant à une ville représentative (Créteil apparaît comme une sorte de « véritable catalogue » de toutes les architectures développées dans les villes Françaises depuis la révolution industrielle) montre une faible contribution. Ainsi, l'erreur sur le calcul des longueurs de noues reste faible à n'importe quelle échelle urbaine.

Il est important d'étendre cette méthode statistique pour calculer les longueurs de descentes et des éléments d'étanchéité. D'une part, l'émission de la descente, qui a le même matériau que la gouttière (d'après la règle *RQD-A*), sera aussi importante que la gouttière. Ainsi, il est nécessaire de développer une méthode de quantification des descentes basée sur deux étapes principales, la première consiste à acquérir des données de flux unitaires d'émission de contaminants par les descentes (cf. [Section 2](#)). La deuxième étape se focalise sur l'évaluation des longueurs de descentes à l'échelle de la ville en appliquant et adaptant la méthode statistique déjà développée. Nous aurons *a priori* les mêmes résultats d'échantillonnage validés pour les gouttières puisque la descente est la continuité de la gouttière. En d'autres termes, l'échantillon représentatif pour les gouttières le sera pour les descentes. Il faudra rajouter une information complémentaire sur la *hauteur du bâtiment* (disponible à partir de la BD-TOPO) ainsi que le *nombre de descentes* (une donnée à identifier à partir des DTU ou des données de fabricants).

D'autre part, les émissions à grande échelle des éléments d'étanchéité s'avèrent non négligeables. En effet, dans un travail récent (Petrucci *et al.*, 2014) l'évaluation des émissions du plomb dans le bassin versant de Sucy en Brie (France) sont dues à 94% aux éléments d'étanchéité. Ainsi, il faudra développer une méthode de quantification de ces éléments à l'échelle de la ville en adaptant aussi la méthode statistique. Pour les éléments d'étanchéité, comme pour les noues, nous pouvons mesurer uniquement leurs longueurs à partir d'une image aérienne. La quantification de ces longueurs à l'aide de la méthode statistique déjà développée s'avère plus difficile. En effet, les éléments d'étanchéité sont très variés (élément pour fenêtre, pour cheminée...), il faudra ainsi, effectuer un travail typologique pour identifier ces éléments. Ensuite, il faudra tester la performance de la méthode statistique dans l'évaluation des longueurs de ces éléments.

La validation de notre méthode s'est avérée très difficile. En effet, il est impossible de mesurer expérimentalement les émissions des toitures à l'échelle de la ville. En outre, les eaux pluviales collectées dans les réseaux d'assainissement sont un mélange de contaminants issus de différentes surfaces urbaines. De plus, à Créteil, aucune donnée expérimentale des émissions du zinc par les toitures ou par d'autres sources n'a été trouvée. Néanmoins, nous avons essayé de valider nos résultats en les comparant à d'autres études que ce soit au niveau du flux calculé ou au niveau de l'incertitude évaluée. La comparaison montre que les résultats de notre étude rentrent bien dans la gamme des valeurs identifiées dans la littérature.

Une validation approfondie de cette méthode pourrait être effectuée dans le cadre d'un modèle intégré d'évaluation des flux de contaminants issus de différentes sources dans une ville. Mais même avec une telle approche, cette validation reste très difficile car les processus au niveau des réseaux d'assainissement sont très mal connus à ce jour. Dans le programme OPUR, un nouveau modèle intégré est mis au point (Petrucci *et al.*, 2014) : il est basé sur une approche SFA « Substance Flow Analysis ». L'objectif de ce modèle est d'étudier l'émission d'un contaminant donné issu de différentes sources à l'échelle d'un bassin versant. L'approche SFA se fonde sur des bilans de masse pour chaque compartiment du bassin versant (chaussée, toiture, atmosphère...). La difficulté majeure dans l'application de cette méthode réside dans la quantification de l'ensemble des flux. En effet, les données de flux issues de différentes sources ne sont pas toujours disponibles et leur mesure est dans la plupart des cas difficile à grande échelle spatiale. Ainsi, notre méthode étant applicable à n'importe quelle échelle urbaine (bassin versant, ville...), peut servir à évaluer les émissions des toitures qui sont une source importante des émissions de contaminants. Ces résultats peuvent être intégrés dans le modèle SFA.

Pour finir, il nous semble possible de rendre plus efficace et plus rapide l'application de la méthode de quantification des flux à l'échelle urbaine. A cette fin, nous proposons d'appliquer notre méthode à au moins trois autres villes dans les mêmes conditions que Créteil. Nous chercherons à avoir un même découpage historique pour créer des entités homogènes comparables dans les différentes villes. Le choix des villes se fera par rapport à un ensemble de critères tels que la facilité d'accéder aux données (PLU, réglementations, base MOS...). Nous comparerons les résultats obtenus sur les différentes villes et nous essayerons de sortir des ratios de distribution des matériaux de toiture par zone historique et par classe de bâtiments à l'instar du [Tableau 56](#) établi dans le Chapitre 3.3. Le but sera de généraliser ces ratios (avec un calcul d'incertitude) à toute échelle urbaine. Ainsi, l'application de la méthode se limitera à découper la ville en entités et ensuite pour chaque entité nous appliquons son ratio associé de répartition des matériaux des différents éléments de toitures. Cette méthode peut être appliquée de manière opérationnellement plus rapide à toute nouvelle ville, voire à des échelles différentes.

1.3. Perspectives d'application de la méthode

L'application de la méthode développée peut s'élargir à l'échelle régionale. La démarche employée sert à résoudre une nouvelle problématique de changement d'échelle celle de l'évaluation du potentiel de végétalisation.

Tout d'abord, cette méthode pourra être extrapolée au-delà de l'échelle de la ville pour embrasser un ensemble régional. Par exemple, elle pourra être appliquée à l'Ile-de-France en utilisant les mêmes principes que ceux développés sur Créteil. La création des entités sera basée sur les classes de bâtiments déduites de la base de données MOS laquelle est fournie pour toute l'Ile-de-France. Tout d'abord, la ville de Paris sera traitée indépendamment car il s'agit d'une zone spécifique du point de vue historique. En effet, l'urbanisation de Paris remonte au milieu du 19^{ème} siècle et est caractérisée par une architecture haussmannienne préservée jusqu'à aujourd'hui dans le cadre de la loi du 4 août 1962 complétant la législation sur la protection du patrimoine historique. Le travail à partir de la ville de Créteil nous permet de conclure que le découpage historique de Créteil est transposable aux banlieues parisiennes. En effet, toutes les villes de la banlieue ont subi la période de construction massive durant les trente glorieuses. A cette période s'ajoutent deux autres périodes, l'une située avant (à partir de la révolution industrielle) et l'autre après les trente glorieuses. Nous obtenons ainsi trois grandes périodes. Il ne nous apparaît pas nécessaire de subdiviser davantage ces périodes,

d'une part, car durant chaque période il n'y a pas un événement historique qui a bouleversé l'utilisation des matériaux de toiture. D'autre part, ces périodes vont être croisées avec 12 classes de bâtiments ce qui conduit à 36 entités. Ainsi, avec des entités de très grandes tailles, nous pourrions appliquer aisément le reste de la démarche de quantification décrite dans le Chapitre 3.4 (méthode statistique, application des règles...). Notons, que dans la thèse d'A. Belmeziti (2012) une approche de changement d'échelle a été développée pour évaluer l'impact potentiel de l'utilisation de l'eau de pluie dans le bâtiment sur les consommations d'eau potable à l'échelle urbaine. La méthode développée à l'échelle de l'Ile-de-France, s'est basée sur la définition d'une échelle intermédiaire celle de la commune. Dans notre cas, pour l'évaluation à l'IDF, nous n'avons pas besoin de passer par cette échelle. En effet, la pratique de récupération de l'eau de pluie est très liée à la politique réglementaire de la commune et son évaluation nécessite un repérage de ces réglementations. Alors que dans notre étude, même si la réglementation influence l'utilisation des matériaux de toitures, cette dernière est étroitement liée à des facteurs historiques et donc notre échelle intermédiaire c'est l'entité et non la commune.

La démarche employée dans ce travail de thèse nous servira pour résoudre une nouvelle problématique celle d'évaluation du potentiel des toitures végétalisées dans le cadre d'un nouveau projet TERRACE (**T**oitures **v**égétales pour **R**af**R**aichir les **A**mbiances **C**limatiques urbain**ES**) piloté par le GEMCEA¹¹¹. L'objectif de ce projet est l'évaluation du potentiel rafraîchissant d'une toiture végétalisée. Il s'agit de qualifier et de quantifier les modifications du bilan d'énergie induit par l'introduction de la végétalisation à l'échelle de la ville. Dans le cadre de ce projet, notre tâche consiste à évaluer et représenter une cartographique du potentiel de végétalisation des toitures de l'agglomération de Paris. Ce potentiel se manifeste comme la proportion des toitures de la ville potentiellement végétalisables. Ce travail sera couplé avec un modèle d'estimation de l'évapotranspiration par les toitures végétalisées pour évaluer les flux de chaleur latente qui sont une partie du bilan radiatif influençant le micro climat urbain.

Pour le calcul de ce potentiel, nous allons appliquer les approches et les outils utilisés dans notre méthode. Ainsi, nous proposons une démarche pluridisciplinaire, basée sur l'exploitation et la réorganisation de la base MOS-IAU pour obtenir des classes de bâtiments en fonction de leur aptitude à avoir une toiture végétalisée. La ville de Créteil nous servira comme un site d'approfondissement du calcul du potentiel de végétalisation en étudiant les

¹¹¹ Groupement pour l'Evaluation des Mesures en Continu dans les Eaux et en Assainissement à Nancy

autres critères intervenant dans ce calcul tels que la hauteur du bâtiment (influençant le phénomène d'évapotranspiration) et le poids des réglementations dans la mise en œuvre des toitures végétalisées (ex : PLU). La méthode statistique permettra d'affiner le calcul de la surface végétalisable. Il s'agit de renseigner et d'évaluer à partir d'un échantillon de bâtiments, la surface occupée par l'encombrement (ex : système solaires) des toitures terrasses et donc la surface effectivement végétalisable.

La méthode développée devient plus riche et valorisée lorsque toutes les situations-types d'émission de contaminants seront renseignées. Ainsi, il est important d'enrichir la base de données de flux unitaires associés aux situations-types non renseignées. Pour cela, il est important d'avoir une réflexion sur les pistes d'enrichissement de cette base.

2. Orientation de la démarche de production de données de flux unitaires annuels pour l'évaluation à l'échelle urbaine

« La science des projets consiste à prévenir les difficultés de l'exécution. »

Vauvenargues

Dans notre revue bibliographique, nous avons montré que la connaissance des émissions par les matériaux de toiture est très parcellaire à ce jour malgré l'importance accordée à ces émissions. Les données de flux unitaires sont très limitées en particulier pour les contaminants non métalliques. Ainsi, une grande partie des situations-types restent non renseignées.

L'étude de la composition des matériaux montre un grand nombre de composants susceptibles d'être émis par les matériaux. Néanmoins, ces composants ne sont pas toujours bien explicites. De plus, les travaux sur la contamination des eaux de ruissellement de toiture montrent parfois des contaminants qui sont *a priori* absents dans la composition du matériau étudié comme les pesticides, les HAP et les PCB. Ceci s'explique d'une part par un apport atmosphérique en temps sec. D'autre part, certains contaminants peuvent être incorporés volontairement ou non volontairement en très faibles quantités dans la composition du matériau et ils ne sont pas déclarés.

Nous avons montré que les travaux sur les émissions par les matériaux de toiture se sont focalisés sur la caractérisation et la quantification de ces émissions à petites échelles sans mettre en perspective ces données par rapport à une problématique urbaine. En d'autres termes, le travail bibliographique montre beaucoup de données d'émission de contaminants

exprimées majoritairement en termes de concentrations événementielles mais qui ne sont pas toujours facilement exploitables pour résoudre des problématiques urbaines. Et même pour les données exploitables, leurs conditions de production restent spécifiques ce qui ne permet pas de garantir la fiabilité de leur utilisation à grande échelle.

Aujourd'hui, par rapport à notre objectif d'évaluation des flux de contaminants à l'échelle de la ville, nous avons besoin de données de flux unitaires moyens annuels pour renseigner les situations-types d'émission de contaminants ce qui nous amène à repenser à la phase d'acquisition des données à l'échelle expérimentale. En effet, nous avons montré que les paramètres influençant l'émission à l'échelle de la toiture ne sont pas tous déterminants à l'échelle urbaine et interannuelle (ex : orientation du toit, intensité de la pluie). Ainsi, pour obtenir des données de flux moyens annuels nous suggérons d'établir des dispositifs expérimentaux efficaces et moins coûteux en intégrant uniquement les paramètres influençant l'émission à l'échelle urbaine.

Dans cette section, nous allons tout d'abord, dresser une liste des situations-types prioritaires qu'il convient de renseigner en termes de flux unitaires associés. Ensuite, en fonction du type de contaminant, nous allons orienter le programme d'acquisition de données.

2.1. Renseignement des situations-types

En analysant les règles d'identification et de quantification des matériaux des différents éléments de toiture ainsi que la bibliographie effectuée, il est possible de dégager certaines orientations en termes de données à acquérir au regard de la notion de situation-type. A ce titre, le cas des contaminants métalliques et des contaminants organiques doit être distingué.

Pour les contaminants métalliques, il paraît important de s'intéresser aujourd'hui plus en détail aux éléments singuliers et, de façon plus générale, aux scénarios d'écoulement différents de celui de l'écoulement sur un rampant (gouttières, descentes, noues...). Peu de travaux ont en effet investi la caractérisation des écoulements sur ce type d'éléments. Depuis 2 ans, des travaux en ce sens ont été initiés en concertation avec le CSTB sur la plate-forme AQUASIM (noues et points singuliers en plomb, gouttières et descentes en différents matériaux) en ce qui concerne la caractérisation des émissions de contaminants métalliques.

Pour les contaminants organiques, un grand nombre de situations-types sont encore indéfinies. Aussi paraît-il notamment important de s'orienter vers la caractérisation des émissions issues de matériaux organiques (notamment des différents types de membranes

d'étanchéité de terrasses) ou de revêtements organiques de matériaux métalliques (laques en particulier)¹¹².

L'émission de contaminants dépend de l'âge du matériau émetteur. Ainsi, par souci de réduire le coût de production de données, il conviendra de chercher à limiter le nombre de matériaux anciens à tester. Ce travail dépend de la nature - métallique ou organique - du contaminant concerné. D'après l'évaluation du flux du zinc à l'échelle de la ville de Créteil, nous avons remarqué que les flux de contaminants métalliques pour les matériaux neufs n'ont été utilisés qu'en cas de manque de données pour les matériaux anciens. En d'autres termes, à l'échelle d'une ville existante, la grande majorité des toitures est *de facto* ancienne. En conséquence, il n'est pas toujours nécessaire de produire des flux de contaminants métalliques pour des matériaux neufs. Cela peut toutefois se révéler nécessaire pour les situations associées à des traitements de surface en usine ou lors de la phase d'exploitation du bâtiment. En effet, il a été montré que, même si elle reste significative plusieurs mois après le traitement, la contamination en biocides déposés par épandage sur les toitures diminue sensiblement avec la succession des pluies (Van de Voorde, 2014).

Pour les matériaux anciens, il faudra définir une stratégie pour choisir l'âge ou les âges qu'il conviendra d'étudier. Cela suppose de mener une réflexion à deux niveaux. En premier lieu, il s'agit de savoir si l'âge apporte une information supplémentaire sur la composition du matériau. En effet, nous avons montré que la composition des matériaux a évolué au cours du temps, par exemple le cadmium existe pour les matériaux en zinc produits avant 1983. Ainsi, un matériau en zinc fabriqué avant l'interdiction du cadmium, induisant à une nouvelle situation-type, devra être étudiée. En second lieu, pour des matériaux de même composition mais ayant des âges différents l'émission n'est pas la même. Dans ce cas, il faudra à terme regarder s'il est possible d'identifier un âge critique pour le phénomène d'émission. A ce niveau, il convient de signaler que les dynamiques temporelles d'émission n'étant pas bien connues, un travail en situation expérimentale de laboratoire est à prévoir. Afin de limiter le nombre d'expérimentations à réaliser, il pourra être envisagé de raisonner par famille de matériaux et, pour chacune des familles, caractériser cette dynamique qui permettra de déboucher sur des scénarios de situations-types.

¹¹² Il convient de noter ici une difficulté supplémentaire pour certains matériaux organiques : leur composition peut être extrêmement variable sur certains paramètres, comme cela été montré sur les émissions de BPA par les gouttières en PVC (Lamprea, 2012).

2.2. Stratégie d'acquisition de données

La démarche d'acquisition de données se manifeste selon deux objectifs différents. D'une part, si les contaminants sont *non connus*, il s'agit d'un travail d'identification des contaminants émis par les matériaux non étudiés dans la littérature. Il conviendrait de parvenir à terme à la définition de procédures « standard » de caractérisation systématique des matériaux en faisant appel à du screening non ciblé de polluants. Plusieurs matériaux devront être testés systématiquement pour identifier leurs émissions en termes de contaminants : un travail en laboratoire qui devra être complété par un travail en conditions réelles (des bancs d'essai pour l'évaluation des flux). D'autre part, si les contaminants sont *connus*, il s'agit d'un travail ciblé de quantification des flux de contaminants émis par les matériaux. De plus, il faudra hiérarchiser les situations-types pour les contaminants qu'on cherche à évaluer. Dans la suite, nous décrivons les pistes d'acquisition de données pour ces deux cas de figure.

L'étude de la composition des matériaux synthétiques de toitures (étanchéités de terrasse, tuiles en plastiques, etc.) montre une palette riche de molécules susceptibles d'être émises par temps de pluie. L'émission de ces contaminants n'est pas encore étudiée. De plus, si quelques molécules sont connues dans la composition des matériaux d'autres peuvent être présentes mais non identifiées. Il est donc nécessaire d'identifier et évaluer l'émission de ces molécules. Dans ce cas nous avons besoin de créer pour chaque matériau une liste des contaminants qu'il émet par temps de pluie avant de passer à l'évaluation des flux. Ceci nécessite un travail expérimental en laboratoire. Il s'agit d'effectuer des expériences standardisées avec des analyses des émissions de matériaux non ciblées. En d'autres termes il s'agit d'effectuer un screening des molécules émises.

Ayant la liste des contaminants émis par les matériaux, une étape de hiérarchisation des contaminants à étudier en priorité pourra être établie. Il conviendra toutefois de préciser les critères présidant à cette hiérarchisation. Pour la population des contaminants issus de cette phase de priorisation, l'évaluation des flux de ces contaminants pourra être menée en suivant une démarche que nous allons nous attacher à décrire.

L'étude expérimentale étant coûteuse et longue, elle devra être élaborée uniquement en cas de besoin. Notre objectif est d'avoir un programme expérimental non coûteux. Pour cela, le programme expérimental devra viser l'évaluation des flux associés à différentes situations-types pour différents contaminants. Tout d'abord, la première étape consiste à choisir une palette de contaminants pour lesquels les analyses seront effectuées en parallèles pour un gain au niveau du temps et du travail expérimental. Ensuite, il convient de hiérarchiser ses

situations-types par rapport à leurs potentiels émissifs. La hiérarchisation est basée sur plusieurs critères. Si le contaminant est un composant principal dans la masse du matériau ou du traitement de surface du matériau ou s'il est issu des pratiques d'entretiens, les autres modes de présence du contaminant dans le matériau sont de deuxième ordre. Si la répartition du matériau de l'élément de toit est non négligeable à l'échelle de la ville, les situations-types qui sont associées devront être étudiées (exemple *a contrario*: les gouttières en aluminium naturel étant très négligeables, cette situation pourra être écartée). Par exemple, si on prend le cas du plomb, nous savons qu'en tant que rampant, en France le plomb en surface est quasiment négligeable, donc nous pouvons nous contenter des données produites par [Robert-Sainte \(2009\)](#) comme données représentatives pour toute la France. Par contre, pour les éléments d'étanchéité qui sont très utilisés en toitures non métalliques un besoin de production de données se présente, ainsi les situations-types associées à ces éléments de toit devront être étudiées. Donc, les situations-types du contaminant plomb prioritaires sont : les éléments d'étanchéité en plomb, les gouttières et les descentes en PVC (les anciennes gouttières comprenant des adjuvants à base de plomb). Notons que dans le Chapitre 3.4 nous avons dressé un tableau hiérarchisant les situations-types de trois contaminants : plomb, zinc et cuivre (cf. [Tableau 58](#)).

En outre, il convient de choisir le site d'étude. En effet, les conditions atmosphériques sont variables d'un site à un autre, ainsi *faut-il effectuer un travail d'acquisition de données pour chaque site d'étude ?*

L'étude effectuée dans le Chapitre 2.2, montre que, pour un pays donné, les émissions pour un même type de site (urbain, industriel...) sont comparables. En France nous disposons de deux études effectuées sur l'émission des métaux par les matériaux de toiture, un travail a été conduit sur des matériaux tests ([Robert-Sainte, 2009](#)) en région parisienne. L'autre étude a été menée sur des toitures réelles à Nantes ([Lamprea, 2009](#)). La comparaison des deux études est faite pour le toit en zinc (comparé au zinc ancien). Les flux annuels de zinc sont comparables dans les deux cas, 3,2 à 3,87 g/m²/an¹ ([Robert-Sainte, 2009](#)) contre 3,42 g/m²/an ([Lamprea, 2009](#)). En Suède, les sites urbains présentent des flux d'émission de cuivre par les matériaux en cuivre neuf entre 1 et 1,62 g/m²/an¹.

Ainsi, il n'est pas nécessaire d'effectuer une acquisition de donnée pour chaque site d'étude. Nous proposons de choisir dans chaque pays trois types de sites : péri-urbain, urbain, et industriel pour lesquels une acquisition de données devra être effectuée. En première approche, cette typologie des sites pourra être considérée comme représentative de tous les sites du pays. Une autre piste qui nous semble intéressante est, par exemple, d'acquérir des

données en fonction des zones bioclimatiques par continent. En effet, pour des zones situées au niveau de l'équateur avec un climat spécifique (pluvieux), les émissions seront nécessairement différentes que dans des pays européens.

Le dispositif expérimental doit tenir compte uniquement des paramètres influençant l'émission à l'échelle urbaine. Ainsi, le paramètre pertinent est la surface projetée ou la longueur projetée de l'élément de toiture. Les résultats des émissions seront rapportés à la surface projetée ou à la longueur projetée. Pour tenir compte de ces paramètres nous suggérons de définir un modèle standard réduit d'une toiture réelle. Il s'agit de fixer la taille, l'inclinaison des bancs d'essai. Il convient de choisir des petites dimensions des matériaux des éléments de toiture à étudier. En d'autres termes, nous chercherons à installer plusieurs mini échantillons d'éléments de toiture sur un grand banc d'essai.

Le travail expérimental est coûteux au niveau des techniques d'analyse d'eau. Aussi, il est préférable de limiter le nombre d'analyses à effectuer. Dans la littérature nous remarquons que les analyses des échantillons d'eau de pluie collectée s'effectuent tous les mois ou à chaque événement pluvieux. Sachant que notre objectif est d'avoir une valeur unique de flux annuel du contaminant choisi pour chacune de ses situations-type, il faudra donc une stratégie de réduction du nombre d'analyses.

Le protocole d'analyse de données d'émission dépend principalement de la nature du contaminant recherché : métallique ou organique. Les contaminants métalliques sont non dégradables ce qui permet de les conserver pendant une longue période. Ainsi, pour limiter le nombre d'analyses, il convient de collecter les eaux de pluie pour l'ensemble des événements pluvieux et puis faire une seule analyse pour évaluer le flux.

Au contraire des contaminants métalliques, les contaminants organiques sont rapidement dégradables et donc ne peuvent pas être conservés longtemps ce qui nécessite un échantillonnage et une analyse rapide. Dans certains laboratoires, les échantillonnages sont effectués à chaque événement pluvieux avec une congélation de ces échantillons. Mais l'impact de la décongélation sur la molécule considérée n'est pas connu. Cette piste reste la moins coûteuse par rapport à une analyse tous les événements pluvieux.

Nous voudrions conclure ce voyage au pays des toitures avec cette citation d'Aristote : *«La science consiste à passer d'un étonnement à un autre »* en espérant que notre thèse constituera une ouverture vers de nouveaux horizons créatifs dans le domaine de la modélisation urbaine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abram, J., Monnier, G. (1999). L'architecture moderne en France Tome 2 : Du chaos à la croissance 1940-1966 . Ed. Picard. 327p.
- Adeline, K.R.M., Le Bris, A., Coubard, F., Briottet, X., Papanoditis, N., Viallefont, F., Rivière, N., Papelard, J.P., David, D., Déliot, P., Duffaut, J., Poutier, L., Foucher, P.V., Achard, V., Souchon, J.P., Thom, C., Airault, S., and Maillet, G. (2013). Description de la campagne aéroportée umbra : étude de l'impact anthropique sur les écosystèmes urbains et naturels avec des images multispectrales et hyperspectrales : Urban Material characterization in the sun and shade of Built-up structures and trees and their Retrieval from Airborne image acquisitions over two French cities (UMBRA). *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*, 79-92.
- Ademe (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) (2004). Bâtiment et démarche HQE. ADEME Direction du Bâtiment et des Energies Renouvelables. 20p
- Adivet (Association pour le Développement et l'Innovation en Végétalisation Extensive de Toiture), CSFE (Chambre Syndicale Française de l'Étanchéité), SNPPA Syndicat National du Profilage des Produits Plats en Acier) et UNEP (Union nationale des Entrepreneurs du Paysage) (2003). Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées. 36p.
- Afnor. (1996). NF EN 988, Zinc et Alliages de Zinc : Spécifications pour produits laminés plats pour le Bâtiment.
- Afnor. (2007). NF EN 12588.Plomb et alliages de plomb. Feuilles de plomb laminées pour le bâtiment.
- Aguiléa, V., Leurent F. (2012). Affectation dynamique du trafic sur un réseau de transport routier. Extrait du document « Modélisation urbaine : de la représentation au projet » (Tapadinhas *et al.*, 2012). 196-199.
- Alessandrini, J.M. (2011). Comment aborder la question du bâtiment et de l'énergie à l'échelle de la ville? Paris: CSTB.
- Alexander, C., Smith-Voysey, S., Jarvis, C., and Tansey, K. (2009). Integrating building footprints and LiDAR elevation data to classify roof structures and visualise buildings. *Computers, Environment and Urban Systems* 33, 285-292.
- Alsupa, S.E., Ebbsa, S.D., Battagliaa, L.L., and Retzlaff, W.A. (2011). Heavy metals in leachate from simulated green roof systems. *Ecological Engineering* 37, 1709–1717.
- ANAH (Agence nationale de l'habitat) (2012) Fiche technique : Toitures-terrasses, 8p. http://www.anah.fr/fileadmin/anahmedias/Textes_et_publications/Fiches/Fiches_techniques/FT19_Toiture_Terrasse.pdf (consulté le 12/01/2014)
- AOCDTF (Association Association Ouvrière des Compagnons du Devoir du Tour de France). (1989) *Encyclopédie des métiers - L'art du Couvreur*, p. 1872.
- Arcelor, (2002). Guide pratique UGINOX FTE. 20p.
- Arval (2009). Le guide des matières. Arval d'ArcelorMittal. 44p.
- Asensio, N. (2005). Architecture bois. Edition L'Inédite: Paris, 288 pages.
- Azimi, S. (2004). "Sources, flux et bilan des retombées atmosphériques de métaux en Ile-de-France", Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

- Azimi, S., Rocher, V., Muller M., Moilleron, R., and Thevenot, D.R. (2005). Sources, distribution and variability of hydrocarbons and metals in atmospheric deposition in an urban area (Paris, France). *Science of the total environment* 337 (1-3).
- Bachoc, A. (1984). Disons Douze ans. Rapport du Service départemental d'assainissement (Seine-Saint-Denis).
- Bajard, P. (2006). Les matériaux de construction peuvent-ils s'inscrire dans des réseaux de proximité? Mémoire de formation HQE. École d'architecture de Lyon. 43p.
- Baltus, R. (2000). Evolution technique et références modernes du zinc. Les couvertures métalliques : matériaux et techniques / Section française de l'Icomos.
- Bathias, C., and Bailon, J.P. (1980). La fatigue des matériaux et des structures. Collection Université de Compiègne, Edition les Presses de l'Université de Montréal, Maloine S.A. Editeur: Paris, 547 pages.
- Becouze C (2010). Caractérisation et estimation des flux de substances prioritaires dans les rejets urbains par temps de pluie sur deux bassins versants expérimentaux, L'institut national des sciences appliquées de Lyon.
- Béler, C. (2008). Créteil se raconte: Direction de la Culture, Imprimerie Municipale. 40p.
- Belhoste, J.F. (2001). Couverture métalliques : plomb, cuivre et zinc de la production à la mise en œuvre. Monumental, Laboratoire/Recherches.
- Belhoste, J.F. (1997). L'impacte des techniques de fabrication sur l'emploi des métaux dans les couvertures. In: Les couvertures métalliques : matériaux et techniques, Paris.
- Belmeziti, A., Coutard, O., and de Gouvello, B. (2013). A New Methodology for Evaluating Potential for Potable Water Savings (PPWS) by Using Rainwater Harvesting at the Urban Level: The Case of the Municipality of Colombes (Paris Region). *Water* 5, 312-326.
- Belmeziti, A. (2012). Impact potentiel de l'utilisation de l'eau de pluie dans le bâtiment sur les consommations d'eau potable à l'échelle urbaine. Le cas de l'agglomération parisienne. Thèse de doctorat. Discipline : Urbanisme, Aménagement du territoire Université Paris-Est. 317p.
- Beltrán, S.G., Kochova, L., Pugliese, G., and Sopoliga, P. (2010). Les Bâtiments: efficacité énergétique et énergies renouvelables. IUSES (Intelligent use of energy school). Intelligent Energy Europe. La version française développée par Région Rhône Alpes. 96p.
- Benevolo, L. (2004). Histoire de la ville (traduit de l'italien par Catherine Peyre). Roquevaire Marseille : Ed. Parenthèses, 1983. 509p.
- Benoit, P. (2000). Le plomb dans le bâtiment en France à la fin du moyen âge : l'apport des comptes de construction et de réparation. Les couvertures métalliques : matériaux et techniques / Section française de l'Icomos, 1997-2000.
- Bergamasco, L., and Asinari, P. (2011). Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy). *Solar Energy* 85, 1041–1055.
- Berhad. (2012). Déclaration Environnementale de produit selon ISO 14025 : Ardoises en fibres-ciment: Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Bernandi, P. (2011). Bâtir Au Moyen Age (Xiiiie-Xvie Siècle). CNRS éditions. 336p.

- Bernstein, D., Chametier, J.P., and Vidal, T. (1997). Anatomie de l'enveloppe et des bâtiments. Editions Le Moniteur. 280p.
- Bertling, S., Odnevall Wallinder, I., Leygraf, C., and Berggren Kleja, D. (2006). Occurrence and fate of corrosion-induced zinc in runoff water from external structures. *Science of the Total Environment* 367, 908-923.
- Billotte, P. (1970). Créteil hier et demain. Demain Créteil, EURALEC n°1.
- Billotte, P. (1972). Une réussite hors des sentiers battus. Supplément "Nouveau Créteil" à *Entreprise*, N°890.
- Björklund, K., Almqvist, H., Almqvist, P.A., and Strömvall, A.M. (2008). Best Management Practices to Reduce Phthalate and Nonylphenol Loads in Urban Runoff In: 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.
- Boller, M. (1997). Tracking heavy metals reveals sustainability deficits of urban drainage systems. *Water Science and Technology*, 77-87.
- Bornarel, A. (2003). Qualité environnementale des bâtiments - manuel à l'usage de la maîtrise d'ouvrage et des acteurs du bâtiment: Angers, 294 pages.
- Bowen, C., and de Groot, P. (2000). Health safety and the environment-aqueous leaching of pac's from bitumen, ed. B.C. A., Barcelona- Spain: 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona 2000.
- Brand, S. (2005). Use of hyperspectral and laser scanning data for urban material mapping : comparaison of pixel-based and object-based classification approach. Proceedings of 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy".
- Brandt, H.C.A., and De Groot, P.C. (2001). Aqueous leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons from bitumen and asphalt. *Water Research* 35, 4200-4207.
- Bresson, J. (2006). Composants préfabriqués en béton - Fabrication en grandes séries Techniques de l'ingénieur - C 2 262v2. 16p.
- Bressy A (2010) Flux de micropolluants dans les eaux de ruissellement urbaines. Effets de différents modes de gestion des réseaux pluviaux Université PARIS-EST, 332 p.
- Brossas, J. (1999). Retardateurs de flammes : Techniques de l'Ingénieur, Traité Plastiques et Composites - AM 3237.
- Bucheli, T.D., Muller, S.R., Voegelin, A., and Schwarzenbach, R.P. (1998). Bituminous roof sealing membranes as major sources of the herbicide (R,S)-mecoprop in roof runoff waters: Potential contamination of groundwater and surface waters. *Environmental Science & Technology* 32, 3465-3471.
- Burkhardt, M., Kupper, T., Hean, S., Haag, R., Schmid, P., Kohler, M., and Boller, M. (2007). Biocides used in building materials and their leaching behavior to sewer systems. *Water Science and Technology* 56, 63-67.
- Burkhardt, M., Zuleeg, S., Vonbank, R., Schmid, P., Hean, S., Lamani, X., Bester, K., and Boller, M. (2011). Leaching of additives from construction materials to urban storm water runoff. *Water Science and Technology* 63, 1974-1982
- Burton G.A. and Pitt R. (2002). "Receiving water uses, impairments and sources of stormwater pollutants". Stormwater effects handbook, a toolbox for watershed managers, scientists and engineers, CRC Press Lewis: 15*45.

- Carette, L. (1992). Stabilisants -Traité Plastiques et Composites Techniques de l'Ingénieur - A3232. 9p.
- Carette, L. (1993). "Généralités sur les adjuvants." Technique de l'ingénieur A3230.4 p.
- Carsten von der Ohe, P., Dulio, V., Slobodnik, J., De Deckere, E., Kühne, R., Ebert, R., Ginebreda, A., De Cooman, W. Schüürmann, G., Brack, W. (2011) A new risk assessment approach for the prioritization of 500 classical and emerging organic microcontaminants as potential river basin specific pollutants under the European Water Framework Directive. *Science of the Total Environment* 409 : 2064–2077.
- CASMA (Canadian Asphalt Shingle Manufacturers Association) (2009). Nouvelles sur l'industrie du bardeaux d'asphalte : l'histoire des bardeaux d'asphalte, ou le perfectionnement des couverture de toit. http://www.casma.ca/fr/news_101029.shtml (consulté le 25/01/2014).
- Caumette J. (1990). Traitement thermique du béton par l'électricité. Editions Masson. Paris Milan Barcelone Mexico. 180p.
- CCSTI (Le Centre de Culture Scientifique Technique et Industrielle) (2006). L'âge de l'aluminium. La Tribune. 28p.
- Cembrit. (2012). Déclaration environnementale du produit selon ISO 14025 : Ardoises en fibres-ciment Institut Bauen und Umwelt e.V.
- CERTU. (2003). Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opération de constructions publiques - Les toitures. Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement et du Tourisme et de la Mer.
- Chebbo, G., Bachoc, A., Laplace, D., and Leguennec, B. (1995). The transfer of solids in combined sewer networks. *Water Science and Technology* 31, 95-105.
- CICLA. (2013). Les propriétés du cuivre et de ses alliages. Centre d'information du Cuivre Laitons et Alliages <http://www.cuivre.org/index-7410.htm>, consulter le 27/10/2013.
- Clark, S.E., Steele, K.A., Spicher, J., Siu, C.Y.S., Lalor, M.M., Pitt, R., and Kirby, J.T. (2008). Roofing materials' contributions to storm-water runoff pollution. *Journal of irrigation and drainage engineering* Septembre/Octobre, 638-645.
- Cognard P. (2005). Applications des revêtements d'étanchéité préfabriqués. Techniques de l'ingénieur (Archive ref c 3556). 15p.
- Cone Schiopu, N. (2007). Caractérisation des émissions dans l'eau des produits de construction pendant leur vie en œuvre. Thèse de doctorat. Ecole doctorale de Chimie de Lyon.
- Coudroy de Lille, L. (2005). Créteil ville nouvelle ? Une histoire contemporaine de l'urbanisation de Créteil. 36p.
- Cousanet, Y. (2005). Mémento, Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction. Editions le Moniteur: Paris, 248 pages.
- Coutu, S., Rota, C., Rossi, L., and Barry, D.A. (2012). Modelling city-scale facade leaching of biocide by rainfall. *Water Research* 46, 3525-3534.
- Cresson, R., Gudin, T., and Tache, G. (1998). Corrosion et protection des métaux dans le bâtiment. Saint Rémy les Chevreuses, Cated Edition. 120.
- CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). (1999). Couverture en tuiles canal de terre cuite. CSTB. 39p.

- CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). (2005). Les couvertures en tuiles : Tuiles de terre cuite Tuiles en béton. CSTB. 125p.
- d'Allens, P., and Prigent, P. (2012). Stratégies de choix des matériaux de toitures dans la ville de Créteil LEESU.
- Davis, A.P., and Burns, M. (1999). Evaluation of lead concentration in runoff from painted structures. *Water Research* 33, 2949–2958.
- Davis, A.P. Shokouhian, M. and Ni, S. (2001) Loading estimates of lead, copper, cadmium and zinc in urban runoff from specific sources. *Chemosphere*, 44 :997–1009. 41.
- de Gouvello, B., 1999, La recomposition du secteur de l'eau et de l'assainissement en Argentine à l'heure néo-libérale. Lecture au travers du phénomène coopératif. Thèse de doctorat en urbanisme. École nationale des ponts et chaussées, 469 p.
- Deoux, P., and Deoux S, M.E. (2004). Le guide de l'habitat sain, les effets sur la santé de chaque élément du bâtiment, l'implantation, les matériaux, l'isolation, la ventilation, le chauffage, la décoration. Medieco Editions: Andorre, (première édition 2002), 407 pages.
- de Winnaar, G., Jewitt, G.P.W., and Horan, M. (2007). A GIS-based approach for identifying potential runoff harvesting sites in the Thukela River basin, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth* 32, 1058–1067.
- Dress, F, (2007), Les probabilités et la statistique de A à Z : 500 définitions, formules et tests d'hypothèse, Dunod. 205p.
- Eawag. (2009). Informations concernant le mécoprop contenu dans les couches bitumeuses des toitures végétalisées. L'Institut fédéral suisse de la science et de la technologie aquatiques Département de la gestion des eaux urbaines.
- ECCA (Groupe Français du métal prélaqué en France). (2012). A la découverte du métal prélaqué. <http://www.ecca.asso.fr/metal-prelaque-connaitre-le-metal-prelaque> (consulté le 17/01/2014).
- EFRA (Associations Européenne des Retardateurs de Flammes). (2004). Retardateurs de flammes, Les questions les plus courantes. Cefic. 36p.
- Ellis, J.B., Revitt, D.M., and Lundy, L. (2012). An impact assessment methodology for urban surface runoff quality following best practice treatment *Science of the Total Environment* 416, 172–179.
- Ellis, J.B. and Hvitved Jacobsen, T. (1996). Urban drainage impacts on receiving waters. *Journal of Hydraulic Research*, v. 34 (6), p. 771-783.
- Emery, G., and Sentier, J. (1970). La couverture du bâtiment: La matière plastique: Paris.
- Eruola, A.O., Ufoegbune, G.C., Awomeso, J.A., Adeofun, C.O., Idowu, O.A., and Sowunmi, A. (2010). Qualitative and quantitative assessment of rainwater harvesting from rooftop catchments: Case study of Oke-Lantoro community in Abeokuta, southwest Nigeria. *European Water*, 47-56.
- Estienne-Duval, I. (2010). L'intervention du paysagiste dans la ville, de 1960 à aujourd'hui- Pertinence et enjeux pour les architectes et les urbanistes, Université de Lille-Sciences et Technologies, Lille.
- Eternit. (2007). Plaques ondulées Eternit: L'exploitants-Eternit. 4p.

- Eternit. (2013). Déclaration environnementale du produit selon ISO 14025 : Ardoises en fibres-ciment: Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Faller, M., and Reiss, D. (2005). Runoff behaviour of metallic materials used for roofs and facades - a 5-year field exposure study in Switzerland. *Materials and Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion* 56, 244-249.
- Fernandez, L. (2010). "Transposition en architecture des connaissances d'ingénierie environnementale et des savoirs relatifs au choix des matériaux", Thèse de doctorat. Université de Toulouse.
- FFTB (La Fédération Française des Tuiles et Briques) (2011). Terre cuite joue la séduction durable. Service de presse FFTB, Automne-Hiver 2011.
- Förster J. (1996). "Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration". *Water, Science and Technology*. 33 (6): 39 - 48.
- Forum PVC. (2010). Dossier de presse : Le PVC dans la construction. Forum PVC France, 13 p. http://decouvrirlepvc.org/IMG/pdf/Le_PVC_dans_la_construction.pdf
- Foughali, M. (2013). Identification des matériaux de toiture : Etat des lieux, histoire Université Paris-est Créteil Val de Marne, LEESU. 68p.
- Fourrier, V., and Monique. (2006). Construire sain et naturel : le guide des matériaux écologiques, Ouest-France.
- Froidevaux, D. Métal commun : Le toit dans le paysage urbain et rural. Les couvertures métalliques : matériaux et techniques / Section française de l'Icom.
- Garnaud, S. Mouchel, J.M. Chebbo, G. and Thévenot, D.R. (1999) Heavy metal concentrations in dry and wet atmospheric deposits in Paris district : comparison with urban runoff: *The Science of the total environment*, v. 235 (1-3).
- Garnaud, S., Mouchel, J.M., Chebbo, G., and Thévenot, D.R. (2001). Caractérisation des retombées atmosphériques de métaux traces en milieu urbain. *Techniques, Sciences et Méthodes* 5, 30-40.
- Gauzin-Müller, D. (2001). L'architecture écologique, 29 exemples européens, enjeux et perspectives, urbanisme et développement durable, architecture et qualité environnementale, démarche HQE. Edition Le Moniteur: Paris, 287 pages.
- Girois, S. (2004). Stabilisation du PVC. *Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites AM3233*. 9p.
- Girois, S. (2013). Stabilisation des plastiques: *Techniques de l'Ingénieur, Traité Plastiques et Composites -AM 3 232*. 14p.
- Goidanich, S., Brunk, J., Herting, G., Arenas, M.A., and Odnevall Wallinder, I. (2011). Atmospheric corrosion of brass in outdoor applications Patina evolution, metal release and aesthetic appearance at urban exposure conditions *Science of the Total Environment*, 46-57.
- Govin, A. (2004). "Aspect Physico-Chimique de l'interaction bois-ciment : modification de l'hydratation du ciment par le bois". Ecole National Supérieur Des Mines- Spécialité Génie des procédés. 167p.
- GPEN/DDEN (Groupe Permanent d'Etude des Marchés « Développement Durable, Environnement ») (2006). GUIDE DE L'ACHAT PUBLIC ECO-RESPONSABLE :

- L'efficacité énergétique dans les marchés d'exploitation de chauffage et de climatisation pour le parc immobilier existant. 64p.
- Grinberg, I. (2009). Cent ans d'innovation dans l'industrie aluminium. L'harmattan éditions. 222p.
- Gromaire-Mertz, M. C. (1998). La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire : caractéristiques et origines. Thèse de Doctorat - Sciences et techniques de l'Environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées: 506p (+ annexes).
- Gromaire-Mertz, M.C. Garnaud, S. Gonzalez, A. and Chebbo, G. (1999) Characterisation of urban runoff pollution in Paris: *Water, Science and Technology*, v. 39(2), p. 1 - 8.
- Gromaire, M.C., Robert-Sainte, P., Bressy, A., Saad, M., de Gouvello, B., and Chebbo, G. (2011). "Zn and Pb emissions from roofing materials-Modelling and mass balance attempt at the scale of a small urban catchment". *Water Science and Technology* 63, 2590-2597.
- Gromaire, M.C., Garnaud, S., Saad, M., and Chebbo, G. (2001). Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. *Water Research* 35 (2), 521-533.
- Guéguen, T. (1992). Traitements de surface des métaux avant peinture. Procédés. Techniques de l'ingénieur (Archive ref M 1500).
- Guigues, L. (2003). Modèles multi-échelles pour la segmentation d'images, Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie de l'Université de Cergy-Pontoise.
- Guigues, L., Cocquerez, J.P., and Le Men, H. (2006). Scale-sets image analysis. *International Journal of Computer Vision* 68, 289-317.
- Hannouche, A, (2012), Analyse du transport solide en réseau d'assainissement unitaire par temps de pluie : exploitation de données acquises par les observatoires français en hydrologie urbaine Université PARIS-EST. 403p.
- Hartmann, G. (1914). L'acier historique. Larousse mensuel éditions. 15p. http://www.hydroretro.net/etudegh/acier_historique.pdf (consulté le 25/01/2014).
- Hauglustaine, J.M., and Francy, S. (2003). L'isolation thermique de la toiture plate - guide pratique pour les architecte. Wallonie.
- He W. (2002). "Atmospheric corrosion and runoff processes on copper and zinc as roofing materials", Stockholm, Royal Institute of Technology.
- He, W., Odnevall Wallinder, I., and Leygraf, C. (2001a). A comparison between corrosion rates and runoff rates from new and aged copper and zinc as roofing material. *Water, Air and Soil Pollution Focus* 1, 67 - 82.
- He W., Odnevall Wallinder I., and Leygraf C. (2001b). A laboratory study of copper and zinc runoff during fist flush and steady-state conditions. *Corrosion Science* 43, 127 - 146.
- Heiden, U., Segl, K., Roessner, S., and Kaufmann, H. (2007). Determination of robust spectral features for identification of urban surface materials in hyperspectral remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 111, 537-552.
- Henn, W. (1966). Le Toit Plat. Dunod ed. 76p.

- Hickman, J., Hassel, D., Joumard, R., Samaras, Z. et Sorenson, S. (1999) Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. European Commission, Report No. SE/491/98. 381p.
- Hongbing, L., Huang, B., Xiaoling, L., and Zhang, K. (2011). Green Roof Assessment by GIS and Google Earth. *Procedia Environmental Sciences* 10, 2307 – 2313.
- Honnert, B., and Mater, G. (2012). Utilisation du dioxyde de titane nanométrique : Cas Particulier de la filière de La BTP. INRS (Institut national de recherche et de sécurité).
- Houssin, E., Guinaudeau, C., and Burdloff, J.C. (2012). Les toitures végétalisées : Conception, réalisation et entretien - En application des DTU de la série 43 et des Règles professionnelles CSFE-ADIVET-SNPPA-UNEP, ed. G. pratique: CSTB, 95.
- IFBS. (2013). Environmental Product Declaration according as per ISO 14025 and EN 15804 : Profiled sheets made of aluminium for roof, wall and deck constructions: Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Invernizzi, R. (2000). Les couvertures métalliques : matériaux et techniques. In: L'inox en couverture, Paris: Section française de l'Icomos, 169-174.
- ISO/IEC, (2008), ISO/IEC Guide 98-3/Suppl,1:2008(E) Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method, Geneva (Switzerland): ISO, 2008, 98 p.
- Izquierdo, S., Rodrigues, M., and Fueyo, N. (2008). A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy* 82, 929-939.
- Joshi U.M., and Balasubramanian R. (2010). Characteristics and environmental mobility of trace elements in urban runoff. *Chemosphere* 80, 310-318.
- Jouen, S., Hannyoy, B., Barbier, A., Kasperek, J., and Jean, M. (2004). A comparison of runoff rates between Cu, Ni, Sn and Zn in the first steps of exposition in a french industrial atmosphere Materials, *Chemistry and Physics* 85, 73-80.
- Jungnickel, C., Stock, F., Brandsch, T., and Ranke, J. (2008). Risk assessment of biocides in roof paint - Part 1: Experimental determination and modelling of biocides leaching from roof paint. *Environmental science and pollution research* 15 (3).
- Kaegi, R., Sinnet, B., Zuleeg, S., Hagendorfer, H., Mueller, E., and Vonbank, R. (2010). Release of silver nanoparticles from outdoor facades. *Environmental Pollution* 158, 2900-2905.
- Kaegi, R., Ulrich, A., Sinnet, B., Vonbank, R., Wichser, A., and Zuleeg, S. (2008). Synthetic TiO₂ nanoparticle emission from exterior facades into the aquatic environment. *Environmental Pollution* 156.
- Karlen, C., Odnevall Wallinder, I., Heijerick, D., Leygraf, C., and Janssen, C.R. (2001). Runoff rates and ecotoxicity of zinc induced by atmospheric corrosion. *The Science of Total Environment* 277, 169 - 180.
- Karlen, C., Odnevall Wallinder, I., Heijerick, D., and Leygraf, C. (2002). Runoff rates, chemical speciation and bioavailability of copper released from naturally patinated copper. *Environmental Pollution* 120, 691 - 700.

- Kingette Mitchell Ltd., and Diffuse Sources Ltd. (2003). A study of roof runoff quality in Auckland, New Zealand: Implications for stormwater management Takapuna, Auckland, New Zealand.
- Kleijer, A. (2008). Biocides et protection du bois : Liste de substances chimiques à surveiller. gwa.
- KME. (2012a). Environmental Product Declaration according to ISO 14025 and EN 15804 : TECU®-Eco copper sheets and strips (TECU®Classic Eco, TECU®Oxid Eco, TECU® Patina Eco): Institut Bauen und Umwelt e.V.
- KME. (2012b). Environmental Product Declaration according to ISO 14025 and EN 15804 : TECU® copper alloys sheets and strips (TECU® Bronze, TECU® Gold): Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Kokogiannakis, G., Tietje, A., and Darkwa, J. (2011). The role of Green Roofs on Reducing Heating and Cooling Loads: A Database across Chinese Climates. In: *Procedia Environmental Sciences* 11 Part B, 604–610.
- Kornnman, M. (2009). Matériaux de terre cuite - Matières de base et fabrication. Techniques de l'Ingénieur C 905.
- Kriech, A.J., Kurek, J.T., Osborn, L.V., Wissel, H.L., and Sweeney, B.J. (2002). Determination of polycyclic aromatic compounds in asphalt and in corresponding leachate water.
- Lacour, C. (2009). Apport de la mesure en continu pour la gestion de la qualité des effluents de temps de pluie en réseau d'assainissement. thèse de doctorat, Université PARIS-EST.
- Lafont, L. (1993). Revêtement d'étanchéité de toiture
- Lafont, C., and Troispoux, G. (2003). Orthophotographies, définition et mise en oeuvre appliquée à la BD ORTHO de l'IGN. In: Edition du Certu (n°149), 122p.
- Landolt, D. (2003). Corrosion et chimie de surface des matériaux, Traité des matériaux. Polytechniques et universitaires romandes. 552.
- Lamesch, J. (2004). Histoire Mondiale De La Galvanisation. Arcelor.
- Lamprea, K. (2009). Caractérisation des métaux traces, hydrocarbures aromatiques polycycliques et pesticides transportés par les retombées atmosphériques et les eaux de ruissellement dans les bassins versants séparatifs péri-urbains.
- Lamprea, K. (2012). Etude expérimentale de l'émission des alkylphénols et du bisphénol-A par les matériaux et produits issus de la construction et du secteur automobile.
- Lebouteux, P. (2000). Matériaux et formes: l'évolution de l'emploi du métal dans la couverture. Section française de l'Icomos: Paris.
- Lebouteux, P. (2007). Traité de couverture traditionnelle. Editions Vial. 318p.
- Le Bris, A. (2007). "Classification des matériaux des toits à partir d'ortho-images". Rapport de l'IGN - MATIS. 33p.
- Le Bris A, and Robert-Sainte P (2009) Classification of roof materials for rainwater pollution modelization : http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/1_4_7-W5/paper/LE_BRIS-152.pdf (consulté le 25/01/2014)

- Legret, M., Odieb, L., Demarea, D., and Julliena, D. (2005). Leaching of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from reclaimed asphalt pavement. *Water Research* 39, 3675–3685.
- Lemp, D., and Weidner, U. (2004). Use of hyperspectral and laser scanning data for the characterization of surfaces in urban areas". In: XXth ISPRS Congress 2004, Istanbul, Turkey".
- Leuenberger-Minger, A.U., Faller, M., and Richner, P. (2002). Runoff of copper and zinc caused by atmospheric corrosion. *Materials and Corrosion* 53, 157-164.
- Levet, D., Le Hen, A., Jacques, S., Mouchelin, J., et Berly, A. (2008). Guide pratique des substances toxiques dans les eaux douces et littorales du bassin seine-normandie. Eau-seine-normandie et aquascop. 271p.
- Le Xuan, S. (2011). "Lieux et modèles : l'exemple des villes de fondations au XXe siècle", thèse de doctorat. Université PARIS-EST-Champ disciplinaire : Architecture, Paris. 472p.
- Loga, T., and Diefenbach, N. (2010). Use of building typologies for energy performance assessment of national building stocks, existent experiences in European countries and common approach, First TABULA Synthesis Report. 160p.
- Loupiac, C., Mengin, C., Monnier, G. (1997). L'architecture moderne en France Tome 1 1889-1940. Ed. Picard. 278p.
- Lucan, J. (2001). Architecture en France (1940-2000) : Histoire et théories. Ed. Le Moniteur, collection architextes. 376p.
- Lupsea, M., Tiruta-Barna, L., Schiopu, N., and Schoknecht, U. (2013). Modelling inorganic and organic biocide leaching from CBA-amine (Copper–Boron–Azole) treated wood based on characterisation leaching tests. *Science of the Total Environment* 461–462, 645–654.
- Lyonnet, C. (2004a). Couvertures en tuiles de terre cuite - Dispositions générales Techniques de l'ingénieur C 3 520.
- Lyonnet, C. (2004b). Couvertures en tuiles de terre cuite -Tuiles à emboîtement ou à glissement : Techniques de l'ingénieur C 3 521.
- Magné, A., and Somme, H. (1954). *Traité Pratique De Couverture : Tuile, Zinc, Ardoise.* Garnier Frères éditions. 351p.
- Magné, A. (1929). *Traité pratique de couverture.* Librairie Lire et Chiner. 305p.
- Martinoty, G. (2005). Reconnaissance de matériaux sur des images aériennes en multirecouvrement, par identification de fonctions de réflectances bidirectionnelles. Thèse de doctorat en Méthodes physiques en télédétection. Université Paris 7 – Denis Diderot. 155p.
- Mathieu, S., and Hellouin, R. (2008). Tôles d'acier prélaquées. Techniques de l'ingénieur M 1509V2. 14p.
- Mendez, C.B., Klenzendorf, J.B., Afshar, B.R., Simmons, M.T., Barret, M.E., Kinney, K.A., and Kirisits, M.J. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water reaserch* 45, 2049-2059.
- Merlin, P. (1989). Bibliographie sur les villes nouvelles françaises et étragées. Laboratoire théorie des mutations urbaines en pays développés - Institut Français de l'Urbanisme.

- Mestelan, P. (2005). L'ordre et la règle - Vers une théorie du projet d'architecture. Presses polytechniques et universitaires romandes : Lausanne. 288p.
- Miyauchi, T., and Mori, M. (2008). Effect of components of leaching medium on the leaching of benzalkonium chloride from treated wood. *Journal of Wood Science* 54, 490-494.
- Miyauchi, T., Mori, M., and Ito, K. (2005). Quantitative determination of benzalkonium chloride in treated wood by solid-phase extraction followed by liquid chromatography with ultraviolet detection. *Journal of Chromatography A* 1095, 74-80.
- Michele, C.S. (2007). Certified Environmental Product Declaration (EPD®) of Clay roof tile: Swedish EPD® system. Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Mignery, P. (2000). L'emploi du fer-blanc dans l'architecture en franche-comté (XVIIIe –XIXe Siècles). Les couvertures métalliques : matériaux et techniques / Section française de l'Icomos.
- Monier. (2010a). Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025. In: Gamme Tuile Terre Cuite: Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Monier. (2010b). Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025. In: Gamme Tuiles Béton: Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Moralès, S. (2005). Les matériaux de toitures comme sources de contamination métallique des eaux de ruissellement. Cas des toitures parisiennes. Université Paris 12 - Val de Marne, Ecole Nationale du génie Rural des Eaux et des Forêts, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Monnier, G. (2000). L'architecture moderne en France Tome 3 : De la croissance à la compétition 1967-1999. Ed. Picard. 311p.
- Mottier V. et Boller M. (1992). Les eaux de ruissellement de toits : qualité et dynamique de la charge polluante. Rapport bibliographique pour l'Institut Fédéral pour l'Aménagement, l'épuration et la protection des eaux, Allemagne, 45 p.
- Mouyon P. (2001). Origines et caractéristiques de la pollution des eaux pluviales urbaines. Bilan de l'assainissement pluvial et perspectives, Faculté des Sciences - D.E.P.
- MSI. (2006). MSI Etude : le marché des matériaux de couverture des toits en France. MSI Marketing Research for Industry Ltd. 223p.
- MSI. (2012). Marché des Produits de Couverture de Toit en France 2012, Nouvelles tendances et prévisions. MSI Marketing Research for Industry Ltd.
- Mucchielli, A., 1991, Les méthodes qualitatives : Paris : PUF. Collections Que sais-je? n° 2591
- Nickel. (2012). Le Premier Siècle De L'acier Inoxydable : Célébration du 100e anniversaire de l'acier inoxydable - L'histoire de sa création, Les grandes étapes par secteur, Son avenir. In: Nickel – Édition spéciale de mai 2012.
- Nohra, Y. (2010). Toitures terrasses et toitures terrasses végétalisées : risques de contamination des eaux de ruissellement par les matériaux de construction, Université libanaise école doctorale des sciences et de technologie.
- Nowak, D., J., Crane, D., E., Stevens, J., C. and Hoehn, R., E. (2003). The Urban Forests Effects (UFORE) Model: Field Data Collection Manual. USDA Forest Service, Syracuse.

- Odnevall Wallinder I, Verbiest P, He W and Leygraf C (1998) The influence of patina age and pollutant levels on the runoff rate of zinc from roofing materials": *Corrosion Science*, v. 40, p. 1977-1982.
- Odnevall Wallinder I., Leygraf C., Karlen C., Heijerick D., and Janssen C. R. (2001a). Atmospheric corrosion of zinc-based materials : runoff rates, chemical speciation and ecotoxicity effects. *Corrosion Science* 43, 809 - 816.
- Odnevall Wallinder, I., and Leygraf, C. (2001b). Seasonal variations in corrosion rate and runoff rate of copper roofs in a rural atmospheric environment. *Corrosion Science* 43, 2379 - 2396.
- Odnevall Wallinder I., Verbiest P., He W., and Leygraf C. (2000). Effects of exposure direction and inclination on the runoff rates of zinc and copper roofs. *Corrosion Science* 42, 1471 - 1487.
- Odnevall Wallinder, I., and Leygraf, C. (1997). A study of copper runoff in an urban atmosphere. *Corrosion Science* 39, 2039 - 2052.
- Odnevall Wallinder, I., Hedberg, Y., and Dromberg, P. (2009). Storm water runoff measurements of copper from a naturally patinated roof and from a parking space. Aspects on environmental fate and chemical speciation. *Water research* 43(20), 5031–5038.
- Odnevall Wallinder, I., Bertling, S., and Leygraf, C. (2002). Release rates of chromium and nickel from 304 and 316 stainless steel during urban atmospheric exposure - a combined field and laboratory study. *Corrosion Science* 39, 1505 - 1530.
- Odnevall Wallinder, I., and Leygraf, C. (2002). Environmental effects of metal induced by atmospheric corrosion. Outdoor and indoor atmospheric corrosion, ASTM STP 1421, West Conshohocken, PA.
- Odnevall Wallinder, I., Bertling, S., and Leygraf, C. (2004). Environmental interaction of copper and zinc released from building materials as a result of atmospheric corrosion. *Metal 58 Jahrgang*, 557 - 560.
- Ogunkah, I., and Yang, J. (2012). Investigating Factors Affecting Material Selection: The Impacts on Green Vernacular Building Materials in the Design-Decision Making Process. *Buildings* 2, 1-32.
- Oliva, J.P., Besse-Platiere, A., and Aubert, C. (2002). Maisons écologiques d'aujourd'hui. Editions Terre vivante: Mens, 155 pages.
- Onduline. (2002). Polyester, PVC, Polycarbonate : Gamme complète, Couverture et bardage. 21p.
- Onduline. (2013). Environmental Product Declaration according to ISO 14025 and EN 15804: Tôle ondulée en bitume: Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Pardos, F. (2013). Polyméthacrylate de méthyle (PMMA) - Aspects économiques Techniques de l'ingénieur AM 3 350v2.
- Paulin, M. (2003). Vocabulaire illustré de la construction. Editions Le Moniteur.
- Peel, M. C, Finlayson, B. L. and McMahon, T. A. (2007). "Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification". *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 1633-1644.

- Pennec, S.L. (2000). Corrosion de l'étain en extérieur : pratique ancienne, matériau futur. Les couvertures métalliques : matériaux et techniques / Section française de l'Icomos.
- Percot, S. (2012). Contribution des retombées atmosphériques aux flux de polluants issus d'un petit bassin versant urbain -cas du Pin Sec à Nantes, Ecole Centrale de Nantes.
- Persson, D., and Kucera, V. (2001). Release of metals from buildings, constructions, and products during atmospheric exposure in Stockholm. *Water, Air and Soil Pollution Focus* 1(3-4), 133-150.
- Petrucci, G., Gromaire, M., Chebbo, C. (2014). Analyse des sources primaires diffuses de métaux et HAP et modélisation des flux annuels émis dans les eaux de ruissellement. Rapport pour INOGEV : Innovations pour une Gestion durable de l'Eau en Ville-Programme Villes Durables 2009.
- Picaut, J., Guillaume, G., Dutilleux, G. (2012). Ambiances sonores urbaines et interaction ville-bâtiment. Extrait du document « Modélisation urbaine : de la représentation au projet » (Tapadinhas *et al.*, 2012). 34-50.
- Pitte, J. R., 1984, Histoire du paysage français : De la préhistoire à nos jours. Tallandier Editions 440 p.
- PLU. (2010). (Plan Local de l'Urbanisme) de Créteil: <http://www.ville-creteil.fr/PDF/PDF-vm/PDF-urb/Rapport%20de%20presentation%20PLU%202010.pdf>.
- POLYFIN AG. (2013). Déclaration environnementale du produit ISO 14025 et EN 15804 : Toiture et membrane d'étanchéité des systèmes et des plastiques Élastomères: Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Prud'homme, J., Josselin, D. et Aryal, J. (2011) Quantitative Analysis of Pollutant Emissions in the Context of Demand Responsive Transport. Computational Science and Its Applications - ICCSA 2011 - International Conference, Santander, Spain, June 20-23, 2011. Proceedings, Part I.
- Qiu, P., Leygraf, C., and Odnevall Wallinder, I. (2012). Evolution of corrosion products and metal release from Galvalume coatings on steel during short and long-term atmospheric exposures. *Materials Chemistry and Physics*, 419-428
- Quek, U. and Förster, J. (1993). "Trace metals in roof runoff." *Water, Air and Soil Pollution* 68: 373 - 389.
- Racek, R. (2007). Mise en forme du zinc et de ses alliages. Techniques de l'ingénieur (Archive ref M 3150).
- Rakotomalala, R. (2005). Arbres de Décision. *Revue MODULAD*, 33: 164-187.
- Ramani, C.P., and Whittier, C. (2012). Concrete Roofing Tiles in the United States, vol. 2012: <http://docserver.nrcanet/technical/321.pdf>.
- Rathscheck. (2010). Déclaration environnementale du produit selon ISO 14025 : Ardoises naturelles de Rathscheck Schiefer et Dach-Systeme: Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Remolu, D., and Lauby, J.M. (2007b). L'étanchéité des toitures-terrasses, Conception et réalisation - En application des DTU 43.1, 43.3, 43.4, 43.5, ed. G. Pratique: CSTB, 134.
- Rheinzink. (2005). Déclaration environnementale conforme à la norme ISO 14025 : Le Zinc-Titane de RHEINZINK: Institut Bauen und Umwelt e.V.

- Rheinzink. (2012). Environmental Product Declaration according to ISO 14025: RHEINZINK - prePATINA blue-grey and graphite-grey RHEINZINK GmbH & Co.KG: Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Ringon, G. (1997). Histoire du métier d'architecte en France : PUF, 127.
- Robert-Sainte P. (2009). "Contribution des matériaux de couverture à la contamination métallique des eaux de ruissellement". Thèse de doctorat. Sciences et Techniques de l'Environnement, Université PARIS-EST, Paris.
- Robert-Sainte P, Gromaire MC, de Gouvello B, Saad M and Chebbo G (2009). Annual metallic flows in roof runoff from different materials: test bed scale in Paris Conurbation : *Environmental Science and Technology*, 43 (15) 5612-5618.
- Robert-Sainte P., Gromaire M.C., De Gouvello B., Saad M., and Chebbo G. (2008). Analysis of the parameters relevant for metal runoff estimation from zinc roofing - a test bed approach in Paris conurbation. *ICC, Las Vegas*, Etats-Unis.
- Rocher, V. Azimi, S. Gasperi, J. Beuvin, M. Muller, R. Mollieron, and Chebbo, G. (2005) Hydrocarbons and heavy metals in atmospheric depositions : comparison with roof runoff. *Science of the Total Environment*, 337 : 223–239,. 39
- Rodighiero, L. (1960). Toitures Rustiques et Modernes: Paris. Librairie éditions. 80p.
- Roncayolo, M., 1982, La ville et ses territoires, folio essais, Éditions Gallimard. 278 p.
- Roncayolo, M., 2001, La ville d'aujourd'hui : Mutations urbaines, décentralisation et crise du citadin, Éditions du Seuil. 898 p.
- Roupsard , P. (2013). Etude phénoménologique du dépôt sec d'aérosols en milieu urbain : Influence des propriétés des surfaces, de la turbulence et des conditions météorologiques, Ecole doctorale Sciences Physiques, Mathématiques et de l'Information pour l'Ingénieur (SPMII).
- Roy, P., and Blin-Lacroix, J.L. (2002). Le dictionnaire professionnel du BTP. Éditions Eyrolles. 828p.
- Sabin LD, Lim JH and Stolzenbach KD (2005) Contribution of trace metals from atmospheric deposition to stormwater deposition in a small impervious urban catchment: *Water Research*, v. 39 (16).
- Saget, A. Chebbo, G. and Desbordes, M. (1995). Urban discharges during wet weather - what volumes have to be treated: *Water Science and Technology*, v. 32(1), p. 225-232.
- Sandberg, J., Odnevall Wallinder, I., Leygraf, C., and Le Bozec, N. (2006). Corrosion-induced copper runoff from naturally and pre-patinated copper in a marine environment *Corrosion Science* 48 4316-4338.
- Sandström, R. (1994). Criteria in Material Selection. TALAT Lecture 1502. EAA – European Aluminium Association, Stockholm. 36p.
- Saporta G (1990) Probabilités analyse des données et statistiques: Paris (ed) Editions technip. 496p.
- Saykali, M. (2012). PVC souple dans la construction : histoire d'un matériau complet, vol. 2013: <http://www.batiweb.com/actualites/vie-des-societes/pvc-souple-dans-la-construction-histoire-dun-materiau-complet-08-11-2012-21170.html>.

- Scheyer, A., Briand, O., Morville, S., Mirabel, P., and Millet, M. (2007) Analysis of trace levels of pesticides in rainwater by SPME and GC-tandem mass spectrometry after derivatisation with PFFBr. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 387: 359-368.
- Schiopu, N., Jayr, E., Méhu, J., Barna, L., and Moszkowicz, P. (2007). Horizontal environmental assessment of building products in relation to the construction products directive (CPD). *Waste Management* 27, 1436–1443.
- Schiopu, N., Tiruta-Barnab, L., Jayr, E., Méhue, J., and Moszkowicze, P. (2009). Modelling and simulation of concrete leaching under outdoor exposure conditions. *Science of the total environment* 407, 1613 – 1630.
- Schoknecht, U., Gruycheva, J., Mathies, H., Bergmann, H., and Burkhardt, M. (2009). Leaching of Biocides Used in Facade Coatings under laboratory Test Conditions. *Environmental Science & Technology* 43, 9321-9328.
- Schoknecht, U., Wegner, R., Horn, W., and Jann, O. (2003). Emission of biocides from treated materials - Test procedures for water and air. *Environmental Science and Pollution Research* 10, 154-161.
- Schwager, J., Irlès, A., Thiriart, J., Claverie, R., Ruban, V., Morel, J.L. (2013). Bilan des flux d'éléments traces au sein de toitures végétalisées-Identification des compartiments puits et sources de polluants. INOGEV et GDAP : Quelles innovations pour la gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain ? 53-62. Nantes (France), 3-5 décembre 2013.
- Schriewer A., and Horn H. (2008). Time focused measurements of roof runoff quality. *Corrosion Science* 50, 384-391.
- Schultze-Rettmer, R. (1995). Lead roofing and rainwater. Düsseldorf, A scientific study commissioned by Bleiberatung.
- Seidl, M., Gromaire, M.C., Saad, M., and de Gouvello, B. (2013). Effect of substrate depth and rain-event history on the pollutant abatement of green roofs. *Environmental Pollution* 183, 195-203.
- Sellami-Kaaniche, E, de Gouvello, B, Gromaire, M,C, and Chebbo, G, (2013a), Evaluation of roofing materials emissions at the city scale: Statistical approach for computing roofing area distribution, In: Novatech, Lyon (Fance), 23-27 juin.
- Sellami-Kaaniche, E., De Gouvello, B., Gromaire, M.C., and Chebbo, G. (2013b). A new method for modelling roofing materials emissions on the city scale: Application for zinc in the City of Créteil (France). *Environmental Science and Pollution Research*, in press.
- Simon, H.A. (2004). Les sciences de l'artificiel. Paris : Folio essais. 464p.
- Smits, E. (1927). Leçons pratiques de zinguerie : Techniques des toitures en zinc. Librairie polytechnique Ch. Béranger. 249p.
- Stainless, and Pittsburgh. (2011). Guide pratique pour le travail des Aciers Inoxydables Duplex. International Molybdenum Association: Londres. 24p. http://www.euro-inox.org/htm/p_173_FR.html (consulté le 17/01/2014).
- Statistique Canada, (2010). Méthodes et pratiques de l'enquête. Ministre de l'Industrie. 434p.
- Thiis, T.K., and Gjessing, Y. (1999). Large-scale measurements of snowdrifts around flat-roofed and single-pitch-roofed buildings. *Cold Regions Science and Technology* 30, 175-181.

- Stolberg, R. (2011). Déclaration environnementale de produit selon ISO 14025: Gammes de Bandes et tôles de plomb laminé. Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Styszko, K., Bollmann, U.E., Wangler, T.P., and Bester, K. (2013). Desorption of biocides from renders modified with acrylate and silicone. *Chemosphere in press*.
- Taherzadeh, E., Helmi, Z., and Shafri, M. (2013). Development of a Generic Model for the Detection of Roof Materials Based on an Object-Based Approach Using WorldView-2 Satellite Imagery. *Advances in Remote Sensing*, 312-321.
- Tapadinhas, L., Dreyfus, S., Hégron, G., Prévost, T., and Haxaire, O. (2012). Modélisation urbaine : de la représentation au projet. Collection « RéférenceS » de la Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) 328p.
- Tassin B., et al. (1993). Rejets urbains par temps de pluie : pollutions et nuisances, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées (ENPC).
- Techniques de l'ingénieur. (2013a). Les couvertures en tuiles : référentiels, terminologie et modèles Techniques de l'ingénieur TBA1836.
- Techniques de l'ingénieur. (2013b). Les tuiles en terre cuite à emboîtement ou à glissement à relief ou à pureau plat. Techniques de l'ingénieur TBA1846.
- Techniques de l'ingénieur. (2014). Les toitures végétalisées. Techniques de l'ingénieur TBA1930. 26p.
- Texier, A. et Costa, V. (2009). Les Couvertures Métalliques. Monumental éditions.
- Thévenot, D.R., Moilleron, R., Lestel, L., Gromaire, M.C., Rocher, V., Cambier, P., Bonté, P., and Colin, J.L. (2007). Critical budget of metal sources and pathways in the Seine River basin (1994-2003) for Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn. *Science of the total environment* 375, 180-203.
- Thiis, T.K., and Gjessing, Y. (1999). Large-scale measurements of snowdrifts around flat-roofed and single-pitch-roofed buildings. *Cold Regions Science and Technology* 30, 175-181.
- Tiruta-Barna L, Schiopu N. (2011). Modelling inorganic biocide emission from treated wood in water. *Hazard Mater* 192:1476–83.
- Tobiszewski, M., Polkowska, Z., Konieczka, P., and Namieśnik, J. (2010). Roofing Materials as Pollution Emitters – Concentration Changes during Runoff. *Journal of Environmental Study* 19, 1019-1028.
- Togero, A. (2006). Leaching of hazardous substances from additives and admixtures in concrete. *Environmental Engineering Science* 23, 102-117.
- Tornay, N. (2010). "Vers des outils d'aide à la conception pour intégrer les dimensions techniques, écologiques et sensibles des matériaux de construction", Université de Toulouse, Toulouse.
- Trébalage, S. (2013). Identification et hiérarchisation des matériaux de toiture émissifs de contaminants : Île-de-France, France, Université de la Réunion, LEESU. 79p.
- Trias-Sanz, R. (2006). Semi-automatic high-resolution rural land cover classification, Paris, France.
- Trias-Sanz, R., and Boldo, D. (2005). A high-reliability, high-resolution method for land cover classification into forest and non-forest. Proceedings of the 14th Scandinavian

- Conference on Image Analysis. *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Heidelberg, 3540, 831-840.
- Xanthopoulos, C. and Hahn, H. H. (1993) Anthropogenic pollutants wash-off from street surfaces. In Proceedings of ICUSD' 93. *6th International conference on urban storm drainage*, pages 417–422, Niagara Falls. xxiii, 42, 43
- UGINE. (2002). Guide Pratique Uginox Fte. UGINE & ALZ : Groupe Arcelor
- USIRF (2010). Le bitume: histoire d'un matériau routier. <http://www.usirf.com/Actions-Dossiers/Le-bitume-histoire-d-un-materiau-routier> (consulté le 17/01/2014).
- Van de Voorde, A. (2012). "Incidence des pratiques d'entretien des toitures sur la qualité des eaux de ruissellement - Cas des traitements par produits biocides", Thèse de doctorat. Université PARIS-EST, Paris.
- Van de Voorde, A., Lorgeoux, C., Gromaire, M.-C., and Chebbo, G. (2012). Analysis of quaternary ammonium compounds in urban stormwater samples. *Environmental Pollution* 164, 150-157.
- Van de Voorde A., Lorgeoux C., Chebbo G., and Gromaire M.C. (2010). Impact des pratiques d'entretien des toitures sur la qualité des eaux de ruissellement. In: 4 èmes Journée doctorales en hydrologie urbaine, Paris.
- Vargel, C. (2010). Métallurgie de l'aluminium. Techniques de l'ingénieur (Archive ref M 4663).
- Verbiest P., Janssen C. R., Odnevall Wallinder I., and Leygraf C. (1999). Environmental effects of zinc runoff from phosphated zinc sheets used for building applications. In: *4th International Corrosion Congress I*, Cape Town, South Africa.
- Verrier, P. (1992). Plastifiants. Techniques de l'ingénieur A3231. 12 p.
- Ville de Créteil. (2002). Carnets de voyages Cristoliens n°1 : Hôtel de ville – Le quai de la Croisette – Le lac – La préfecture – Les maisons-jardins: Direction de la culture.
- Ville de Créteil. (2003). Carnets de voyages Cristoliens n°2 : Mont-Mesly: Direction de la culture.
- Ville de Créteil. (2004). Carnets de voyages Cristoliens n°3 : Bleuets – Buttes – Bords de Marne – Village: Direction de la culture.
- Ville de Créteil. (2005). Carnets de voyages Cristoliens n°4 : Echat - Champeval – Croix des Mèches – Lévrière – Montaigut: Direction de la culture.
- Ville de Créteil. (2006). Carnets de voyages Cristoliens n°5 : Ormetteau – Sarrazins – Source – Port: Direction de la culture.
- Viollet-le-Duc, E.E. (1856). Dictionnaire raisonné de l'architecture française du Xie Au Xvie siècle. Sabin Henri éditions. 436p.
- Vmzinc. (2010a). Environmental Product Declaration according to ISO 14025: VMZINC® from Umicore Bausysteme GmbH- Surface: natural rolled zinc -: Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Vmzinc. (2010b). Environmental Product Declaration according to ISO 14025 : VMZINC® from Umicore Bausysteme GmbH- Surface: QUARTZ-ZINC®, ANTHRA-ZINC®-: Institut Bauen und Umwelt e.V.

- Welter, J.M. (2007). La couverture en cuivre en France : une promenade à travers les siècles. Monumental éditions.
- Wignacourt, A. (2009). "Caractérisation, mesure et évaluation des indicateurs techniques, économiques et financiers des éco-matériaux : Application au secteur du bâtiment". Thèse de doctorat en Génie Industriel. Ecole centrale de Lille. 284p.
- Wilson, D.N. (2003). Atmospheric corrosion of lead. In: Release of metals due to corrosion of materials, Munich, Germany.
- Wines, J. (2000). L'architecture verte. Editions Taschen: Chine, 240 pages.
- Wittmer, I.K., Scheidegger, R., Stamm, C., Gujer, W., and Bader, H.P. (2011). Modelling biocide leaching from facades. *Water research* 45, 3453-3460.
- Wong, C.S.C., Zhang, X.D., Li, G., Qi, S.H., and Peng, X.Z. (2003). Atmospheric deposition of heavy metals in the Pearl River Delta, China. *Atmospheric Environment* 37, 767–776.
- Wong, T., Breen, P. and Lloyd, S. (2000) Water sensitive road design- Design options for improving stormwater quality of road runoff, Cooperative research centre for catchment hydrology.
- Zhang, X., Leygraf, C., and Odnevall Wallinder, I. (2013). Atmospheric corrosion of Galvan coatings on steel in chloride-rich environments *Corrosion Science*, 62–71.
- Zhang, X., Vub, T.N., Volovitch, P., Leygraf, C., Ogleb, K., and Odnevall Wallinder, I. (2012). The initial release of zinc and aluminum from non-treated Galvalume and the formation of corrosion products in chloride containing media. *Applied Surface Science*, 4351–4359.
- Zgheib, S. (2009). Flux et sources des polluants prioritaires dans les eaux urbaines en lien avec l'usage du territoire. Thèse de doctorat en Sciences et Techniques de l'Environnement. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Champs sur Marne, France, 2009. 349p.

Site internet

<http://www.rhone.gouv.fr/Politiques-publiques/Amenagement-du-territoire-urbanisme-construction-logement/Urbanisme/Documents-d-urbanisme/Le-reglement-national-d-urbanisme-RNU>
http://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do;jsessionid=90AFA358635E1CDB33720D824B50631A.tpdjo03v_1?idSectionTA=LEGISCTA000022493612&cidTexte=LEGITEXT000006074075&dateTexte=20131211

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Presentation-generale,13896.html>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-carte-communale.html>
<http://www.iledefrance.fr/competence/schema-directeur-region>

www.monierbelgium.be

ANNEXES

Liste des Annexes

| | |
|---|-----|
| Annexe 1 : Définition des éléments d'une toiture inclinée | 517 |
| Annexe 2 : Source des figures utilisées dans le Chapitre 1.1 et 1.2..... | 519 |
| Annexe 3 : Tableau de composition chimique (% massique) des aciers inoxydables duplex (Stainless and Pittsburgh, 2011a) | 521 |
| Annexe 4 : Tableau de composition chimique de UGINOX FTE et AME (UGINE, 2002)..... | 523 |
| Annexe 5 : Les différents niveaux du mode d'occupation urbain | 525 |
| Annexe 6 : Liste globale de questions sur « Les règles de choix des matériaux de couverture sur les différents éléments de toit» | 527 |
| Annexe 7 : Exemple - Synthèse de l'entretien avec Philippe Boisseau | 531 |
| Annexe 8 : Extrait questionnaire enquête..... | 539 |
| Annexe 9 : Analyse des entretiens pour l'élaboration des règles de passage de la famille des matériaux de rampant au matériau de rampant à l'échelle urbaine..... | 541 |
| Annexe 10 : Règles de corrélation entre le matériau du rampant et le matériau d'un élément de toit à l'échelle urbaine | 545 |
| Annexe 11 : Déroulement d'un projet de construction et acteurs..... | 549 |
| Annexe 12 : Les personnes interrogées dans le cadre de l'enquête par entretien | 551 |
| Annexe 13 : Les rénovations de toitures à Créteil..... | 553 |
| Annexe 14 : Méthode de Monte Carlo | 555 |
| Annexe 15 : Les résultats de calcul de la répartition des familles des matériaux de rampant ainsi que les longueurs de gouttières et de noues pour la ville de Créteil..... | 557 |
| Annexe 16: Les différentes Familles de matériaux et matériaux repérés dans chaque entité | 562 |
| Annexe 17: Communications et articles | 563 |

Annexe 1: Définition des éléments d'une toiture inclinée

http://www.ardoise-angers.fr/web/p275_glossaire.html

On peut diviser ces éléments en trois catégories :

- a. **Rampant** : c'est la partie inclinée du toit, elle constitue la plus grande partie de l'ouvrage.
- **Ressaut** : Elément permettant la dilatation du matériau, disposé toutes les 3 feuilles environ, dans le sens du rampant
- b. **Les éléments d'étanchéité** : il s'agit des jonctions des rampants lorsqu'il y a un changement d'orientation de la couverture ou bien encore lorsqu'une évacuation est présente.
- **Arêtier** : ligne saillante inclinée, droite ou courbe, formée pour l'intersection latérale de deux versants d'une toiture. Un arêtier est constitué de deux " rives en arêtier ".
 - **Brisure** : Ligne d'intersection horizontale de deux pans de toiture superposées et formant un angle rentrant.
 - **Faîtage** : Ligne haute droite ou biaise d'un toit, formée par la rencontre de deux versants opposés. Ouvrage assurant l'étanchéité de cette ligne.
 - **Noe** : Une noe est la jonction des deux versants d'une toiture, cette jonction formant un angle rentrant. Elle assure l'étanchéité de la jonction.
 - **Rive** (d'égout, de tête, latérale rive de lucarne) : Extrémité latérale d'un pan de toiture, autre que la faite ou les égouts (droits ou biais). Une rive est dite droite si elle est parallèle à la ligne de plus grande pente, biaise dans le cas contraire (la rive biaise que fuit l'eau est en général un arêtier). La rive de tête d'un pan de toiture est son bord supérieur, lorsque celui-ci n'est pas un faîtage.
 - **Etanchéité lucarne** : la lucarne est une construction recouvrant une baie ouverte sur un pan de couverture. Le dessus est recouvert par un comble, les côtés forment les jouées. Il existe une grande variété de lucarnes.
 - **Etanchéité chatière** : La chatière est un Accessoire destiné à l'aération du comble ou de la sous-toiture.
 - **Raccord sur pénétration** : pour assurer l'étanchéité des éléments de la toiture. C'est une sorte de couvre joint en mortier, destiné à assurer l'étanchéité entre un mur et un porte-solin. Une pièce de plomb, de zinc ou d'aluminium, installée autour d'une cheminée sur un toit de tuiles ou d'ardoises afin de protéger cette dernière des eaux pluviales, il s'agit alors d'un élément composant un abrégement. Une bande profilée en métal, posée engravée dans un mur acrotère comme couvre-joint de relevé de l'étanchéité, aussi appelée la bande de solin. Et un ciment disposé à combler un angle horizontal.
- c. **Les évacuations des eaux de pluies** :
- Egout** : Ligne basse, droite ou biaise d'un pan de couverture ou d'une portion de toit, par où s'écoule l'eau de ruissellement. Il est en saillie des murs, en débordement dans une gouttière, un chéneau ou encore derrière une souche de cheminée.
- **Gouttière et chénaux** : Canal destiné à la collecte et à l'évacuation des eaux pluviales, placé à la base des pentes d'un toit. La gouttière est plus légère que le chéneau, elle peut être pendante ou portée.
 - **Descente** : c'est une canalisation de section circulaire ou carrée verticale (ou en forte pente), par laquelle on "descend" jusqu'au niveau du sol les eaux pluviales recueillies par les chéneaux et gouttières. La descente est terminée à sa base par un dauphin. Le choix du diamètre d'une descente est donné par des abaques, en fonction de la surface de récolte d'eaux (surface en projection horizontale), de l'intensité des pluies, et de la forme droite ou conique du moignon.

•

Annexe 2 : Source des figures utilisées dans le Chapitre 1.1 et 1.2

Figure 2

(a) <http://www.nanook-world.com/2004/11/turquie-circuit-n%C2%B01-de-nemrut-dag-a-konya/>

(b) <http://www.fao.org/docrep/x5023f/x5023F06.HTM>

Figure 10

(a) <http://www.bati-journal.mobi/restauration-rehabilitation/la-tuile-canal-quintescia-dimerys-terre-cuite/7225>

(b) http://www.carrelagesdeprovence.com/produits_personnalises_salernes_var.htm

(c) <http://www.construction-renovation.fr/quelle-toiture-choisir-pour-votre-maison/>

(d) <http://www.all.biz/fr/la-tuile-metallique-bgg1008750>

Figure 11 : http://www.batirenover.com/articles/lardoise_453.htm

Figure 12 <http://www.astergenieclimatique.fr/pages/diagnostics-immobiliers/amiante.php>

Figure 13: <http://www.quintametalica.com/fr/plomo.php>

Figure 14: <http://www.bernard-escurier.com/fr/couverture/couverture.htm>

Figure 15 : <http://www.couverture-michel-boussicaud.com/zinc.html>

Figure 16: <http://www.vmezinc.ch/FR/FR-html/vmezinc-zinc-aspect-surface.php>

Figure 17 :

(a) http://www.sodmarmande.com/index.php?sel_menu=Bardage%20/%20Couverture&old=accueil

(b) <http://www.archiexpo.fr/prod/hedar-edilizia-metallica/couvertures-toles-acier-ondulees-55394-125846.html>

(c) <http://www.joriside.fr/fr->

[FR/Produits/Facade%20et%20bardage/Profile%20trapezoidal%20et%20accessoires.aspx](http://www.joriside.fr/fr-FR/Produits/Facade%20et%20bardage/Profile%20trapezoidal%20et%20accessoires.aspx)

Figure 18 : <http://www.netprof.fr/Bricolage/Tous-les-cours-en-video.4.0.0.aspx>

Figure 20 : <http://www.astergenieclimatique.fr/pages/diagnostics-immobiliers/amiante.php>

Figure 48 : <http://allezlarochelle.centerblog.net/rub-france-vue-du-ciel--3.html>

Figure 49 : http://www.memoiresmillenaires.com/Marseille_plein_ciel.html

Figure 50 : <http://www.jds.fr/gastronomie/alsace>

Figure 51 : <http://www.toiture-chaume.com/>

Figure 52 : <http://blaswood.relaispro.com>

Figure 53 : http://sainte-genevieve.net/Pages_fr/pantheon_fr.htm

et https://fr.123rf.com/photo_5050916_detail-de-la-coupoles-pantheon-a-paris-france.html

Figure 54 : <http://www.photographium.com/dome-des-invalides-paris-france-1851-1870>

et <http://www.mackoo.com/Paris/invalides.htm>

Figure 55 : <http://www.france-travel-photos.com/tourism-photo-335-fr-ile-de-france-yvelines-chateau-de-versailles-aile-droite-du-chateau-parterre-nord-et-fontaine-pyramide.html>

Figure 56 : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:%C3%89glise_Sainte-Jeanne-de-Chantal_\(Paris\)_9.jpg](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:%C3%89glise_Sainte-Jeanne-de-Chantal_(Paris)_9.jpg)

Figure 57 : <http://jlargonnais.over-blog.com/article-toiture-argonnaise-la-tuile-canal-ou-tige-de-botte-107039365.html>

Figure 58 : <http://produits-btp.batiproduits.com/Vmezinc-Umicore/Vmz-Couverture-A-Tasseaux/fiche/r?id=1000209799>

Figure 59 : <http://www.isabelle-leca.fr/2013-chateau-amboise.html> et

<http://www.romani.fr/gouttieres.html>

Annexe 3 : Tableau de composition chimique (% massique) des aciers inoxydables duplex (Stainless and Pittsburgh, 2011a)

| C | Cr | Ni | Mo | N | Mn | Cu | W |
|---------------------------------------|-----------|----------|----------|-----------|---------|-----------|-----------|
| Aciers duplex corroyés | | | | | | | |
| Nuances duplex de première génération | | | | | | | |
| 0,08 | 23,0–28,0 | 2,5–5,0 | 1,0–2,0 | – | 1,00 | – | – |
| 0,03 | 18,0–19,0 | 4,3–5,2 | 2,5–3,0 | 0,05–0,1 | | – | – |
| 0,04 | 20,5–22,5 | 5,5–8,5 | 2,0–3,0 | 0,20 | 2,00 | 1,0–2,0 | – |
| Nuances duplex de seconde génération | | | | | | | |
| Lean | | | | | | | |
| 0,03 | 19,5–21,5 | 1,0–3,0 | 0,6 | 0,05–0,17 | 4,0–6,0 | 1,0 | – |
| 0,04 | 21,0–22,0 | 1,35–1,7 | 0,1–0,8 | 0,20–0,25 | 4,0–6,0 | 0,1–0,8 | – |
| 0,03 | 21,5–24,0 | 1,0–2,8 | 0,45 | 0,18–0,26 | 2,00 | – | – |
| 0,03 | 20,5–23,5 | 1,0–2,0 | 0,1–1,0 | 0,15–0,27 | 2,0–3,0 | 0,5 | – |
| 0,03 | 21,5–24,5 | 3,0–5,5 | 0,05–0,6 | 0,05–0,20 | 2,50 | 0,05–0,60 | – |
| 0,03 | 22,0–24,0 | 3,5–5,5 | 0,1–0,6 | 0,05–0,20 | 2,00 | 1,0–3,0 | – |
| Standard | | | | | | | |
| 0,03 | 19,5–22,5 | 3,0–4,0 | 1,5–2,0 | 0,14–0,20 | 2,00 | – | – |
| 0,03 | 21,0–23,0 | 4,5–6,5 | 2,5–3,5 | 0,08–0,20 | 2,00 | – | – |
| 0,03 | 22,0–23,0 | 4,5–6,5 | 3,0–3,5 | 0,14–0,20 | 2,00 | – | – |
| 25 % Cr | | | | | | | |
| 0,03 | 24,0–26,0 | 5,5–6,5 | 1,2–2,0 | 0,14–0,20 | 2,00 | – | – |
| 0,03 | 24,0–26,0 | 5,5–7,5 | 2,5–3,5 | 0,10–0,30 | 1,00 | 0,2–0,8 | 0,1–0,5 |
| 0,03 | 24,0–26,0 | 5,5–7,2 | 3,0–3,5 | 0,08–0,20 | 1,00 | – | 0,05–0,30 |
| 0,03 | 24,0–26,0 | 5,5–8,0 | 3,0–4,0 | 0,20–0,35 | 1,50 | 0,5–2,0 | – |
| 0,04 | 24,0–27,0 | 4,5–6,5 | 2,9–3,9 | 0,10–0,25 | 1,50 | 1,5–2,5 | – |

**Annexe 4 : Tableau de composition chimique de UGINOX FTE et AME
(UGINE, 2002)**

| Composition chimique (Analyse de coulé) en % | | |
|--|----------------------------------|----------------------------------|
| | 1.4510 / UGINOX FTE [®] | 1.4404 / UGINOX AME [®] |
| C | < 0,05 % | < 0,03 % |
| Si | ≤ 1,00 % | ≤ 1,00 % |
| Mn | ≤ 1,00% | ≤ 2,00 % |
| P | ≤ 0,04 % | ≤ 0,045 % |
| S | ≤ 0,015 % | ≤ 0,015 % |
| N | - | ≤ 0,11 % |
| Cr | 16,0 – 18,0 % | 16,50 à 18,50 % |
| Ni | - | 10,00 à 13,00 % |
| Mo | - | 2,00 à 2,50 % |
| Ti | 4 x (C+N) + 0,15 bis 0,80 % | - |

Annexe 5 : Les différents niveaux du mode d'occupation urbain



Nomenclature de l'occupation du sol

| 11 postes | 24 postes | 47 postes | 81 postes |
|----------------------|---|---|---|
| 1 Bois ou forêts | 1 Bois ou forêts | 1 Bois ou forêts 2 Coupes ou clairières en forêts | 1 Bois ou forêts 2 Coupes ou clairières en forêts |
| 2 Cultures | 2 Grandes cultures 3 Autres cultures | 3 Peupleraies 4 Terres labourées 5 Surfaces en herbe à caractère agricole 6 Vergers, pépinières 7 Maraîchage, horticulture 8 Cultures intensives sous serres | 3 Peupleraies 4 Terres labourées 5 Surfaces en herbe à caractère agricole 6 Vergers, pépinières 7 Maraîchage, horticulture 8 Cultures intensives sous serres |
| 3 Eau | 4 Eau | 9 Eau | 9 Eau fermée (étangs, lacs...) 10 Cours d'eau |
| 4 Autre rural | 5 Autre rural | 10 Surfaces en herbe non agricoles 11 Carrères, sablières 12 Décharges 13 Vacant rural | 11 Surfaces en herbe non agricoles 12 Carrères, sablières 13 Décharges 14 Espaces ruraux vacants (marais, friches...) 15 Berges |
| 5 Urbain ouvert | 6 Parcs ou jardins 7 Sports (espaces ouverts) 8 Tourisme et loisirs (espaces ouverts) 9 Terrains vacants | 14 Parcs ou jardins 15 Jardins familiaux 16 Jardins de l'habitat 17 Terrains de sport en plein air 18 Équipements sportifs de grande surface 19 Camping, caravaning 20 Parcs liés aux activités de loisirs 21 Terrains vacants | 16 Parcs ou jardins 17 Jardins familiaux 18 Jardins de l'habitat individuel 19 Jardins de l'habitat rural 20 Jardins de l'habitat continu bas 21 Terrains de sport en plein air 22 Tennis découverts 23 Baignades 24 Parcs d'évolution d'équipements sportifs 25 Golfs 26 Hippodromes 27 Camping, caravaning 28 Parcs liés aux activités de loisirs 29 Terrains vacants en milieu urbain |
| 6 Habitat individuel | 10 Habitat individuel | 22 Habitat individuel | 30 Habitat individuel |

| | | | |
|----|--|--|---|
| | | 23 Ensemble d'habitat individuel identique | 31 Ensembles d'habitat individuel identique |
| | | 24 Habitat rural | 32 Habitat rural |
| 7 | Habitat collectif | 25 Habitat continu bas | 33 Habitat continu bas |
| | | 26 Habitat collectif continu haut | 34 Habitat collectif continu haut |
| | | 27 Habitat collectif discontinu | 35 Habitat collectif discontinu |
| | 12 Habitat autre | 28 Habitat autre | 36 Prisons |
| | | | 37 Habitat autre |
| 8 | Activités | 29 Equipements pour eau, assainissement, énergie | 38 Production d'eau |
| | | | 39 Assainissement |
| | | | 40 Electricité |
| | | | 41 Gaz |
| | | | 42 Pétrole |
| | | | 43 Infrastructures autres |
| | | 30 Zones ou espaces affectés aux activités | 44 Activités en tissu urbain mixte |
| | | | 45 Grandes emprises industrielles |
| | | | 46 Zones d'activités économiques |
| | | | 47 Entreposage à l'air libre |
| | | | 48 Entrepôts logistiques |
| | 14 Entrepôts logistiques | 31 Entrepôts logistiques | 49 Grandes surfaces commerciales |
| | 15 Commerces | 32 Commerces | 50 Autres commerces |
| | | | 51 Grands magasins |
| | | | 52 Stations-service |
| | 16 Bureaux | 33 Bureaux | 53 Bureaux |
| 9 | Equipements | 34 Bâtiments ou installations de sport | 54 Installations sportives couvertes |
| | | | 55 Centres équestres |
| | | | 56 Piscines couvertes |
| | | | 57 Piscines en plein air |
| | | | 58 Autodromes |
| | | | 59 Enseignement de premier degré |
| | | | 60 Enseignement secondaire |
| | 17 Bâtiments ou installations de sport | | 68 Sièges d'administrations territoriales |
| | | | 69 Equipements de missions de sécurité civile |
| | | | 70 Equipements d'accès au public limité |
| | | | 71 Mairies |
| | | | 72 Marchés permanents |
| | | | 73 Lieux de culte |
| | | | 74 Autres équipements de proximité |
| | 18 Equipements d'enseignement | 35 Equipements d'enseignement | |
| | | | |
| | 22 Autres équipements | 40 Administrations, organismes officiels | |
| | | | |
| | | 41 Autres équipements accueillant du public | |
| | | | |
| 10 | Transports | 42 Emprises de transport ferré | 75 Emprises de transport ferré |
| | | 43 Emprises routières | 76 Voles de plus de 25 m d'emprise |
| | | 44 Parcs de stationnement | 77 Parkings de surface |
| | | | 78 Parkings en étages |
| | | 45 Gares routières, dépôts | 79 Gares routières, dépôts de bus |
| | | 46 Installations aéroportuaires | 80 Installations aéroportuaires |
| | 11 Chantiers | 47 Chantiers | 81 Chantiers |

© IAU IdF 2010

Annexe 6 : Liste globale de questions sur « Les règles de choix des matériaux de couverture sur les différents éléments de toit »

Notons que selon la personne interrogée la fraction de questions extraite de cette liste globale n'était pas forcément la même.

1) Les règles générales d'utilisation d'un matériau de toiture

Pour une même famille de matériaux (zinc, tuile, ardoise, bardeaux, acier, cuivre, plomb, aluminium, plaques ondulées) on distingue plusieurs variantes par exemple pour la famille zinc on trouve zinc prépatiné, zinc naturel, zinc coloré et pour la famille tuile on trouve tuile terre cuite, tuile métallique et tuile béton.

-Quels sont les critères qui influencent l'utilisation d'une variante donnée associée à une même famille de matériaux (zinc prépatiné, zinc naturel, zinc coloré, d'une même famille de matériau par rapport à un autre (esthétique, cout, réglementation, histoire, type de bâtiment) ?

-Les réglementations imposent-elles une variante précise ?

-Le type du bâtiment agit-il sur le choix d'une variante ? Par exemple pour les bâtiments collectifs si on doit avoir une toiture en zinc/tuile, lequel des produits en zinc/tuile utilise-t-on ?

- Données sur le marché **global** en France ou en particulier dans le département 94 : sur les matériaux de couvertures au cas échant source....

- Autres critères ?

→ Cette information permettra d'avoir une idée sur la répartition sur le marché des différents produits du zinc

-Hiérarchisation des facteurs du plus important au moins important ?

- A quel niveau le facteur historique influence l'utilisation d'un produit dérivé ?

- Le renouvellement d'une toiture pourra être effectué par le même matériau ou par un autre de la même famille ?

- Disponibilité des documents ?

- Est-ce que vous pouvez **hiérarchiser** l'utilisation des différents matériaux en IDF, à paris ou 94 ? : Si c'est possible préciser des ratios pour chaque matériau

* Pour les toitures en **tuile** numérotez les variantes (**Tuile terre cuite, tuile béton, tuile métallique**) à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

* Pour les **aciers** numérotez les variantes (**Acier naturel, acier inoxydable, acier galvanisé et acier prélaqué**) à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage?

* Pour les **ardoises** numérotez les variantes (**Ardoise naturelle, ardoise fibre ciment**) à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage?

* Pour le **zinc** numérotez les variantes (**Zinc, zinc prépatiné (anthra et quartz zinc) zinc laqué, zinc coloré**) à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage?

* Pour l'**aluminium** numérotez les variantes (**aluminium peint, naturel**) à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage?

* Numérotez les variantes (**plaque ondulée fibres ciment, PVC**) à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage?

2) Les règles générales d'utilisation d'un matériau de gouttière en fonction du matériau de toiture

- Quels sont les critères qui influencent l'utilisation d'un matériau de gouttière par rapport à un autre (esthétique, facilité d'entretien, coût, réglementation, histoire, durée de vie du matériau, type de bâtiment) ?

- Au niveau des DTU, on trouve une description des matériaux de gouttière. Pour toutes les familles de matériaux de couverture les matériaux des gouttières sont : **zinc, cuivre, acier inoxydable, PVC et aluminium** → Est-ce que ces matériaux représentent bien ce qui se passe en réalité ?

-Pour les toitures métalliques les gouttières sont du même matériau de toiture ou sont en PVC → Il faudra hiérarchiser l'utilisation de matériau de gouttière entre PVC et les métaux dans le cadre des toitures métalliques.

- Le facteur cout : On établira un tableau hiérarchique des matériaux de gouttière en fonction de leurs coûts.

→ Durée de vie du matériau : On établira un tableau hiérarchique des durées de vie des matériaux des classes de gouttières

- Est-ce que vous pouvez hiérarchiser ces différents critères ?

- Des chiffres sur le marché des matériaux des gouttières en France et en particulier dans le département 94 (Créteil)

- Est-ce que vous pouvez hiérarchiser l'utilisation des différents matériaux en IDF, à paris au 94 ? :

* Pour les toitures en **tuile** numérotez les **matériaux de gouttière (zinc, cuivre, acier inoxydable, PVC et aluminium)** à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

* Pour les toitures en **ardoise** numérotez les **matériaux de gouttière (zinc, cuivre, acier inoxydable, PVC et aluminium)** à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

* Pour les toitures en **bardeaux bitumés** numérotez les **matériaux de gouttière (zinc, cuivre, acier inoxydable, PVC et aluminium)** à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

* Pour les toitures **métalliques** numérotez les **matériaux de gouttière (zinc, cuivre, acier inoxydable, PVC et aluminium)** à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

Les gouttières en du zinc

- De quel produit de zinc est-elle fabriquée la gouttière ?

- Sur quel type de toiture trouve-t-on des gouttières en zinc ? Y-a-t-il des critères qui influence le constructeur pour choisir un matériau de gouttière par rapport à un autre ? ? (esthétique, cout, réglementation, histoire, type de bâtiment, matériau de couverture, durée de vie, entretien...)

- Est-ce que vous pouvez hiérarchiser l'utilisation de différentes variantes du zinc en gouttière :

* Pour la gouttière en zinc numérotez les variantes (Zinc, zinc prépatiné (anthra et quartz zinc) zinc laqué, zinc coloré) à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage?

Les gouttières en aluminium

- De quel produit d'aluminium (naturel ou laqué) est-elle fabriquée la gouttière ?

- Sur quel type de toiture trouve-t-on des gouttières en aluminium ? Y-a-t-il des critères qui influence le constructeur pour choisir un matériau de gouttière par rapport à un autre ? ? (esthétique, cout, réglementation, histoire, type de bâtiment, matériau de couverture, durée de vie, entretien...)

* Pour la gouttière en **aluminium** numérotez les variantes (aluminium peint, naturel) à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage?

3) Les règles générales d'utilisation d'un matériau de noue en fonction du matériau de toiture

- Quels sont les critères qui influencent l'utilisation d'un matériau de noue par rapport à un autre (esthétique, coût, réglementation, histoire, durée de vie du matériau, type de bâtiment) ?

- **facteur réglementaire** : on a DTU autres réglementation qui influence le matériau de gouttière

| Famille matériau de couverture | Tuile | Ardoise | Bardeaux bitumineux | Couvertures métalliques (Cu, Al, Zn, Aciers, Pb) |
|---------------------------------------|----------------------|--|---|--|
| Classe noue | Tuile, Zinc, Mortier | Ardoise, Zinc, Acier inoxydable, Cuivre, Plomb | Bardeaux bitumineux, Eléments métalliques | Cu, Al, Zn, Aciers, Pb |

- **Toitures métalliques** : Les noues sont du même matériau que la couverture pour des raisons de corrosion → **Confirmer vous ce constat ?**

- Est-ce que vous pouvez hiérarchiser l'utilisation des différents matériaux de noue **par matériau de toiture** :

* Pour les toitures en **tuile** numérotez les **matériaux de noue (tuile, mortier et zinc)** à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

* Pour les toitures en **ardoise** numérotez les **matériaux de noue (Ardoise, Zinc, Acier inoxydable, Cuivre, Plomb)** à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

* Pour les toitures en **bardeaux bitumés** numérotez les **matériaux de noue (Bardeaux bitumineux, Eléments métalliques)** à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

- **facteur historique** : L'utilisation d'un matériau de noue dépend de facteurs historiques. Pour les toitures en ardoise et en tuile, les noues étaient principalement en plomb avant le 19^{ème} siècle et à partir du 19^{ème} siècle le matériau principale des noues est le zinc

- Autres facteurs

- Est-ce que vous pouvez hiérarchiser ces différents critères ?

- Des chiffres sur le marché des matériaux des noues en France et en particulier dans le département 94 (Créteil)

- Est-ce que vous pouvez hiérarchiser l'utilisation des différents produits du zinc en noue sur la couverture :

* Pour les noues en zinc numérotez les variantes (Zinc, zinc prépatiné (anthra et quartz zinc) zinc laqué, zinc coloré) à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

5) Les règles générales d'utilisation d'un matériau de descente en fonction du matériau de toiture

- Quels sont les critères qui influencent l'utilisation d'un matériau de noue par rapport à un autre (esthétique, coût, réglementation, histoire, durée de vie du matériau, type de bâtiment) ?

- Au niveau des DTU, on trouve une description des matériaux de **descente**. Pour toutes les familles de matériaux de couverture les matériaux des descentes sont : **Zinc, Cuivre, Acier inoxydable, Acier, Fonte, PVC** → **Est-ce que ces matériaux représentent bien ce qui se passe en réalité ?**

* Pour les toitures en **tuile** numérotez les **matériaux de descente (Zinc, Cuivre, Acier inoxydable, Acier, Fonte, PVC)** à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

* Pour les toitures en **ardoise** numérotez les **matériaux de descente (Zinc, Cuivre, Acier inoxydable, Acier, Fonte, PVC)** à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

* Pour les toitures en **bardeaux bitumés** numérotez les **matériaux de descente (Zinc, Cuivre, Acier inoxydable, Acier, Fonte, PVC)** à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

* Pour les toitures **métalliques** numérotez les **matériaux de descente (Zinc, Cuivre, Acier inoxydable, Acier, Fonte, PVC)** à partir de 1 de la plus utilisée la moins utilisée et donnez à chaque fois un ratio ou un pourcentage ?

Durabilité

- c'est quoi la durée de vie de chaque matériau de zinc (naturel, prépatiné...) et pour chaque élément du toit : noue, couverture, gouttière, descente ?

- La rénovation, est ce qu'on change l'ancien zinc par le même zinc ou un autre matériau dérivé ou encore un nouveau matériau ? Ce choix dépend-il du marché ?

6) MOS et matériaux de couverture

Idee : on dispose d'une base de données détaillée de MOS (IAU-IDF). Notre hypothèse est que l'utilisation des matériaux dépend du type de bâtiments.

- Y-a-t-il à votre connaissance des travaux qui affirment qu'il y a un lien entre l'utilisation des matériaux de couverture et le type de bâtiment.

- Nous avons défini à partir de la base de données de l'IAU-IDF, 11 classes habitat individuel, habitat collectif, habitat autre (prison, auberge...), activités secondaires, sport, équipement type 1 (bureau+administratifs), équipement type2 (enseignement+culturel), surfaces commerciales, équipement de santé, grands équipements (eau, gaz...), transport.

- Que pensez-vous ? Faut-il réduire ces classes ou plus les détailler ? Pour pouvoir se situer par rapport à cette question, il faut lui montrer tous les MOS les plus détaillés correspondant à du bâti (i.e. le niveau de base des 83 postes auxquels on a soustrait les postes ne concernant pas le bâti).

7) L'histoire des matériaux

Pour mieux cerner et identifier les matériaux de toiture dans une zone urbaine donnée il est nécessaire de connaître l'histoire de cette zone.

Hypothèse : à chaque période historique correspond une certaine disponibilité de matériaux sur le marché sur le marché

Objectif : dresser un tableau chronologique de l'évolution historique du marché des matériaux de toiture. (Date d'apparition, de diffusion massive, de disparition éventuelle)

Sources : on a repéré une partie des sources qui restent incomplète

- liste des matériaux : les DTU, l'étude de marché [MSI, 2006]), documentation commerciale, études diverses que l'on peut trouver au CSTB (service de doc) ou dans les syndicats professionnels type CSFE, FFB, CAPEB ou repérées via les entretiens d'expert → quel est le GS (groupe spécialisé) concerné par ce sujet au CSTB ?
- Histoire : littérature, bibliographie commerciale...

Résultat : un premier tableau chronologique qu'on essaye de compléter (on manque de sources)

-Avez-vous plus d'information sur l'évolution, disparition et apparition des matériaux de couverture à partir des années 2000 à 2012 ?

-Quels sont les grands changements qui ont affecté les matériaux de couverture durant ces dernières années ? Élargir à depuis la période de la reconstruction

-Est-ce que ces changements affectent l'utilisation et la commercialisation des produits (marché) ? Comment ?

→Quels sont en fonction de ces changements les matériaux dominants et les matériaux marginaux ?

-Les matériaux des DTU recouvrent-ils tous les matériaux du marché ? Si non comment les autres matériaux sont-ils normalisés ?

S'il y a d'autres matériaux quelle est leur part de marché ? Sont-ils beaucoup employés ou ils restent singuliers et rarement utilisés ?

→ Jusqu'à quel niveau de détail vont les DTU ? Est-ce qu'ils distinguent entre les différentes variantes d'une même famille de matériaux par exemple entre zinc prépatiné et zinc naturel ?

-Jusqu'à quel niveau de détail historique on peut aller dans l'identification de l'évolution des matériaux ?

- Est-ce que l'évolution du secteur (HQE, coût global) a généré l'apparition de nouveaux matériaux et/ou bouleversé la hiérarchie des matériaux de toitures ?

- Pour les éléments de toit : gouttière, noue descente comment se manifeste-t-il l'emploi de leurs matériaux au cours du temps ? Par exemple si un nouveau matériau est utilisé sur le toit sera-t-il de même employé pour les autres éléments ?

- Des informations sur l'évolution des matériaux de gouttière (pvc, aluminium...)?

- Des informations sur l'évolution des matériaux de noue?

8) Histoire du zinc en couverture:

- Quelles sont les dates les plus importantes dans l'évolution du zinc (a priori vers le début du 20èmes)

- Depuis quand le zinc est utilisé en couverture et sur les différents éléments du toit (couverture, gouttière, noue, descente, étanchéité, égout...)?

- Quels sont les produits dérivés du zinc (vision globale sur le marché) ?

- Les matériaux dérivés du zinc quand est-ce qu'ils sont apparus ?

Annexe 7 : Exemple - Synthèse de l'entretien avec Philippe Boisseau

Date : 05/02/2013

Lieu : Fédération française du bâtiment, 33 avenue Kléber, 75784 Paris Cedex 16

Mail : pboisseau@gccp.fr

Tél : 01 40 55 12 17

Fonction : Conseiller technique auprès des entreprises de couverture de Paris et petite couronne. Syndicat des entreprises de génie climatique, de couverture - plomberie et de fumisterie (GCCP)

Mission : Il anime des commissions techniques avec les professionnels de la couverture, de la plomberie, il traite les questions de la prévention technique des professionnels pour l'ensemble des métiers. Il a des connaissances sur les métiers de la région parisienne.

1. L'évolution des matériaux de couverture en rampant au cours du temps est lente

La couverture reste comme un métier traditionnel qui dépend des critères architecturaux. Au niveau de la traversée dans le temps, il n'y a pas eu de grands bouleversements associés à l'apparition de matériaux nouveaux.

Certains matériaux de couverture évoluent. Par exemple le zinc dans sa constitution a évolué et aujourd'hui il présente des caractéristiques mécaniques de solidité supérieure donc une meilleure maîtrise dans la constitution des alliages pour des matériaux plus résistants aux variations de la température. Globalement les choses n'évoluent pas rapidement, on ne voit pas apparaître sur le marché dans Paris et la banlieue de nouveaux matériaux qui puissent bouleverser le paysage.

→ Pour l'évolution historique des matériaux, à part la **révolution industrielle**, on ne note pas de nouveaux bouleversements. Pour la rénovation des toitures on ne note pas une perturbation du paysage français.

- **Aujourd'hui**, ce qui peut impacter l'apparence des toitures c'est l'installation des systèmes solaires ou photovoltaïques pour la production de l'eau chaude thermique, mais cela ça va mettre encore plus de temps surtout pour les habitats collectifs. En effet, il est plus facile de mettre ces systèmes sur les toitures des maisons individuelles que sur celles des habitats collectifs.

2. Les matériaux éléments de toit n'ont pas subi de bouleversements historiques ?

On n'assiste pas à un bouleversement pour l'évolution des matériaux des éléments de toit, ça reste un **domaine traditionnel**. On collecte majoritairement les eaux pluviales avec des gouttières/chéneaux en zinc. Les chéneaux peuvent être en **cuivre** particulièrement dans les zones montagneuses où la dilatation thermique est importante. Donc en fonction de l'amplitude thermique on va choisir des matériaux mécaniquement supportant les variations thermiques sans avoir des défaillances.

3. Le boom d'utilisation des matériaux économiques après la guerre

De nouveaux matériaux (bardeaux bitumineux, tuile béton, les étanchéités terrasse, fibre ciment, tuile métallique ...) sont apparus sur le marché lors du grand boom de la construction. Les années 1970, c'est la reconstruction ouvrière après la guerre jusqu'aux années 80. Entre les années 50 et 80 ce sont les trente glorieuses de la construction. On manque beaucoup de matériau, les producteurs d'ardoise ne suffisent pas la demande, donc on a commencé à importer de l'ardoise d'Espagne. En effet, en France il existe seulement les ardoisiers d'Angers qui ne produisent même pas 10% du besoin du marché Français. Importation majoritaire de l'Espagne mais aussi du Canada, Afrique du Sud, Amérique du Sud.

4. Les matériaux de couverture à Paris : réglementation

Sur Paris, il est inconcevable de dénaturer architecturalement les bâtiments Haussmannien pour faire un bâtiment avec des formes contemporaines.

Dans Paris, compte tenu du nombre important de monuments historiques, on est presque en tout point de la ville à l'intérieur d'un périmètre de 500 m par rapport à un bâtiment historique, ce qui implique l'intervention des architectes des bâtiments de France qui donne leurs avis des modifications d'aspect des toitures. Donc on ne peut pas entreprendre sans en référer à l'autorité des changements d'aspects des toitures même aussi des façades des bâtiments parisiens.

→ Toute intervention sur les bâtiments de Paris doit être soumise à l'avis des architectes des bâtiments de France ou des monuments historiques.

5. La diversité des matériaux exposés dans les salons comme BATIMAT sera représenté en Banlieue et la Province

Bien sûr Batimat reflète une réalité. Ce sont des produits qui vont trouver leur place plutôt en Province que dans Paris. Peut-être en Banlieue, il y a plus de liberté en architecture qu'à Paris pour s'ouvrir à d'autres matériaux et admettre que ces matériaux ont leur place à travers les contraintes qui sont celles aujourd'hui définies par la réglementation thermique (RT).

6. Impact de la réglementation thermique de 2013 sur les nouveaux bâtiments

La réglementation thermique exige de concevoir une enveloppe de bâtiment plus résistante et plus performante que celle du passé. Dans ce cadre il y a des fabricants de matériaux qui développent aujourd'hui et potentiellement des produits pour être en conformité avec la RT en termes de résistance des matériaux.

→ La RT va impacter dans certaines régions le changement d'aspect architectural des bâtiments en conception et en particulier pour les toitures.

Pour les constructions qui débiteront à partir de 2013, la RT va influencer énormément le paysage des toitures en imposant des contraintes. Aujourd'hui une maison individuelle pourra difficilement respecter les exigences et les critères de la RT 2012 sans pouvoir produire une partie de l'énergie nécessaire au fonctionnement de la maison (chauffage, eau chaude - qui représente 35% de la consommation énergétique de la maison...). Ces contraintes vont impacter l'aspect visuel des toitures.

7. Deux types de normes de matériaux de couverture existent :

-Les DTU comme norme de mise en œuvre : ils englobent la grande majorité des matériaux qu'on trouve sur les toitures françaises (plus de 80%).

-Les normes de produits AFNOR : ce sont des normes sur les produits qui définissent les caractéristiques des matériaux. Les industriels s'appuient sur ces normes pour produire les matériaux et essayer d'être en conformité avec ces normes.

8. Limite des DTU sur la description de tous les matériaux de couverture

Les DTU évoluent, ils sont révisés tous les 5 ans, mais ils ne décrivent pas tous les matériaux de couverture. En effet, les DTU se sont des normes de mise en œuvre des matériaux.

Les nouveaux matériaux sont décrits dans des **AVIS TECHNIQUES**.

Liste des DTU de couverture : DTU 40.1 ; DTU 40.2 ; DTU 40.3 DTU 40.4

9. Les DTU décrivent les matériaux des petits éléments de toit

Pour le dimensionnement, il existe un DTU qui décrit les accessoires de toitures et les éléments d'évacuation d'eau pluviale c'est le DTU 40.5

10. Les règles générales d'utilisation d'un produit dérivé sur le rampant

- Règles générale sur le choix du matériau de rampant
- Contrainte au niveau du projet

Le professionnel de couverture (toiture en pente) a le choix entre les différents produits de zinc ou autre famille de matériaux (ex : tuile), sauf si le maître d'ouvrage impose dans le cahier de charge un matériau spécifique.

Dans un **marché public** on ne peut pas imposer un produit de couverture. En effet, le maître d'ouvrage du marché public risque d'être accusé de favoritisme et d'entente illicite avec un fabricant.

- **Dans les bâtiments prestigieux on utilise des matériaux originaux**

Pour les architectures contemporaines avec des courbes et des formes qui sortent de l'ordinaire, il est admis que le matériau de couverture utilisé soit différent afin d'attirer l'attention par rapport au paysage qui entoure le bâtiment.

Pour les constructions nobles (l'ardoise et le zinc). Donc, les beaux bâtiments en villes (ex : hôtel de ville) quelque soit la région présentent des matériaux de toiture spécifiques et nobles qui ne reflètent pas la réalité des matériaux de la ville.

- **Relation entre forme de bâtiment et type de bâtiment**

Les formes de demain seront plus impactées avec la RT (orientation spécifique pour apport solaire) assuré le confort à l'intérieur du bâti.

- **Contrainte régionale**

En fonction de la région, il y a des matériaux qui sont dominants par rapport à une région. Par exemple, dans le pays de la Loire, c'est de l'ardoise qui est très utilisée. A Paris les brisis sont en ardoise. Dans le sud-ouest, le sud et le nord la tuile terre cuite est utilisée : sa couleur est différente selon la région.

- **Contrainte économique**

Tous les matériaux nouveaux qui sont apparus : acier galvanisé, ardoise fibre ciment, tuile métallique, sont classés dans la catégorie matériaux économiques. Ces matériaux-là trouvent un marché lorsqu'il s'agit de constructions économiques.

• *Règles de choix des différentes variétés de tuile*

Les différentes variétés de la tuile : **tuile en terre cuite, tuile béton et tuile métallique**

- **Contrainte régionale**

En *IDF*, pour les constructions nouvelles on trouve plus des tuiles bétons. A Paris pas beaucoup de tuile et si ça existe c'est de la terre cuite. Pour les tuiles métalliques, c'est un matériau très économique, qui existe plus dans les régions du Nord, coté Belgique et donc est quasiment absente en *IDF*.

- **Contrainte historique et économique**

Dans la banlieue on trouve de la tuile terre cuite pour les bâtiments anciens (jusqu'à l'année 1970-1980). Ensuite, on assiste à l'utilisation des tuiles béton surtout pour des raisons économiques.

• *Règles de choix des différentes variétés de l'acier*

Les différentes variétés de l'acier : **Acier naturel, acier inoxydable, acier galvanisé et acier laqué**

- **Typologie de bâtiment**

L'acier est plutôt utilisé pour les bâtiments industriels.

On voit rarement de **l'acier laqué** dans les toitures de logement car lors de la pluie il y a un son comme un tambour par rapport au zinc.

Aujourd'hui **l'acier inoxydable plombé** est utilisé pour traiter des grandes longueurs de chéneaux avec des développements importants. Car cet acier inoxydable présente un coefficient de dilatation deux fois inférieur à celui du zinc. C'est pour cette caractéristique qu'on est amené à utiliser l'acier inoxydable. Il peut être même utilisé en couverture pour de très grands versants que ce soit pour des bâtiments industriels ou même pour les habitations (collectifs ou individuels). Par exemple quand les versants de toiture, quand on ne peut pas organiser une couverture autrement sans ressaut sans marche pour assurer des éléments de dilatation à ce moment-là on ne pourra pas mettre en œuvre dans les bonnes conditions conformément aux DTU du zinc, on va alors utiliser l'inox plombé. Mais cette situation reste très marginale et c'est une solution qui correspond aux caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable plombé.

- **Contrainte régionale**

L'acier galvanisé est plus utilisé dans les régions montagneuses. Dans ces régions on utilise aussi de **l'acier laqué** même sur d'autres types de bâtiments qu'industriels. En IDF, son utilisation est marginale.

- **Hiérarchisation de l'utilisation des variétés de l'acier**

1- **L'acier laqué** est le plus utilisé en couverture car la laque assure une protection plus durable contre la corrosion .

2- **L'acier galvanisé** est utilisé de moins en moins car il vieillit rapidement (aspect rouille).

3- **L'acier inoxydable**, a été utilisé dans une époque à la place du zinc. Le fabricant de cet acier est *Uginox*. Ce fabricant a fait une tentative de pénétration dans le marché de la couverture en zinc avec son matériau en **inox-plombé**. Mais ce matériau a présenté des désavantages : il est plus bruyant que le zinc surtout lorsque la pluie tombe sur le toit et ça dérange dans les habitations/logement. C'est pour cela, que l'inox plombé a été écarté en couverture.

• *Règles de choix des différentes variétés de l'ardoise*

Les différentes variétés de l'ardoise : **Ardoise naturelle, ardoise fibre ciment**

Aujourd'hui on dit *ardoise fibre ciment* (sans amiante), on parle aussi d'*ardoise artificielle* cette appellation a été introduite car dire fibre ciment dans l'esprit des gens c'est de l'amiante.

- **Hiérarchisation de l'utilisation des variétés de l'ardoise**

Le marché de l'ardoise naturelle domine le marché de l'ardoise artificielle.

• *Règles de choix des différentes variétés des plaques*

Les différentes variétés des plaques : **les plaques ondulées (fibro-ciment), plaques d'éclairage (PVC), plaques polyesters, plaques polycarbonate**

- **Utilisation particulière et pour des raisons esthétiques de ces matériaux**

Ces plaques sont utilisées pour répondre à des besoins d'éclairage dans le bâtiment ou pour concevoir des vérandas (plaques d'éclairages ou en macro long alvéolaires). Ce type de matériau reste très spécifique en utilisation, pour des raisons esthétiques et donc pas très répandu en couverture. Il s'agit de **marché marginaux ponctuels**.

• *Règles de choix des différentes variétés de l'aluminium*

Les différentes variétés de l'aluminium : **Aluminium naturel ou peint**

- **Contrainte historique**

A une époque donnée il a été utilisé en couverture de logements collectifs sous la forme de bacs de couvertures en aluminium. Ça date depuis longtemps (40 à 55 ans) souvent sur des anciens logements collectifs, en particuliers les logements sociaux (HLM) ou l'aluminium a peut-être était posé pour des raisons d'aspect et des critères architecturaux contemporains. Mais, aujourd'hui l'aluminium est très rarement utilisé. En fait, souder une toiture en aluminium est un travail très difficile pour lequel les couvreurs ont rarement la compétence. L'aluminium présente un très grand coefficient de dilatation. Dans certaines régions avec des amplitudes thermiques brutales ou saisonnières ce matériau pose plus de problèmes. L'aluminium s'il est utilisé en couverture ça sera du naturel, car le peint ça sera encore plus dur en termes de mise en œuvre.

- *Les toitures-terrasses* : Le bac acier galvanisé ou bac aluminium est utilisé comme support de l'étanchéité, il n'est pas en contact direct avec l'eau.

• *Règles de choix des différentes variétés du zinc*

- **Les différentes variétés du zinc : Zinc naturel, zinc prépatiné (anthra et quartz zinc) zinc laqué, zinc coloré**

Maintenant il y a des zincs appelés prépatinés ou vieillis artificiellement ou naturellement ou chimiquement mais qui prennent l'aspect du zinc vieux. Mais le prépatiné ce n'est pas forcément une nuance vieux zinc qui n'a plus la brillance : ça pourra aussi être une couleur différente du vieux zinc.

Le zinc neuf est plus foncé et plus brillant que le zinc ancien.

Les produits de zinc ont différentes nuances de couleurs qui dépendent du producteur.

Les zincs de couleurs ou vieillis artificiellement (remarque : « pré-patiné », c'est une appellation donnée par Umicore).

Produits Umicore (français): zinc prépatiné par un processus chimique de phosphatation, zinc bilaqué
Produits Rheinzink (allemand): le zinc est patiné d'une manière naturelle ou par l'application d'une peinture → il faut voir la définition attribuée par Rheinzink.

Pour le zinc prépatiné il y a plusieurs nuances de couleurs (rouge, vert, sombre...).

Souvent sur les couvertures parisiennes (ex : zinc), tout ce qui est gris clair c'est du zinc, plus sombre bleu-gris c'est de l'ardoise.

- **L'esthétique est un critère de choix de la variété du zinc**

Le choix des produits du zinc répond à des **critères purement esthétiques** plus que des critères de durabilité.

- **La réglementation influence le choix de la variété du zinc**

La réglementation interdit ou préconise dans certaines zones le choix du matériau en zinc. Par exemple, dans le cas de la rénovation d'un bâtiment impliquant son changement d'aspect, il faudra alors, quasiment et systématiquement en référer à un architecte des Bâtiments de France qui lui va voir si c'est admissible dans l'environnement où se place le bâtiment.

- **Le zinc naturel est le matériau très majoritairement employé en couverture. Il occupe la plus grande part de marché.**

- *Règles de choix des bardeaux bitumineux*

Ils sont utilisés de moins en moins en toiture car on a constaté que c'est un matériau peu durable.

- **Contrainte historique**

Il existe toujours, il est apparu sur le marché français avec la société *Siplast* (le leader de fabrication du bardeau bitumé), il a mis **10 ans** avant de commencer à être mis en œuvre en toiture. Donc il est intensivement utilisé pendant les années 1975-1985. Aujourd'hui il a un marché linéaire qui a régressé par rapport aux années 75-85.

11. Les règles générales d'utilisation d'un matériau de gouttière

La gouttière est un élément de transition entre le matériau de couverture et le matériau de façade. La gouttière en soi n'est pas très esthétique. Donc, comment dissimiler au mieux une gouttière qui souligne le bord du toit ?

- *Critères économique de choix de matériau de gouttière*

Le prix d'une gouttière en cuivre pourra aller jusqu'à 5 fois celui d'une gouttière en PVC.

→ On peut classer les matériaux de gouttière en fonction de leurs coûts par lecture directe du **cours (ou du coût) des matériaux.**

Si on considère trois grandes catégories de matériaux **hiérarchisés par leurs coûts : le cuivre, le zinc et le PVC.**

Avant les années 2005 (la découverte d'une nouvelle technique de pose des gouttières en aluminium), l'**aluminium** c'est très rare en gouttière car c'est très compliqué à souder. Il y a aussi l'**acier inoxydable** qu'on utilise particulièrement car il a un faible coefficient de dilatation. Ce matériau en couverture doit être étamé, i.e. revêtu d'étain (acier spécifique pour la couverture) pour qu'il soit facilement soudé. Il est formé par un alliage plomb-étain qui permet de réaliser des soudures.

- **Utilisation du PVC pour des raisons économiques :** Généralement, un couvreur professionnel évite de mettre une gouttière en PVC vu sa fragilité. Mais elle peut être mise par le propriétaire lui-même pour des raisons économiques.
- **Utilisation du cuivre en gouttière :** Le cuivre on le trouve généralement, dans les régions en montagnes ou sur les monuments ou des constructions un peu nobles ou encore des gens qui préfèrent investir dans une gouttière la plus durable qui sera du cuivre.

- *Contrainte de durabilité d'une gouttière :*

La durabilité est un facteur auquel peuvent être sensibles certaines personnes. Des clients qui ont un peu de moyens seront sensibles aux aspects architecturaux et qui veulent des maisons durables pour

leurs enfants. On peut aussi retarder la rénovation de la gouttière. **Le PVC** c'est fragile et le moins durable, une gouttière en PVC peut tout de même atteindre 20 à 25 ans.

12. Les règles d'utilisation d'un matériau de gouttière en fonction du matériau de rampant

- **Cas des toitures métalliques** : pour uniformiser l'aspect, les accessoires de la toiture sont les mêmes que le rampant. → On a une association entre : matériaux de rampant, accessoires et matériaux de façade
- **Cas des toitures autres que métalliques** : les gouttières sont majoritairement métalliques, bien que le marché du PVC probablement grignote pour des raisons économiques le marché des gouttières métalliques.

13. Hiérarchisation de l'utilisation des matériaux de gouttière par matériau de rampant

- **Pour les toitures en tuile/ardoise** : on trouve comme gouttière majoritairement du zinc, du PVC puis du cuivre.

Le **zinc naturel est le plus utilisé en gouttière** avec des épaisseurs de 105 centièmes. Pour les autres produits dérivés du zinc ils seront mis pour les rampants de même nature de matériaux. Sinon on évite d'utiliser les dérivés du zinc car ça complique la soudure. En effet, pour le zinc prépatiné, il faut décaper la peinture avec des produits chimiques, ensuite après soudure qui devient visible on rajoute un raccord de peinture (non pas pour les gouttières mais pour le rampant)...

14. Epaisseurs des matériaux métalliques utilisés en gouttière ou en rampant

Tous ces métaux sont laminés qui seront façonnés pour donner la forme en fonction de la destination en couverture (rampant, gouttière, noue, chéneaux...).

Les bacs de couverture en zinc peuvent être soumis à des amplitudes thermiques et de dilatation. Effectivement, les gouttières et les chéneaux subissent des phénomènes d'érosion et d'oxydation plus importants qu'un rampant. En rampant on trouve des feuilles de couverture **d'épaisseur 65 centième de millimètre** et pour les gouttières ça sera **en 80 centièmes** car elles sont soumises aux processus d'oxydation plus importants que ceux subis par le rampant.

15. Les règles d'utilisation d'un matériau de descente

Souvent le matériau de descente est le même matériau que la gouttière.

- *Contrainte esthétique :*

Pour des raisons esthétiques, les fabricants de zinc ont adopté des coloris qui permettent de fondre la descente d'eau pluviale avec le matériau d'habillage de la façade. Par exemple on trouve couleur pierre.

- *La fonte est utilisée pour les descentes des façades en arrière*

Généralement, les descentes des façades arrière sont en **fonte** qui avant était raccordées aux réseaux d'eaux usées du bâtiment. Aujourd'hui, les réseaux sont séparatifs et il est interdit de raccorder les descentes aux réseaux d'eaux usées.

- *Contrainte de contact entre deux métaux :*

Les problèmes de corrosion qui existent sont principalement entre le cuivre et le zinc ou entre l'acier galvanisé (revêtu du zinc) et le cuivre. Il s'agit d'une corrosion chimique (phénomène d'électrolyse, comme une réaction au sein d'une pile) et non pas naturelle.

16. Les règles d'utilisation d'un matériau de noues

Les noues sont des éléments constitutifs des toitures. La noue est en liaison directe avec les éléments de la toiture. Pour la toiture métallique, la noue aura le même matériau.

Les noues sont en zinc sur les toitures en ardoise, elle peut être en cuivre. Mais ça reste majoritairement du **zinc naturel**.

17. Les façades

Aujourd'hui les toitures se prolongent de plus en plus en façades.

18. Les contraintes de renouvellement d'une toiture

Le renouvellement d'une toiture dépend des circonstances dans lesquelles un bâtiment se trouve (date de construction, plan d'aménagement...)

- *Les toitures parisiennes*

A Paris, on a l'obligation de respecter le paysage des toitures parisiennes (classées comme historiques) donc le renouvellement sera par le même matériau de toiture.

Le changement d'un matériau n'est plus guidé par les mêmes considérations souvent économiques que lors de la construction du bâtiment. En fait, pour la construction des maisons individuelles, on privilégiera au début le confort intérieur pour des raisons économiques d'où des matériaux de couvertures moins cher. Au moment de la rénovation (après 30, 40 ou 50 ans), le propriétaire peut s'orienter vers un autre choix de matériau de couverture soit parce qu'il a plus de moyens ou car on a trouvé que le matériau de couverture initial n'était pas très fiable ni durable dans le temps. Donc on changera le matériau de toiture pour un autre meilleur pour ne pas refaire la mauvaise expérience (ex : les bardeaux bitumés ne sont pas durables et généralement lors du renouvellement ils sont remplacés par un nouveau matériau). D'autre part, **en France on construit pour plusieurs générations.**

Le foncier aujourd'hui représente une part importante de l'investissement de l'immobilier. En fait, si on pose une maison sur un terrain, ce dernier va représenter en valeur le prix de la maison. Donc la maison ne représente plus le même poids qu'auparavant (elle représentait les quatre cinquième de l'investissement). Aujourd'hui les tendances s'inversent à égalité entre maison et terrain. La maison qu'on construit n'est plus destinée à 3 à 4 générations mais on la construit pour soi ou au meilleur des cas elle sera transmise aux enfants si elle est en bonne état. Donc, on aura tendance à raser la maison et reconstruire une nouvelle qui prendra en considération les nouveaux critères de réglementations de la construction comme la RT.

Cette RT amènera les gens à faire des choix économiques favorisant plutôt le confort intérieur, les critères d'agencement de fonctionnalité. La maison d'autrefois, n'existera plus, avec un long couloir sur lequel sont distribuées les pièces.

19. L'utilisation des matériaux de couverture en fonction de la classe bâtiment

On veut classer les bâtiments en fonction de leurs fonctions.

- Paris est un ensemble architectural harmonieux : les classes de bâtiments s'intègrent dans la structure haussmannienne.
- Dans la banlieue :

Les différentes classes de bâtiments :

- *Bâtiment Individuel* : c'est majoritairement de la tuile mécanique (terre cuite et béton)
- *Bâtiment Collectif* : les matériaux les plus souvent utilisés sont le zinc et l'ardoise (Paris et Banlieue) puis on trouve les toitures terrasses
- *Bâtiment autre* : prison (matériaux qui résistent au feu et aux dégradations, donc plutôt terrasses) → couverture à caractère industriel
- *Bâtiments tertiaires = Bureau+surfaces commerciales+bâtiments publics : administratifs, Enseignement, équipement de santé* : on le considère comme une même classe, il s'agit principalement d'immeubles avec des toitures terrasses avec des étanchéités

D'une manière générale les équipements publics ont le même type de toiture.

- *Activité secondaire (industrielle)*: acier laqué ensuite plaques fibrociment pour les bâtiments anciens avec présence l'amiante, des toitures terrasses → Il s'agira des matériaux économiques
- *Bâtiments culturels* : majoritairement toitures terrasses ça peut être aussi des bâtiments contemporains avec des formes architecturales courbes pour lesquelles on a recours à la couverture métallique diverse (zinc, cuivre...)

- *Grands équipements (eau+gaz)* : ils présentent un caractère plus au moins industriel donc ils peuvent être en toitures terrasses ou avec des toitures industrielles (plaques acier laqué, fibrociment)
- *Transport*

Remarque : couverture et étanchéité sont deux métiers différents

Annexe 8 : Extrait questionnaire enquête

TOITURES EN TUILE

1. D'après nos recherches nous trouvons différentes variétés de tuile. Parmi ces variétés lesquelles proposez-vous dans le marché ?
 - Terre cuite engobée
 - Terre cuite émaillée
 - Terre cuite siliconée
 - Terre cuite patinée
 - Béton
 - Métallique : Acier laqué
 - Plastique
2. Produisez-vous d'autres variétés ?
Lesquelles :
3. Quelle est la variété la plus demandée ?
4. D'après votre expérience quels sont les critères de choix d'une variété de tuile par rapport à une autre ?
 - Prix
 - Durabilité
 - Zone géographique
 - Type de habitat collective / individuel
 - Type de bâtiment
 - Matériaux des gouttières / descentes
5. Pouvez-vous affirmer que le marché des tuiles est plutôt pour les habitats individuels et collectifs ?
6. Pouvez-vous donner des informations sur les périodes dans lesquels chaque variété des tuiles apparaît sur le marché ? Par exemple entre
 - 1900/1950
 - 1950/ 1980
 - 1980/ 2013
7. Après les guerres il y a eu une forte utilisation des tuiles en béton ?
8. Pouvez-vous donner une répartition entre tuile béton et tuile en terre cuite, en terme patrimonial ?
9. Est-ce que c'est possible d'avoir une idée sur la distribution des matériaux des tuiles par type de bâtiment ? Oui Non
10. Si une toiture a été construite en tuile, son renouvellement sera fait avec le même matériau ?
Oui Non

MATERIAUX DE GOUTTIERES

11. D'après les DTU les matériaux de gouttière utilisés pour les toitures en tuile sont :
 - Zinc
 - Cuivre
 - Acier Inoxydable
 - PVC
 - Aluminium

Pouvez-vous confirmer cette information ?
Avez-vous connaissance de l'utilisation d'un autre matériau ?

Si oui lequel ?

12. Quels sont les matériaux de gouttières plus utilisés sur les toitures en tuile ?
Par ordre d'utilisation : Le choix du matériau des gouttières et descentes dépend des différentes variétés des tuiles ?
13. Quelles sont les proportions des différents matériaux de gouttières utilisés sur les toitures en tuiles ?
14. Sur les anciens bâtiments avec de toitures en tuile, construits entre 1950 et 1980, peut-on affirmer que la répartition des matériaux de gouttière est : 95% en zinc et 5% en cuivre ?
15. Faites-vous des mélanges des matériaux entre les gouttières et les descentes ?
16. Quel type matériau est le plus utilisé pour la rénovation des gouttières et descentes dans les toits en tuiles ?
17. Depuis les années 80 la répartition des matériaux de gouttière pour les maisons individuelles est équiprobable entre PVC, zinc et aluminium ? Confirmez-vous cela ?
18. Aujourd'hui, partout en France, quel que soit le type du bâtiment la répartition des matériaux de gouttières est : 1/3 zinc, 1/3 PVC et 1/3 aluminium ? Confirmez-vous cela ?
19. Jusqu'à la fin des années 80 les gouttières étaient majoritairement en zinc, confirmez-vous cela ? Quelles proportions ?
20. Entre les années 80s et 2000, le marché des gouttières se centre principalement sur le zinc et le PVC suivi d'une utilisation limitée des autres matériaux (cuivre, acier inoxydable) représentant environ 5% ? Confirmez-vous cela ?
21. Depuis les années 2000, le marché des gouttières se centre sur trois matériaux : zinc, PVC et aluminium qui sont équiprobable et les autres matériaux (cuivre, acier inoxydable) représente environ 5% ? Confirmez-vous cela ?
Les autres matériaux (cuivre, acier inoxydable) représente environ 5% du marché des gouttières et le 95% restant se centre sur le zinc, le PVC et l'aluminium mais selon la réponse à la question 19 nous affirmons qu'ils ne sont pas utilisés dans la même proportion.
22. Aujourd'hui le choix des matériaux de gouttière s'oriente vers le moins cher ? Confirmez-vous cela ?
23. Dans un centre historique (avant les années 50) les gouttières, les descentes et le étaient construites en cuivre et zinc ? Confirmez-vous cela ?
24. Pour une maison construite avant les années 80 le renouvellement de la gouttière se fait en zinc et non du PVC ? Confirmez-vous cela ?
25. Pour une couverture en acier laqué, acier galvanisé, bardeaux et ardoise en fibre de verre, quelle est la répartition des matériaux de gouttière (zinc, cuivre, acier inoxydable, PVC, aluminium) ?
26. Pour les bâtiments industriels quelle est la répartition des matériaux de gouttière (zinc, cuivre, acier inoxydable, PVC, aluminium) ?

77

Annexe 9 : Analyse des entretiens pour l'élaboration des règles de passage de la famille des matériaux de rampant au matériau de rampant à l'échelle urbaine

➤ Famille des matériaux en ardoise

La famille des matériaux en ardoise comprend : l'ardoise naturelle, l'ardoise en fibres ciment et l'ardoise en amiante. Les acteurs interrogés pour cette famille de matériaux sont ETERNIT, M. Fernandes, des vendeurs de Point P, M. Boisseau et M. Bourgoïn.

| Catégorie 2 | Type IV |
|---|---------------|
| - ETERNIT - Bourgoïn (couvreur) - Fernandes (couvreur) - Point P | - M. Boisseau |

Le choix d'une variété d'ardoise par rapport à une autre se fait principalement en fonction de la zone géographique. D'après ETERNIT, les ardoises en fibres ciment sont apparues sur le marché de couverture à partir des années 1950. Après la 2^{ème} guerre mondiale on assiste à une utilisation importante de ces ardoises considérées comme matériau économique.

ETERNIT affirme qu'en Île-de-France, les ardoises en fibres ciments sont plus utilisées sur les constructions neuves que les ardoises naturelles. Cette information est contredite par les autres acteurs qui affirment que l'ardoise naturelle est plus utilisée que celle en fibres ciment. Ceci est confirmé par l'étude de marché de couverture en France dressée dans le [Chapitre 1.1](#). Ainsi, entre 2001 et 2011, la vente des matériaux en ardoises est répartie entre 71,75% d'ardoise naturelle contre 28,25% d'ardoise en fibres ciment. Pour le renouvellement de toiture en ardoise, on dispose uniquement des durées de vie des matériaux (cf. [Chapitre 1.1](#)), 100 ans pour l'ardoise naturelle et 50 ans pour l'ardoise en fibres ciment.

Les données quantitatives issues des entretiens sont résumées dans le tableau suivant :

| Expert | Précision | Ardoise naturelle | Ardoise en fibres ciment |
|--------------------------------------|---|-------------------|--------------------------|
| M. Bourgoïn | 10% des matériaux utilisés pour les toitures de la banlieue sont en ardoise | 100% | - |
| | 45% des brisis des toitures parisiennes sont en ardoise | 100% | - |
| Point P (Alfortville et Ivry) | 10% des matériaux utilisés en toitures de la banlieue | 80% | 20% |
| | 10% des toitures parisiennes sont en ardoise | 90% | 10% |
| M. Fernandes | en Île-de-France, la proportion de toitures en ardoises est de 30% | - | - |
| | 20% des toitures parisiennes sont en ardoise | - | - |
| MSI | En France (entre 2001-2011) | 71,75% | 28,25% |
| Histoire | Avant 1950 | 100% | 0 |

M. Bourgoïn : 100% ardoise naturelle en banlieue → non vrai → Rejet

MSI → Règle A

Point P (Alfortville et Ivry) : 90% ardoise naturelle contre 10% en fibre ciment en banlieue → Règle C

➤ Famille des matériaux en acier

La famille des matériaux en acier comprend : l'acier inoxydable, l'acier galvanisé et l'acier laqué. Les acteurs interrogés pour cette famille de matériaux sont M. Granec (ARCELORMITTAL), Syndicat de l'acier, Mme Alaux (BACACIER), Point P, M. Fernandes, M. Bourgoin, M. Normand et M. Boisseau.

| Catégorie 2 | Catégorie 3 | Type IV |
|--|--|-------------------------------|
| - Fernandes (couvreur) - M. Granec (ARCELORMITTAL) - Syndicat de l'acier | - Point P - Mme Alaux BACACIER - Bourgoin (couvreur) | - M. Normand - M. Boisseau |

Synthèse des données sur la répartition des matériaux en acier

| Expert | Précision | Acier galvanisé | Acier laqué | Inox |
|---------------------|--|--|---|------|
| Syndicat de l'acier | Répartition en ville | 80% | 15% | 5% |
| | Répartition pour les hangars agricoles | 100% | - | - |
| Arcelor | Répartition en zones agressives | 20% | 80% | - |
| M. Bourgoin | L'acier représente 5% des matériaux des toitures de la banlieue parisienne | 20% | - | 80% |
| M. Fernandes | 20% de tous les matériaux utilisés en banlieue | 90% | 10% | - |
| Point P | L'acier représente 5% des matériaux des toitures de la banlieue parisienne | 99% | 1% | |
| M. Boisseau | - | L'acier galvanisé est plus utilisé dans les régions montagneuses | L'acier laqué est le plus utilisé en couverture | - |
| MSI | Couverture en acier mais aussi les supports d'étanchéité en acier utilisés pour les toitures-terrasses | Acier représente 18% marché de couverture | | |

Tous les acteurs affirment que les matériaux en acier sont principalement utilisés pour les bâtiments avec de très grandes surfaces en particulier les bâtiments industriels et agricoles (ex: hangar). Pour les logements, on trouve rarement de l'acier. En effet, d'après M. Boisseau, l'acier inoxydable, a été utilisé dans une époque à la place du zinc. Son fabricant UGINOX a fait une tentative de pénétration dans le marché de la couverture en zinc avec son matériau en inox-plombé. Mais ce matériau a présenté des désavantages : il est plus bruyant que le zinc lorsque la pluie tombe sur le toit et cela constitue une gêne pour les habitants. C'est pour cela, que l'inox plombé a été écarté en couverture. Par contre, on peut trouver de l'acier galvanisé ou de l'acier laqué pour les bâtiments annexes d'une maison (ex : garage, un abri de jardin). L'acier laqué peut être aussi utilisé sur les façades.

Au niveau de la répartition des différents matériaux en acier, M. Boisseau, ayant une vision généraliste, affirme que l'acier laqué est le plus utilisé en couverture car la laque assure une protection plus durable contre la corrosion. L'acier galvanisé est plus utilisé dans les régions montagneuses alors qu'en Île-de-France, son utilisation est marginale. D'une manière générale l'acier galvanisé est de moins en moins utilisé car il vieillit rapidement (aspect rouille). Dans ces régions on utilise aussi de l'acier laqué même sur d'autres types de bâtiments qu'industriels.

D'après l'étude du marché de couverture (cf. Chapitre 1.1), la vente de l'acier représente 18% du marché français sur les 11 années d'étude (MSI, 2006 ; MSI, 2012). Néanmoins, cette valeur comporte la couverture en acier mais aussi les supports d'étanchéité en acier utilisés pour les toitures-terrasses qui ne sont pas en contact avec l'eau. Ainsi, la part de marché réelle des couvertures en acier est inconnue. Donc, ces valeurs sont écartées. De même, les données de M. Bourgoin sont écartées car du fait de son métier, le couvreur a surévalué l'acier inoxydable.

Arcelor et Boisseau

- Dans les zones agressives (montagne et littoral) l'acier est réparti entre 80% d'acier laqué contre 20% de l'acier galvanisé. → Règle C

Syndicat de l'acier et M. Fernandes (moyenne et ajustement à 5%)

- La famille des aciers est répartie entre 85% d'acier galvanisé, 10% de l'acier laqué et 5% de l'acier inoxydable. → Règle B

En effet, d'après M. Boisseau, l'acier inoxydable, a été utilisé à une époque à la place du zinc. Son fabricant UGINOX a fait une tentative de pénétration dans le marché de la couverture en zinc avec son matériau en inox-plombé. Mais ce matériau a présenté des désavantages : il est plus bruyant que le zinc lorsque la pluie tombe sur le toit et cela constitue une gêne pour les habitants. C'est pour cela, que l'inox plombé a été écarté en couverture. L'acier galvanisé est apparu en couverture depuis 1840 alors que l'acier laqué, apparu en 1940, est de plus en plus utilisé à partir de 1975 surtout dans les zones industrielles et d'activités. De plus, en regardant les données du Point P, l'acier galvanisé semble être un peu surestimé alors que l'acier inoxydable et l'acier laqué ont été sous-estimés. En effet, Point P n'a pas une vision complète du marché de l'acier du fait que la vente des couvertures en acier se fait le plus souvent en direct par les industriels, surtout sur les gros chantiers ; car cela leur permet d'assurer un suivi commercial et de fournir une assistance éventuelle. Le reste de la distribution de l'acier, soit en 30% est assuré par des distributeurs (ex : Point P) également appelés stockistes (MSI, 2006 ; MSI, 2012). Ainsi, en termes de patrimoine bâti, nous allons approximer la proportion de l'inox par la valeur 5% ; la proportion de l'acier laqué par la valeur 10% et la proportion de l'acier galvanisé par la valeur 85%.

➤ Les toitures-terrasses

Les étanchéités terrasses comportent : l'asphalte, les membranes bitumineuses (bitume oxydé et bitume modifié), les membranes synthétiques et les étanchéités liquides. Les acteurs interrogés sont : Point P (Ivry et Alfortville), M. Normand, M. Bourgoïn, M. Fernandes, les commerciaux de FIREST ONE BUILDING PRODUCTS et CULTISOL.

| Catégorie 2 | Catégorie 3 |
|--|---|
| - M. Fernandes - M. Bourgoïn - M. Normand - M. Normand (dans ce cas uniquement il a fourni des données quantifiées) | - Point P (Ivry et Alfortville) - FIREST ONE BUILDING PRODUCTS - CULTISOL |

D'après les experts, les membranes d'étanchéité bitumineuses sont en bitume oxydé. Depuis les années 1980 on ne trouve plus du bitume oxydé mais du bitume modifié.

D'après CULTISOL, la durée de vie de l'étanchéité du toit dépend du type de matériau utilisé pour l'étanchéité. La durée de vie d'une étanchéité d'une toiture-terrasse est en moyenne de 40 à 50 ans. Ceci est confirmé par le marché de couverture qui explique que les membranes bitumineuses ont une durabilité comprise entre 20 et 40 ans alors que les membranes synthétiques ont une espérance de vie souvent supérieure à 30 ans.

MSI :

En termes de répartition des matériaux d'étanchéité, entre 2001 et 2011 les membranes bitumineuses dominent le marché de l'étanchéité avec 73% de part de marché (répartie entre 80% de membranes bitumineuses SBS et 20% pour les membranes APP) contre 18% pour les membranes synthétiques, 7% pour l'asphalte et 2 pour les étanchéités liquides. → Règle de classe A.

D'après M. Normand, on peut répartir les toitures-terrasses en étanchéités bitumineuses en 90% de bitumes modifiés et 10% de bitumes oxydés. Cette information fournie par M. Normand est la seule disponible elle aboutira donc à une règle de Classe C.

Annexe 10 : Règles de corrélation entre le matériau du rampant et le matériau d'un élément de toit à l'échelle urbaine

➤ Les règles de corrélation entre les rampants non métalliques et les matériaux de gouttière

D'après Mme Texier, historiquement les éléments accessoires d'une toiture inclinée sont toujours en métal sauf pour les gouttières et les décentes où on assiste à l'apparition du PVC au début des années 1980. En effet, la découverte d'un nouveau matériau donne l'impression qu'on a trouvé le matériau miracle et donc on commence à l'utiliser partout jusqu'à se rendre compte qu'il est imparfait.

M. Boisseau affirme que pour les toitures non métalliques (ardoise et noue) les gouttières sont majoritairement métalliques, bien que le marché du PVC probablement grignote pour des raisons économiques le marché des gouttières. Ainsi, pour les toitures en tuile ou en ardoise : on trouve comme gouttière majoritairement du zinc, du PVC puis du cuivre.

En revanche, M. Perez et VMZINC affirment que la répartition des matériaux de gouttière est équiprobable entre le zinc, le PVC et l'aluminium laqué. C'est informations sont des données du marché actuel à partir de 2000 (date du développement de la technique de pause de l'aluminium laqué).

➤ Les règles de corrélation entre les rampants en ardoises naturelles et les matériaux de gouttière (RCGA)

D'après M. Boisseau, pour une toiture en ardoise naturelle, le matériau de gouttière est remplacé par le même matériau. En effet, l'ardoise reste un matériau noble et prestigieux pour lequel les accessoires de la toiture seront aussi en matériaux prestigieux comme le zinc et le cuivre.

| Catégorie 2 | Catégorie 3 | Type IV |
|-------------------------|-------------|---------------|
| VMZINC (commerciale) | GENECOS | - M. Boisseau |

| Expert | Précision | Zinc naturel | Zinc gris foncé |
|-----------------------------------|---|--------------|-----------------|
| M. Le Breton (GENECOS) | Les toitures construites à partir de 1980 | 90% | 10% |
| Commercial de VMZINC | Les toitures construites entre 1980 et 2000 | 80% | 20% |

En faisant l'opération de moyenne entre les valeurs des deux experts nous obtenons la règle suivante : à partir des années 1980, pour les toitures en ardoise les matériaux de gouttières en zinc sont répartis entre 85% du zinc naturel et 15% de zinc prépatiné en gris foncé. Malgré que cette règle est issus deux experts mais nous la classons comme B, puisque VMZINC est un leader du marché du zinc donc il a un très bon recul sur ce domaine.

➤ Les règles de corrélation entre les matériaux économiques de rampant et les matériaux de gouttière (RCGME)

D'après les experts, pour une couverture économique (bardeaux bitumineux, ardoises en fibres ciment, acier laqué, acier galvanisé, plaque en plastique, plaque en fibres ciments et plaque bitumineuses) les gouttières sont majoritairement en PVC car c'est plus pratique, facile à réparer et moins cher. Ceci est vrai pour les bâtiments construits à partir des années 1980.

D'après M. Perez, les matériaux gouttières d'une couverture économique (acier laqué, acier galvanisé, bardeaux bitumineux et ardoise fibrociment) sont répartis entre 80% en PVC et 20% en matériaux autres. Cette information est valide pour des toitures construites après 1980 date à laquelle le PVC est apparu en gouttières. Cette répartition est fournie uniquement par M. Perez. Elle sera ainsi classée A car elle est fournie par un expert qui travaille chez le leader du PVC.

D'après l'expert de HOLZPLAST, les proportions des différents matériaux de gouttières utilisées sur les toitures en bardeaux sont 70% du temps en zinc et 30% du temps en PVC. Comme pour la règle dernière, cette distribution est considérée comme une règle de classe C.

| Catégorie 1 | Catégorie 3 |
|---------------------|-------------|
| - M. Perez (Nicoll) | - HOLZPLAST |

| Expert | Précision | PVC | Autres | Zinc |
|-----------|---|-----|--------|------|
| M. Perez | Les toitures construites à partir de 1980 | 80% | 20% | - |
| HOLZPLAST | Les toitures en bardeaux construites à partir de 1980 | 30% | - | 70% |

➤ **Les règles de corrélation entre les matériaux métalliques nobles de rampant et les matériaux de gouttières (RCGMN)**

Tous les acteurs ont affirmé que pour une couverture en matériau métallique noble, la gouttière sera du même matériau que le rampant. En effet, la couverture étant un domaine traditionnel, le couvreur a pour objectif d'uniformiser l'aspect total du bâtiment (rampant, accessoires et matériaux de façade) d'une part pour avoir un aspect esthétique et d'autre part pour faciliter le travail des couvreurs. En particulier, dans le cas du zinc l'utilisation du cuivre est incompatible (effet « pile »). En effet, les problèmes de corrosion qui existent sont principalement entre le cuivre et le zinc ou entre l'acier galvanisé (revêtu du zinc) et le cuivre.

➤ **Matériau de noue : Règles d'identification et de quantification à l'échelle urbaine**

Pour les noues à partir, des entretiens effectués avec Bissery (VMZINC), Mme Texier, M. Boisseau et M. Normand nous avons formulé les différentes règles suivantes :

- Pour une couverture métallique la noue et tous les accessoires de la toiture sont du même matériau que la couverture.
- Jusqu'à 1900 les noues des toitures non métalliques étaient en Plomb.
- Avant les années 1980, pour les toitures en ardoise, les matériaux de noues sont à 100% en zinc naturel.
- A partir des années 1980, pour les toitures en ardoise, les matériaux de noues sont répartis entre 90% du zinc naturel et 10% de zinc gris foncé (anthra-zinc).
- Pour les tuiles les noues sont à 100% en zinc naturel.

Lors de l'enquête, ces règles ont été exposées aux industriels qui les ont confirmées et validées. Ainsi, toutes ces règles sont classées A.

Pour les bardeaux bitumineux les noues sont en bardeaux. Cette information décrite dans les DTU, a été confirmé par les industriels des bardeaux (FIRESTONE, CULTISOL, HOLZPLAST, BTM et IKO).

➤ **Matériau de noue : Règles d'identification et de quantification à l'échelle urbaine**

Pour les noues à partir, des entretiens effectués avec Bissery (VMZINC), Mme Texier, M. Boisseau et M. Normand

| Catégorie 1 | Type IV |
|------------------|---|
| Bissery (VMZINC) | - M. Normand - M. Boisseau - Mme Texier |

➤ **Matériau des éléments d'étanchéité : Règles d'identification et de quantification à l'échelle urbaine**

Pour les couvertures non métalliques, les informations sur la répartition entre les matériaux d'étanchéité sont limitées. En effet, seulement Erlus affirme que les matériaux utilisés pour l'étanchéité des fenêtres, cheminées et autres petits éléments du toit seront en zinc et en plomb, la

réparation de ces deux matériaux sera respectivement de 60% et de 40%. Seulement BTM affirme que les matériaux utilisés pour l'étanchéité des toitures en bardeaux sont des bardeaux bitumineux également, de temps en temps on utilise du mastic pour combler certains petit trous. Enfin, pour les toitures-terrasses, les éléments d'étanchéités (de la cheminée...) sont du même matériau que l'étanchéité de la toiture d'après Cultisol.

| Catégorie 2 | Catégorie 3 |
|-------------|-----------------|
| Erlus | Cultisol BTM |

| Expert | Précision | Zinc | Plomb | Bardeaux |
|--------------|--------------------------|------|-------|----------|
| Erlus | Toitures non métalliques | 60% | 40% | - |
| BTM | Toitures en bardeaux | 30% | - | 70% |

Annexe 11 : Déroulement d'un projet de construction et acteurs

| Etapes du projet | Acteurs | Rôle |
|------------------------------|--|--|
| Maîtrise d'ouvrage | Particulier Collectivité locale Etat | A des idées et un financement pour construire |
| Maîtrise d'œuvre | Architecte | Concrétise les souhaits du maître d'ouvrage et établit un Avant-Projet. Il est choisi directement par le Maître d'Ouvrage pour les petits marchés ou sur concours pour les gros marchés. |
| Permis de Construire | Maître d'œuvre et Maître d'ouvrage | Etablissent la demande d'obtention du permis de construire auprès de la mairie ou de la DDE. Cette demande doit être conforme au P.O.S. (plan d'occupation des sols), aux plans d'urbanisme, éventuellement aux directives des monuments historiques. (On fait une demande de Certificat d'Urbanisme) |
| Appel d'offre | Les entreprises exécutantes sont choisies directement par le maître d'ouvrage pour de petits marchés ou après mise en concurrence avec d'autres pour les gros marchés. Dans ce dernier cas, celles qui sont intéressées reçoivent un exemplaire du dossier d'architecte pour réaliser l'Avant-Projet Sommaire. | |
| Avant-Projet Sommaire | Entreprises soumissionnaires | Donne le quantitatif et le prix estimatif du projet. |
| Remise de soumission | La ou les entreprise(s) retenue(s) | Etablissent le Projet Détaillé ou Projet d'Exécution comprenant : - Les calculs - Les plans d'exécution - Les plannings - La recherche des sous-traitants Puis début des travaux. |
| Contrôles des travaux | Maître d'œuvre Entreprises Assurances | Contrôle de l'évolution et de la conformité au projet. Chacun fait ses contrôles séparés |
| Réception des travaux | Maître d'œuvre Entreprises | On s'assure que l'ouvrage est bien conforme au cahier des charges et donc à ce que le client a commandé |

Annexe 12 : Les personnes interrogées dans le cadre de l'enquête par entretien

Les maîtres d'œuvre

- M. Bouchez, architecte chez Bouchez Architecture Le 1er mars 2012, 66 rue Boulanger, Paris 10e
- M. Hesters, architecte chez Hesters & Oyon Architecture : Le 2 mars 2012, 24/32 rue des Amandiers, Paris 20e
- M. Butler, architecte chez Rémy Butler & Associés : Le 8 mars 2012, 33 rue Faidherbe, Montreuil
- M. Laisné, architecte chez E.A.U. Architecture : Le 13 mars 2012, parcours urbain à Créteil
- M. Lorch, architecte chez Agence Nicolas Michelin & Associés Le 16 mars 2012, 11 rue des Petites Ecuries, Paris 10e
- M. Menninger, architecte : Le 20 mars 2012, 15 rue Guyton de Morveau, Paris 13e
- MM. Bretagnolle et Korkmaz, architectes chez Architecture Studio
Le 22 mars 2012, 10 rue Lacuée, Paris 12e
- MM. Mansion et Devaux, architectes chez Chabanne Architecture
Le 23 mars 2012, 6 cité de l'Ameublement, Paris 11e
- M. Chapon, architecte chez Parc Architecture
Le 27 mars 2012, 17 rue Ramponeau, Paris 20e
- M. Lamy, architecte chez Interfaces Architecture
Le 2 avril 2012, 9 rue de Louvain, Courbevoie
- M. Rémon, architecte chez Rémon Architecture
Le 5 avril 2012, 6 cité de l'Ameublement, Paris 11e

Les maîtres d'ouvrage

- M. Dufeu, Vice-président de l'UPEC aux constructions et relations immobilières, Vice-président du Comité d'Agglomération Plaine Centrale chargé des affaires culturelles, des relations avec l'université et la recherche Le 13 mars 2012, Université Paris XII, Créteil
- Mme Germain, architecte-urbaniste en charge du développement et de l'aménagement à Créteil, SEMIC Créteil-Habitat Le 26 mars 2012, 7 rue des Ecoles, Créteil

Annexe 13 : Les rénovations de toitures à Créteil

Sources : archives municipales

Les informations qui suivent concernent le parc immobilier construit pendant le Nouveau Créteil, la période des grands ensembles. Dans les années 1980-1990, ces immeubles, construits à la hâte, ont besoin d'être réhabilités. Il s'agit presque entièrement de toitures-terrasses (sauf la ZAC du Halage). Les items en bleu sont des quartiers pour lesquels l'information concernant spécifiquement les toitures était absente des archives, mais dans le cadre de rénovation générale, on peut supposer qu'il y a eu une réfection des toitures.

1- Dans les années 1980

- la Croix des Mèches : 1988

L'isolation des toitures est renforcée avec la pose d'un matériau thermique.

- ZAC du Halage : 1981

Réfection des toitures.

- Le Montaigut : 1988

Réhabilitation générale, dont celle des toitures.

2- Dans les années 1990

- La Habette : 1992

Grand projet de rénovation : isolation et étanchéité refaites.

- Les Sablières : 1990

Réhabilitation générale dans le cadre du développement social et urbain du quartier.

- Mont-Mesly : 1984-1991

Rénovation du quartier.

- Le Palais : 1997

Réfection des toitures.

- Côte-d'Or : 1998

Réhabilitations.

- Les Bleuets :

1998 : nouveaux logements avec des toitures métalliques

2008 : grand projet de rénovation urbaine (réfection de l'isolation et de l'étanchéité des toitures)

Annexe 14 : Méthode de Monte Carlo

(Hannouche, 2012)

La simulation de Monte Carlo est un outil statistique puissant pour résoudre des problèmes mathématiques complexes ou plus exactement pour approcher leur solution aussi précisément que souhaité, Cette méthode est utilisée pour estimer les incertitudes de mesure Y (grandeur de sortie) à partir des incertitudes des grandeurs d'entrée $X_{i \ (i \in \{1, \dots, n\})}$, La grandeur d'entrée Y

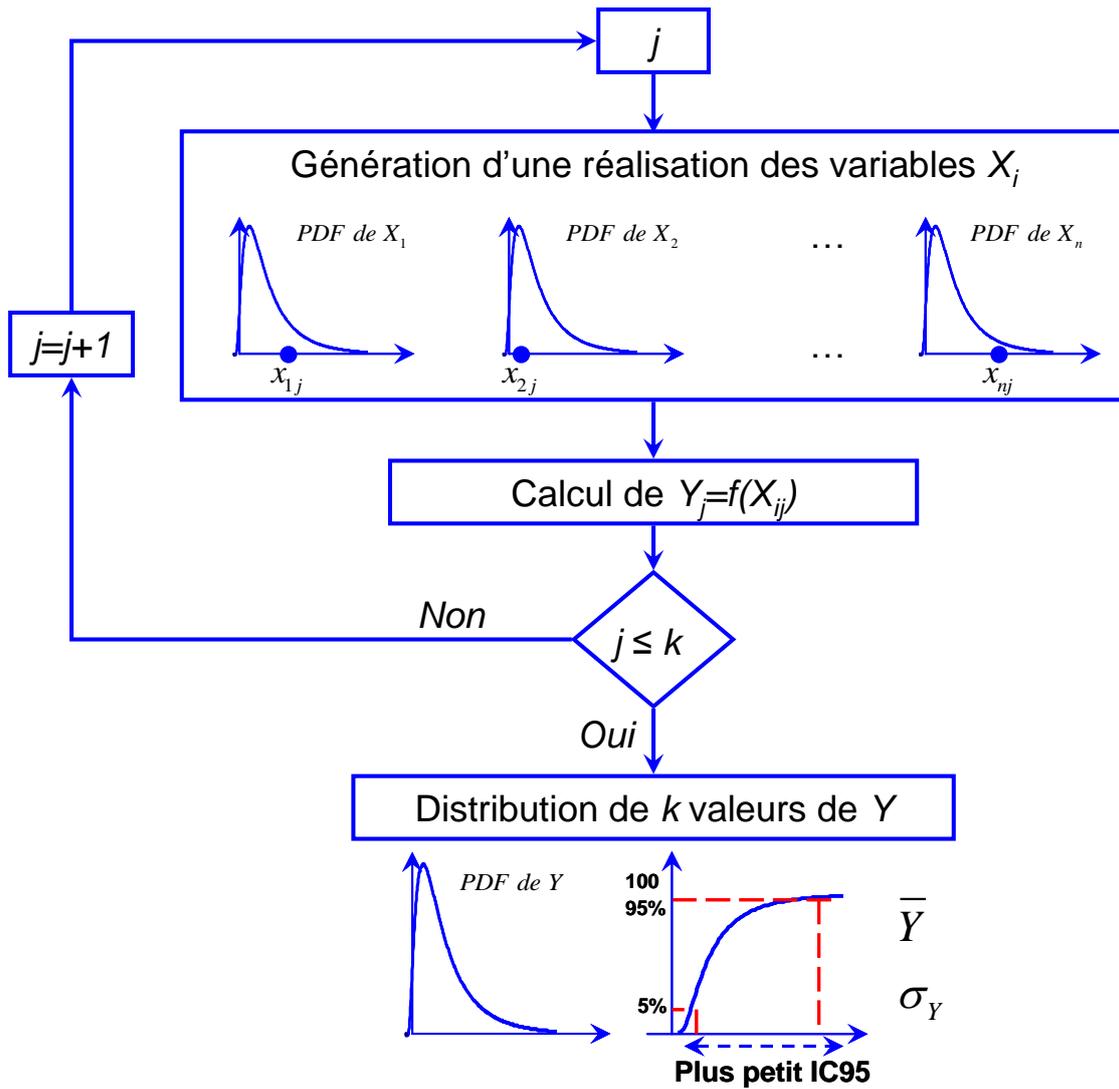
pourrait être une fonction explicite ou implicite en $X_{i \ (i \in \{1, \dots, n\})}$ ($Y = f(X_{i \ (i \in \{1, \dots, n\})})$),

La procédure de l'évaluation de l'incertitude de mesure par la méthode de simulation Monte Carlo, illustrée *Erreur ! Source du renvoi introuvable.*, peut être effectuée par l'intermédiaire des étapes suivantes :

- ❖ Création de l'équation du modèle pour le mesurande en fonction des paramètres individuels

$$Y = f(X_{i \ (i \in \{1, \dots, n\})});$$

- ❖ Choix des sources d'incertitude;
- ❖ Identification de la fonction de densité de probabilité PDF correspondant à chaque source d'incertitude ;
- ❖ Choix du nombre k d'essais de Monte-Carlo (en général, $k = 10000$ de valeurs pour espérer avoir le plus petit niveau de confiance de 95% (ISO/IEC, 2008)) ;
- ❖ Simulation de k échantillons de chaque source d'incertitude X_i , considérée comme une variable aléatoire avec une fonction de densité de probabilité PDF ;
- ❖ Calcul des k résultats en appliquant l'équation qui a été défini pour le mesurande Y ;
- ❖ Synthèse de l'information obtenue sur le mesurande en restituant :
 - i. L'espérance mathématique (Moyenne) ;
 - ii. L'écart-type (non demandé par la norme) ;
 - iii. L'intervalle le plus court au niveau de probabilité spécifié (souvent 95%),



Procédure de simulations de Monte Carlo

Références

ISO/IEC (2008) ISO/IEC Guide 98-3/Suppl,1:2008(E) Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method, Geneva (Switzerland): ISO, 2008, 98 p.

Annexe 15 : Les résultats de calcul de la répartition des familles des matériaux de rampant ainsi que les longueurs de gouttières et de noues pour la ville de Créteil

Tableau : Surface de rampant, longueur de gouttière et longueur de noue pour chaque famille de matériaux pour les entités : Equipement administration, Equipement d'enseignement et équipement de santé de la « zone historique 1 » (1900-1950)

| Famille de matériau | Surface de rampant $S_i \pm CI (m^2)$ $(p_{i,e} \pm CI (\%))$ | | | Longueur de gouttière $l_{g,i} \pm CI (m^2)$ $(R_{g,i,e} \pm CI (\%))$ | | | Longueur de noue $l_{n,i} \pm CI (m^2)$ $(R_{n,i,e} \pm CI (\%))$ | | |
|----------------------|---|---------------------------|-----------------------------|--|----------------------|----------------------|---|----------------------|-----------------------|
| | Administratif | Enseignement | Santé | Administratif | Enseignement | Santé | Administratif | Enseignement | Santé |
| Tuile | 7813±2424 (16,0 ± 5,0) | 16112±3052 (38,6±7,3) | 5100± 628 (19,65±2,42) | 10445±258 (23,1±6) | 3620±395 (65,5±7) | 970 ± 48 (65,1±3) | 162,6±0,0 (100±0) | 329.7±0.0 (100±0) | 163 ± 8 (91,1±4,3) |
| Acier laqué | 10334±2701 (21,1± 5,5) | 4523±1949 (10,8±4,7) | 851 ± 280 (3,28±1,08) | - | 827±296 (15,0±5) | 64 ±20 (4,3±1) | - | - | - |
| Acier galvanisé | 14919±3046 (30,5± 6,2) | 344±4.7 (0,8±1,4) | - | 2993±290 (66,1±6) | 49±78 (0,9±1) | - | - | - | - |
| Terrasse en bitume | 3132±1620 (6,4 ± 3,3) | 10323.3±567 (24,7±6,5) | 6151 ± 672 (23,70±2,59) | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse en gravier | 10123±2681 (20,7 ± 5,5) | 5051±2045 (12,1±4,9) | 11176 ± 781 (43,06±3,01) | - | - | - | - | - | - |
| Zinc | 426±615 (0,9±1,3) | 1286±1083 (3,1±2,6) | 2299 ± 449 (8,86±1,73) | 33±52 (0,7±1) | 312±192 (5,6±3) | 215 ± 35 (14,4±2) | - | - | 16 ± 4 (8,9±1,9) |
| Ardoise | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Aluminium | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Autre | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Bardeaux | 1601±1177 (3,3±2,4) | 3089±1642 (7,4±3,9) | 376 ±189 (1,45±0,73) | 388±171 (8,6±4) | 720±280 (13,0±5) | 242 ±37 (16,2±2) | - | - | - |
| Plaque éclairage | 546±695 (1,1±1,4) | 995±956 (2,4±2,3) | - | 72±76 (1,6±2) | - | - | - | - | - |
| Terrasse étanchéité | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse végétalisée | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Inox | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Surface de rampant, longueur de gouttière et longueur de noue pour chaque famille de matériaux pour les entités : Surface commerciale, Transport, Sport et Bureau de la zone historique 2 (1950-1980)

| Famille de matériau | Surface de rampant $S_i \pm CI (m^2)$ ($p_{i,e} \pm CI (%)$) | | | | Longueur de gouttière $l_{g,i} \pm CI (m^2)$ ($R_{g,i,e} \pm CI (%)$) | | | | Longueur de noue $l_{n,i} \pm CI (m^2)$ ($R_{n,i,e} \pm CI (%)$) | | | |
|----------------------|--|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---|------------------------|----------------------|----------------------|--|----------|--------------|---------------|
| | Collectif | Activité | Enseignement | Administratif | Collectif | Activité | Enseignement | Administratif | Collectif | Activité | Enseignement | Administratif |
| Tuile | - | 0±0,0 (0,0±0,0) | 696±2036 (0,5±1,6) | - | - | - | 207±193 (5,1±5) | - | - | - | - | - |
| Acier laqué | 988±4166 (0,3±1,4) | 14887±1740 (4,2±4,9) | 2952±4155 (2,3±3,3) | 2263±3727 (1,8±3,0) | 188±64 (34,2±12) | 484±360,68 (9,7±7) | 105±140 (2,6±3) | 128±80 (11,5±7) | - | - | - | - |
| Acier galvanisé | - | 122965±41427,3 (34,5±11,6) | - | - | - | 4302±414,6 (86,6±8) | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse en bitume | 16867±16751 (5,7±5,6) | 198179±43278 (55,7±12,2) | 7626,8±6552,8 (6,0±5,1) | 58146±13830 (47,4±11,3) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse en gravier | 277282±18403 (93,1±6,2) | 8170±13046,9 (2,3±3,7) | 79295,4±13418,4 (62,1±10,5) | 41076±13071 (33,5±10,7) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Zinc | 1576±5258 (0,5±1,8) | - | 32308,9±12021,6 (25,3±9,4) | - | 362±64 (65,8±12) | - | 3732±234 (92,3±6) | - | - | - | - | - |
| Ardoise | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Aluminium | - | - | - | 5977±5963 (4,9±4,9) | - | - | - | 219±100 (19,6±9) | - | - | - | - |
| Autre | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Bardeaux | - | 687±3824 (0,2±1,1) | - | 348±1474 (0,3±1,2) | - | 183±229,29 (3,7±5) | - | 69±61 (6,2±5) | - | - | - | - |
| Plaque éclairage | - | 610±3604,2 (0,2±1,0) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse étanchéité | 1204±4599 (0,4±1,5) | 10437±14698 (2,9±4,1) | 4860±5290,9 (3,8±4,1) | 1276±2809 (1,0±2,3) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse végétalisée | - | - | - | 7394±6591 (6,0±5,4) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Inox | - | - | - | 6220±6076 (5,1±5,0) | - | - | - | 702±122 (62,8±11) | - | - | - | - |

Surface de rampant, longueur de gouttière et longueur de noue pour chaque famille de matériaux pour les entités : Surface commerciale, Transport, Sport et Bureau de la zone historique 2 (1950-1980)

| Famille de matériau | Surface de rampant $S_i \pm CI (m^2)$ $(p_{i,e} \pm CI (\%))$ | | | | Longueur de gouttière $l_{g,i} \pm CI (m^2)$ $(R_{g,i,e} \pm CI (\%))$ | | | | Longueur de noue $l_{n,i} \pm CI (m^2)$ $(R_{n,i,e} \pm CI (\%))$ | | | |
|----------------------|---|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|--|----------------------|------------------------|--------------------|---|-----------|------------------------|--------|
| | Surface Commerciale | Transport | Santé | Bureau | Surface Commerciale | Transport | Santé | Bureau | Surface Commerciale | Transport | Santé | Bureau |
| Tuile | - | - | 14763±4416 (14,3±4,3) | | - | - | 2846±114 (90,3±4) | | - | - | 140±0,0 (100,0±0,0) | - |
| Acier laqué | 5538±1087 (0,5±0,9) | 465±0,0 (0,5±0,0) | - | 1013±3740 (0,5±1,7) | 1384±244 (37,0±7) | 156±0,00 (59,8±0) | - | 346±0 (100,0±0) | - | - | - | - |
| Acier galvanisé | 9938±1454 (0,8±1,2) | 110±0,0 (0,1±0,0) | 1747±1628 (1,7±1,6) | - | - | 43±0,00 (16,5±0) | 305,0±114,1 (9,7±4) | - | - | - | - | - |
| Terrasse en bitume | 509582±7879 (43,2±6,7) | 82926±0,0 (97,4±0,0) | 9471± 3642 (9,2±3,5) | 11889±12484 (5,5±5,8) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse en gravier | 575187±7950 (48,8±6,7) | 1489±0,0 (1,7±0,0) | 76922±5473 (74,8±5,3) | 144960±25576 (67,5±11,9) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Zinc | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Ardoise | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Aluminium | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Autre | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Bardeaux | 14762±1769 (1,3±1,5) | 162±0,0 (0,2±0,0) | - | | 2358±244 (63,0±7) | 62±0,00 (23,8±0) | - | - | - | - | - | - |
| Plaque éclairage | - | - | - | | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse étanchéité | 5207±1055 (0,4±0,9) | | - | 36809±20574 (17,1±9,6) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse végétalisée | 58747±3461 (5,0±2,9) | | - | 20140±15915 (9,4±7,4) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Inox | - | - | - | | - | - | - | - | - | - | - | - |

Surface de rampant, longueur de gouttière et longueur de noue pour chaque famille de matériaux pour les entités : Habitats collectif, activité et équipement d'enseignement de la zone historique 3 (1980-2008)

| Famille de matériau | Surface de rampant $S_i \pm CI$ (m ²) ($p_{i,e} \pm CI$ (%)) | | | Longueur de gouttière $l_{g,i} \pm CI$ (m ²) ($R_{g,i,e} \pm CI$ (%)) | | | Longueur de noue $l_{n,i} \pm CI$ (m ²) ($R_{n,i,e} \pm CI$ (%)) | | |
|----------------------|---|----------------------------|----------------------------|--|---------------------|------------------------|---|----------|--------------|
| | Collectif | Activité | Enseignement | Collectif | Activité | Enseignement | Collectif | Activité | Enseignement |
| Tuile | 55967±1464 (39,59±10,36) | 1584±3320 (1,1±2,4) | 976±430 (2,42±1,06) | 9421±1204 (73,30±9,37) | 272±72 (42,3±11) | 116±21 (13,26±2,35) | 36 (100) | - | - |
| Acier laqué | 1758±3317 (1,24±2,35) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Acier galvanisé | - | 466±1808 (0,3±1,3) | 5646±971 (14±2,40) | - | 121±57 (18,8±9) | 587±29 (66,91±3,26) | - | - | - |
| Terrasse en bitume | 2549±3983 (1,80±2,82) | 99633±14065 (71,8±10,1) | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse en gravier | 60548±14813 (42,83±10,48) | 4546±5563 (3,3±4,0) | 27271±1311 (67,54±3,25) | - | - | - | - | - | - |
| Zinc | 1757±3317 (1,24±2,35) | - | 1681±559 (4,16±1,38) | 307±415 (2,39±3,23) | - | 174±24 (19,83±2,76) | - | - | - |
| Ardoise | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Aluminium | 18783±10161 (13,29±7,19) | - | - | 3125±1167 (24,31±9,08) | - | - | - | - | - |
| Bardeaux | - | 2124±3837 (1,5±2,8) | - | - | 250±71 (38,9±11) | - | - | - | - |
| Plaque éclairage | - | 2318±4005 (1,7±2,9) | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse étanchéité | - | 28119±12562 (20,3±9,1) | 902±414 (2,23±1,02) | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse végétalisée | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Inox | - | - | 3902±827 (9,66±2,05) | - | - | - | - | - | - |

Surface de rampant, longueur de gouttière et longueur de noue pour chaque famille de matériaux pour les entités : Surface commerciale, Transport, Sport et Bureau de la zone historique 3 (1980-2008)

| Famille de matériau | Surface de rampant $S_i \pm CI$ (m ²) ($p_{i,e} \pm CI$ (%)) | | | | Longueur de gouttière $l_{g,i} \pm CI$ (m ²) ($R_{g,i,e} \pm CI$ (%)) | | | | Longueur de noue $l_{n,i} \pm CI$ (m ²) ($R_{n,i,e} \pm CI$ (%)) | | | |
|----------------------|---|------------------|--------------------|---------------------------|--|----------------|----------------|--------------------------|---|-------------|-------|------------------------|
| | Surface Commerciale | Transport | Sport | Bureau | Surface Commerciale | Transport | Sport | Bureau | Surface Commerciale | Transport | Sport | Bureau |
| Tuile | - | - | - | 29170±1856 (62,26±4) | - | - | - | 5083±130 (91,13±2,32) | - | - | - | 837±15 (95,26±1,74) |
| Acier laqué | 1946 (6,37) | 2329 (7,96) | 9874,13 (45,09) | - | 350 (55,58) | 220 (29,40) | 374 (31,37) | - | - | - | - | - |
| Acier galvanisé | 2937,55 (9,61) | 538 (1,84) | 633,21 (2,89) | - | 228 (36,17) | 72 (9,62) | 166 (13,95) | - | - | - | - | - |
| Terrasse en bitume | 22956,63 (75,14) | 21110 (72,17) | 6552,94 (29,92) | 2413±846 (5,15±1,81) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse en gravier | 649,06± (2,12±0,00) | 1223 (4,18) | 1314,29 (6,00) | 6007±1280 (12,82±2,73) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Zinc | 173,01±0,00 (0,57±0,00) | - | 1469 (6,71) | 233±766 (0,50±0,57) | 52 (8,25) | - | 347 (29,13) | 82±55 (1,48±0,99) | - | - | - | 42±15 (4,74±1,74) |
| Ardoise | - | - | - | 1955±766 (4,17±1,63) | - | - | - | 412±119 (7,4±2,14) | - | - | - | - |
| Aluminium | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Autre | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Bardeaux | - | 3461 (11,83) | 1807 (8,25) | - | - | 456 (61) | 305 (25,56) | - | - | 21 (100) | - | - |
| Plaque éclairément | 323 (1,06) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse étanchéité | 1568 (5,13) | 590 (2,02) | 248 (1,13) | 7072±1371 (15,09±2,93) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Terrasse végétalisée | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Inox | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Annexe 16: Les différentes Familles de matériaux et matériaux repérés dans chaque entité

| Entité | | Famille de matériau / Matériau | | | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------------------|--------------------------------|---------|------|-----------|----------|-------------|-----------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-------|
| Zone historique | Classe de bâtiments | Tuile | Ardoise | Zinc | Aluminium | Bardeaux | Acier laqué | Acier Galvanisé | Terrasse en bitume | Terrasse en gravier | Plaque d'éclairiment | Terrasse étanchéité | Terrasse végétalisée | Autre |
| 1 (1900-1950) | Habitats individuels | + | + | + | - | + | + | + | + | + | - | - | - | - |
| | Habitats collectifs | + | + | + | - | + | | - | + | + | - | - | - | - |
| | Equipements administratifs | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - |
| | Equipements d'enseignement | + | - | + | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - |
| | Activité | + | + | + | - | + | + | - | - | + | - | - | - | - |
| | Equipements de santé | + | - | + | - | + | + | - | + | + | - | - | - | - |
| 2 (1951-1980) | Activité | - | - | - | - | - | + | + | + | + | - | - | - | - |
| | Habitats collectifs | - | - | - | - | - | + | - | + | + | - | + | - | - |
| | Bureaux | - | - | - | - | - | + | - | + | + | - | + | + | - |
| | Equipements d'enseignement | + | - | + | - | - | + | - | + | + | | + | - | - |
| | Equipements administratifs | - | - | - | + | + | + | + | + | + | - | + | + | Inox |
| | Surfaces commerciales | - | - | - | - | + | + | + | + | + | - | - | + | - |
| | Equipements de santé | + | - | - | - | - | - | + | + | + | - | - | - | - |
| Transport | - | - | - | - | + | + | + | + | + | - | - | - | - | |
| 3 (1981-2008) | Habitats collectifs | + | - | + | + | - | + | - | + | + | - | - | - | - |
| | Activité | + | - | - | - | + | - | + | + | + | + | + | - | - |
| | Bureaux | + | + | + | - | - | - | - | + | + | - | + | | - |
| | Equipements d'enseignement | + | - | + | - | - | - | + | - | + | - | + | - | Inox |
| | Surfaces commerciales | - | - | + | - | - | + | + | + | - | + | + | - | - |
| | Transport | - | - | - | - | + | + | + | + | + | - | + | - | - |
| | Sport | - | - | + | - | + | + | + | + | + | + | + | - | - |

Annexe 17: Communications et articles

Article dans une revue avec comité de lecture

Sellami-Kaaniche, E., de Gouvello, B., Gromaire, M.C., and Chebbo, G. (2014). A new method for modelling roofing materials emissions on the city scale: Application for zinc in the City of Créteil (France). *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21 (8), pp. 5284-5296.

Communications avec acte

Sellami-Kaaniche, E., de Gouvello, B., Gromaire, M.C., and Chebbo, G. (2013). Evaluation of roofing materials emissions at the city scale: Statistical approach for computing roofing area distribution. *NOVATECH*, Jun 2013, Lyon, France. 8^{ème} Conférence Internationale, Stratégies et solutions pour une gestion durable de l'eau dans la ville.

Sellami-Kaaniche, E., de Gouvello, B., Gromaire, M.C., and Chebbo, G. (2013). Evaluation of gutter and valley materials emissions at the city scale: Statistical approach for computing gutter and valley lengths *20th European Junior Scientist Workshop on Sewer Processes and Networks*, Apr 2013, Graz, Austria.

Sellami-Kaaniche, E., De Gouvello, B., Gromaire, M.C., and Chebbo, G. (2012). Règles de choix des matériaux de couverture dans une ville, Cas de la ville de Créteil. 5^{ème} *Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine*, Oct 2012, Strasbourg, France.

Sellami-Kaaniche, E., De Gouvello, B., Le Bris, A., Gromaire, M.C., and Chebbo, G. (2012). Modelling the Zn emissions from roofing materials at Créteil city scale - Defining a methodology. *12th edition of the World Wide Workshop for Young Environmental Scientists (WWW-YES-2012) - Urban waters: resource or risks?* May 2012, Arcueil, France. Proceedings.

**A new method for modelling roofing materials emissions
on the city scale: Application for zinc in the city of Créteil
(France)**

Emna Sellami-Kaaniche^{1,2}, Bernard de Gouvello^{1,2}, Marie-Christine Gromaire² and Ghassan Chebbo²

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 11 rue Henri Picherit, BP 82341 44323 Nantes Cedex, France; e-mail: sellamie@leesu.enpc.fr

² Université Paris-Est, LEESU (UMR MA 102), UPEC, UPEMLV, ENPC, AGROPARISTECH, F77455 ou F94010, 6-8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes - Champs sur Marne, MARNE LA VALLEE CEDEX 2, France

Abstract

Today, urban runoff is considered as an important source of environmental pollution. Roofing materials, in particular the metallic ones, are considered as a major source of urban runoff metal contaminations. In the context of the European Water Directive (2000/60 CE), an accurate evaluation of contaminant flows from roofs is thus required on the city scale, and therefore the development of assessment tools is needed. However, on this scale, there is an important diversity of roofing materials. In addition, given the size of a city, a complete census of the materials of the different roofing elements represents a difficult task. Informations relating roofing materials and their surfaces on an urban district do not currently exist in urban databases. The objective of this paper is to develop a new method of evaluating annual contaminant flow emissions from the different roofing material elements (ex: gutter, rooftop) on the city scale. This method is based on using and adapting existing urban databases combined with a statistical approach. Different rules for identifying the materials of the different roofing elements on the city scale have been defined. The methodology is explained through its application to the evaluation of zinc emissions on the scale of the city of Créteil.

Key words: City scale, modelling, emissions, roofing material, zinc, contaminant

1. Introduction

In the city, pollutants released into the runoff by urban infrastructure, are considered as a major source of receiving water contaminations (Ellis and Hvitved Jacobsen, 1996; Saget *et al.*, 1995). Many studies developed since 1990 have highlighted the pollution from roofing materials in urban runoff (Bertling *et al.*, 2006; Förster, 1996; Gromaire-Mertz *et al.*, 1999; Odnevall Wallinder *et al.*, 1998; Quek and Förster, 1993). In this context, the OPUR (Observatory of Urban Pollutants in Ile-de-France) program focused on identifying and quantifying the emissions of different pollutants (Zn, Pb, biocides...) from roofing materials runoff on the test-bed, roof and small urban catchment scales (Gromaire *et al.*, 2011; Gromaire-Mertz *et al.*, 1999; Robert-Sainte *et al.*, 2009; Van de Voorde, 2012). In these studies, the evaluation of pollutant emissions was limited to small scaled catchments. However, the city scale is characterized by big diversity and large number of buildings with different roofing materials. This diversity depends extremely on the history of the building (age, renewal), the urban planning (land use, building typology...), the social characteristics, the town regulation framework... To date, no study has been conducted to evaluate the roofing material emissions in urban runoff on the city scale. Today, in the context of the European Water Directive (2000/60 CE), which aims at achieving a good environmental status of aquatic environments until 2015, it is important to evaluate roofing material pollutant flows on the city scale. For this task, a specific model is needed.

Existing roofing material emission models were elaborated on the scale of test-beds. Annual average pollutant runoff rates have been evaluated for different roofing materials (Bertling *et al.*, 2006; Leuenberger-Minger *et al.*, 2002; Odnevall Wallinder *et al.*, 2004; Robert-Sainte *et al.*, 2009; Van de Voorde, 2012).

To model the emission on the city scale, new parameters related to the large scale have to be taken into account. An important part of the modelling is based on identifying and quantifying roofing material areas on a city. However, on the city scale, the information concerning roofing materials and their surfaces on an urban district does not currently exist in urban databases. Some methods have already been developed for the evaluation of roof surfaces on a large-scale in order to study building-integrated solar-energy applications (Bergamasco and Asinari, 2011; Izquierdo *et al.*, 2008) or to explore the potential of green infrastructure in adapting cities for climate change (Gill *et al.*, 2006). But, in these studies, the roofing materials were not taken into account. Other approaches (Gromaire *et al.*, 2002a; Le Bris and Robert-Sainte, 2009) have evaluated roofing material areas using data obtained from aerial photographs and image classification software. The classification method based on aerial images was applied to an urban catchment with 2.25 km² of surface (Le Bris and Robert-Sainte, 2009). Nevertheless, this classification method presents some limitations especially in terms of confusion between different materials (e.g. zinc in the shadow and slates in the sun). In addition, the identification of the material is

limited to the input data. For example, if three types of roofing materials are defined in the input data, the model will try to classify all roofing materials into the three types and will not be able to recognize another material. Moreover, the roofing material age is not identified. Finally, from an aerial image, only rooftop material areas can be evaluated. Besides, roof is also composed of other small elements (ex: gutter and valley) which can be a large source of runoff contamination. These elements are generally not visible on the aerial photography. Therefore, a method must be developed to evaluate roofing material contaminant emissions on the city scale. This method is based on the use of urban knowledge, the adaptation of existing urban databanks in the city and the definition of new approaches.

The objective of this paper is to describe the method evaluating roofing material emissions on the city scale by studying the zinc emissions in the city of Créteil. This application in Créteil has two objectives. The first one is to validate the methodology. The second one is to analyze the transferability of the method to other cities and also to other contaminants. The development of the method from Créteil has enabled us to produce different methodological principles and practical rules.

2. Methodological Principles

This part describes the general methodology of the work, applicable to any contaminant. It is thus illustrated by examples for different contaminants.

2.1 General method to evaluate contaminant annual flow emitted by roofing material on the city scale

To evaluate roofing material contaminant emission on the city scale, the equation of its annual flow emitted by roofing material on the city scale is needed.

On the city scale, two parameters which determine the roofing material contaminant emissions have been retained: the *surface or the length of the different materials* used for the *different roofing elements* and the *annual runoff rate for each contaminant from these materials*.

The method developed to evaluate these parameters is described in figure 1. The different parts of this method will be explained in the following sections of this paper.

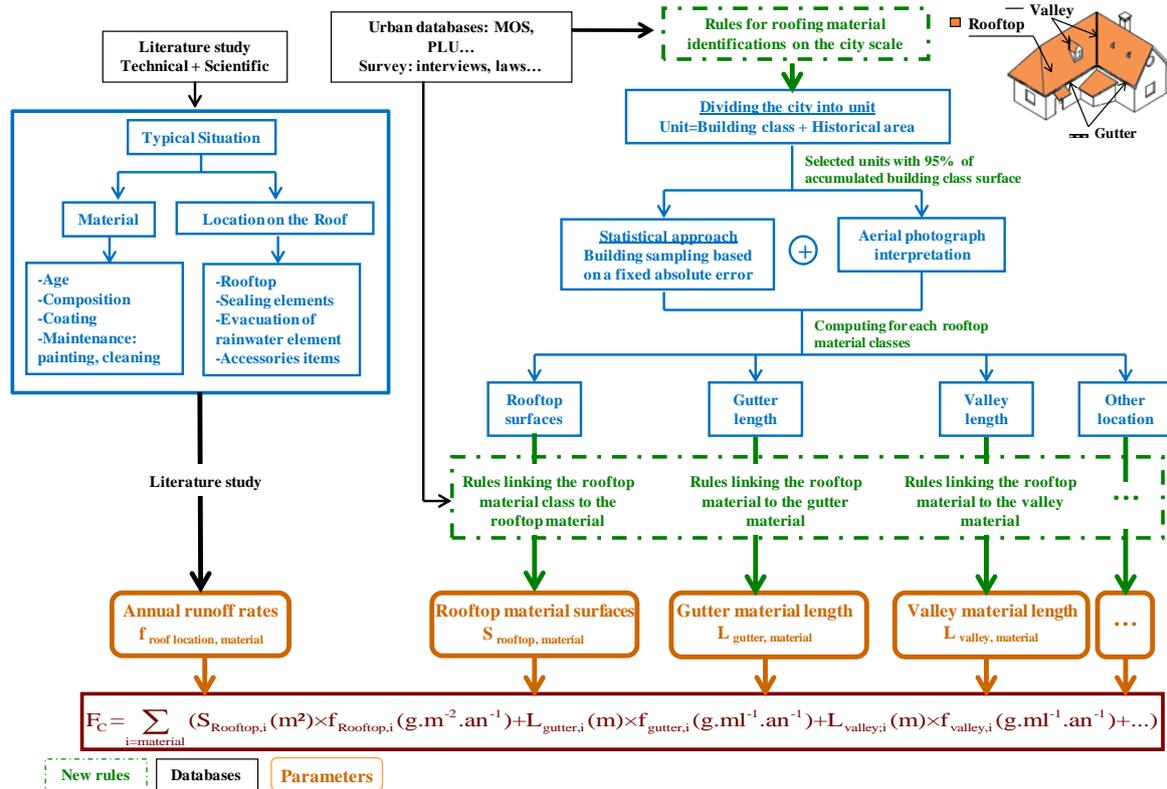


Figure 126: General method to evaluate contaminant annual flow emitted by roofing material on the city scale

In order to model the contaminant emissions on the city scale, describing and understanding the emission on the roof scale is needed. Thus, a new concept called *typical situation of contaminant emission from roofing material on the roof scale* has been defined. This concept allows the transition between the roof scale and the city scale. For each typical situation a contaminant annual runoff rate is associated.

A new method has been developed to identify and quantify roofing material surfaces or lengths on the city scale. This method is based on two main steps. The first one consists in quantifying the *surfaces* of rooftop *materials classes*¹¹³ and their associated *valley and gutter lengths*. The second one is the quantification of the rooftop material surfaces, gutter material lengths and valley material lengths using specific rules (Figure 1).

2.2 Annual runoff rates and typical situations of contaminant emission from roofing materials

A typical situation of contaminant emission from roofing materials on the roof scale is a situation for which a unique annual runoff rate for a contaminant is associated. On the roof scale, different parameters influence the contaminant runoff rate from roofing materials. These parameters can be classified into parameters related to the roof characteristics and parameters related to the exposure conditions and the time-related factors. The roof characteristics include material characteristics (age, type and composition) (Bertling *et al.*, 2006; Odnevall Wallinder *et al.*, 2001), the roofing element (gutter, rooftop...) (Robert-Sainte *et al.*, 2009), inclination and orientation (Odonevall Wallinder *et al.*, 2000). On the city scale, the material characteristics should be taken into account. However, the orientation effects become smoothed as all types of roof orientations are combined. The roof slope was shown to be determinant for the runoff rate per m² of exposed material yet does not significantly affects the runoff rate per m² of projected area (Odonevall Wallinder *et al.*, 2000). On the city scale, identifying roofing materials is based on aerial photography databases which provide only projected area measurements. Thus, roof inclination will not be taken into account. The different roofing elements do not have the same contaminant runoff rate (Robert-Sainte *et al.*, 2009) due to different collected runoff volumes, so the contaminant location on the roof is an important parameter to be taken into consideration on the city scale. In addition, contaminant runoff rates depend on exposure duration, rainfall characteristics (value, intensity, duration, pH) and a parameter considering previous exposure period (Gromaire *et al.*, 2011).

These parameters are not taken into account in our case because we are focusing on *annual* contaminant runoff rate values. So for a city scale evaluation, two types of parameters seem relevant. The first one concerns material characteristics (age, type and composition) and the second one is the location on the roof. Thus, each typical situation of contaminant emission from roofing materials on the roof scale is defined as a simple case of a contaminant emission characterized by its *belonging to a specific material* and its *location on the roof* (see Table 1). The contaminant runoff rate for this typical situation will be noted $r_{\text{material, roof location}}$.

Table 66: Examples of typical situations

| Pollutant | Material | | | Location on the roof | Annual runoff rate |
|-----------|-----------------|-----|------------------------------------|----------------------|--|
| | Type | Age | Form | | |
| Chrome | Stainless steel | new | Component of stainless steel sheet | Rooftop | 0,8 à 1,2 (mg.m ⁻² .an ⁻¹) (Odonevall Wallinder <i>et al.</i> , 2002) |
| Lead | Copper | old | Component of copper sheet | Gutter | 0,9 (mg.ml ⁻¹ .an ⁻¹) (Robert-Sainte <i>et al.</i> , 2009) |
| Zinc | Zinc natural | new | Principal component of zinc sheet | Gutter | 0,871 (Robert-Sainte <i>et al.</i> , 2009) |

2.2.1 Belonging to a specific material

- *Material age*

Runoff rates depend on the age of the material. On the one hand, the material composition depends on the period of its production. For example, a tin-lead component was added to the stainless steel composition in 1971 (Invernizzi, 2000). On the other hand, old materials present different runoff rates from the new material. For example, copper emission are higher for the older material (2,1 g.m⁻².an⁻¹ for copper 40 year old and 1,3 g.m⁻².an⁻¹ for new copper) (He *et al.*, 2001), whereas for paint containing biocides, the biocide runoff rate decreases from rain to another due to the limited quantity of biocide in the paint (Jungnickel *et al.*, 2008).

- *Sources of pollutants in roofing materials*

A pollutant released from a roofing material has a specific form of presence in the material. The pollutant can be the principal or a secondary component in the material composition. This is the case of metal materials (e.g. zinc, copper and lead) which are based on specific alloys composed of different components with different proportions. For example, steel is an alloy of iron and other elements such as nickel (Invernizzi, 2000). This is also the case of other roofing materials. For instance, bituminous membranes contain polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) (Bowen and de Groot, 2000). The pollutant can also be a component in the coating added to the material during the production process. For example, zinc as a pollutant, releases from galvanized steel (Bertling *et al.*, 2006), i.e. steel coated with a thin zinc layer.

¹¹³ A *material class* is defined as the gathering of different materials having the same principal material. For example, steel is considered as a class which gathers different varieties of steel: natural steel, galvanised steel, stainless steel, coated steel.

In addition, roofing material maintenance practises may be sources of pollutants. For example, renders and paints contain biocides which leached during rainfall periods (Burkhardt *et al.*, 2007; Jungnickel *et al.*, 2008; Schoknecht *et al.*, 2009). Benzalkonium is a pollutant widely used as a demossing agent for cleaning tile roofs. This practice leads to benzalkonium transfer into stormwater (Van de Voorde *et al.*, 2012). To conclude, a pollutant may come from three different sources: the material itself, the coating of the material and the roofing maintenance practices.

2.2.2 Location on the roof

A roof is composed of four main elements: the rooftop, the tightness elements (valley, ridge, hips...), the evacuation of rainwater elements (gutter, pipes...) and accessories items (fixing components for slates...). For the same material, each element of the roof has a specific runoff rate. For instance, runoff rate for lead flashing against sidewall ($0,88 \text{ g.m}^{-2}.\text{y}^{-1}$) is very much lower than from rooftop lead ($5,23 \text{ g.m}^{-2}.\text{y}^{-1}$) due to orientation and shelter effect (Wilson, 2003). In addition, runoff rate from zinc rooftop ($3,868 \text{ g.m}^{-2}.\text{y}^{-1}$) is higher than from gutter zinc ($1,654 \text{ g.m}^{-2}.\text{y}^{-1}$) (Robert-Sainte *et al.*, 2009).

We should note that the production of runoff rates on the roof scale is not the objective of our work. However, the existing runoff rates in the literature will be used to model the contaminant flow on the city scale.

2.3 Identification and quantification of roofing material elements on the city scale

A new method has been developed to identify and quantify roofing material surfaces or lengths on the city scale. This method is based on two approaches. The first one is a survey made by conducting interviews with the actors of the roofing material sector (industrials, master work, architect...) and consulting different documents (e.g. town planning regulation framework, construction laws, standardized technical documents). From this survey, concrete rules for the identification of roofing materials on the city scale have been established. The second one is a statistical approach for estimating the distribution of the materials of the different roofing elements on the city scale. The two approaches are combined in the method.

In figure 1, the *first* step of the method consists in dividing the city into homogeneous urban units. Each unit is obtained by crossing:

- "*Building classes*" established through the adaptation of an existing *land use database* which allows us to connect building scale and urban scale;
- With the historical urbanization process of the city.

The crossing is conducted using specific rules which are based on three hypotheses:

- The choice of a roofing material depends on the building typology.
- The spatial and temporal urban evolution of the city influences the use of roofing materials.
- The town regulation framework allows/recommends some roofing materials in the city.

Each "*Building class*" located in an historical area represents a unit. For each unit, a random sampling technique is elaborated from the available building database. To ensure an absolute error less than 3%, the number of the selected random building depends on the total number of the existing building in the unit. This step provides the distribution of the rooftop *material classes* (ex: zinc, tile) and the gutter and valley lengths for each rooftop material class in each unit.

In a *second step*, the material of the different roofing elements in each unit is quantified using a new set of rules. Three types of rules have been used:

- *Rules linking the rooftop material class to the rooftop material*: these rules allow us to distinguish between the different varieties of the material class. For example, if the proportion of steel (as a material class) was identified in a specific unit, the objective is to get the distribution between galvanised steel, coated steel and stainless steel. In the case of units based on industrial building, the obtained rule is "coated steel is used in industrial unit".
- *Rules linking the rooftop material to the gutter material*: for a rooftop material there is a specific use of the gutter material. Thus, the obtained rule is "in metallic roof the gutter has the same material as the rooftop".
- *Rules linking the rooftop material to the valley material*: for a rooftop material there is a specific use of the valley material. Thus, the obtained rule is "in metallic roof the valley has the same material as the rooftop".

Finally, for each unit the rooftop material surface area distributions and the valley and gutter material lengths are computed. Thus, contaminant annual flow emitted in roofing material runoff on the city scale is computed by multiplying the surface or the length of the material element by its associated runoff contaminant rate.

All of these rules will be explained in the next part by studying the zinc emission in the city of Créteil. In fact, the different rules are sometimes global or specific to the site. Thus, it will be easier to understand them by studying a case study.

3. Application of the methodology for zinc emissions in the city of Créteil

a. Case Study Site

The goal of our research work is to develop a general method to quantify roofing material surfaces or lengths on the city scale. In this context, a case study is needed to achieve two objectives. The first one is to validate the

method. The second one is to make it possible to apply the method to other cities. Therefore, a sufficiently complex case study should be chosen in order to represent most of the urban functions of any city. In fact, the city should present a sufficient urban diversity. The selected city is Créteil located about 10 km from Paris (France). Créteil with a total area of 11.5 km² (INSEE, 2008), presents a big diversity and a large number of buildings which represents about 24% of the city area. This city also presents an interesting urban and functional diversity (residential area, industrial area...).

To quantify the different roofing material surfaces or lengths, urban data banks (historical urban map), land use database MOS-IAU¹¹⁴ have been reorganized in order to match with our objective and interviews that have been conducted with various actors such as masters of work, contracting authorities and architects. These interviews showed that information relating roofing materials and their surfaces on an urban district does not currently exist in urban databases. In the city of Créteil, different urban data (historical urban evolution, land use...) are available but they are not sufficient to achieve our objective to evaluate roofing material emissions.

In this context, *data acquired on Créteil have been adapted and transformed to provide new useful data that will be used in our work.*

b. Annual runoff rates and typical situations of zinc emission from roofing materials

In the city of Créteil, zinc annual runoff rates have been produced for different metallic materials (Robert-Sainte *et al.*, 2009) (see Table 2). We should note that zinc runoff rates from roof did not include atmospheric deposition. In fact, Robert-Sainte *et al.* (2009) have firstly evaluated atmospheric input values on Plexiglas panels. Then, they have directly deduced these values from concentration levels before the calculation of zinc runoff rates.

The studied new stainless steel, coated steel, new zinc, new aluminium and coated aluminium samples were standard products. Thus, they are considered as representatives for the hole of Créteil. However, for the pre-weathered zinc, the process depends on the producer and the product.

Table 67: Typical situations of zinc emission (Robert-Sainte *et al.*, 2009)

| Material | | | Localisation on the roof | Annual average runoff rate (g/m ² /year) (g/ml/year *) |
|-------------------------|----------------------|---|--------------------------------|---|
| Type | Age | Form | | |
| Zinc natural | New | Principal component of zinc sheet | Rooftop | 3.9 |
| | | | Sealing element ¹¹⁵ | |
| | | | Gutter* | 0.87 |
| | Valley* ³ | | | |
| Zinc old | 35 years | Principal component of zinc sheet | Rooftop | 4.2 |
| | 40 years | | Gutter* | 0.81 |
| Anthra zinc | New | Principal component of zinc sheet | Rooftop | 2.3 |
| | | | Gutter* | 0.50 |
| Galvanised steel | New | Principal component of the coating the of galvanised steel sheet | Rooftop | 2.0 |
| Coated galvanised steel | New | Principal component of the coating the of galvanised steel coated sheet | Rooftop | 0.025 |
| Stainless Steel | New | Component of stainless steel sheet | Rooftop | No emission |
| Lead | New | Component of lead sheet | Rooftop | 0.052 |
| | 50 years | Component of lead sheet | Rooftop | 0.11 |
| Aluminium | New | Component of aluminium sheet | Rooftop | 0.034 |
| | | Component of aluminium sheet | Gutter* | No emission |
| Aluminium coated | New | Component of aluminium coated sheet | Gutter* | No emission |
| Copper | New | Component of copper sheet | Gutter* | 0.002 |
| | 20 to 25 years | Component of copper sheet | Gutter* | 0.021 |

The market share between the different producers is 70% for VMZINC, 20% for RHEINZINK and 10% for the others (MSI, 2012). In Paris area, the market share of VMZINC is even higher (information given by producer). VMZINC produces two types of pre-weathered zinc: Anthra zinc and Quartz zinc. Robert-Sainte *et al.* (2009) only tested Anthra zinc. Literature data in other countries do not allow concluding on the difference of zinc runoff between anthra zinc and quartz zinc.

c. **Dividing the city into homogeneous urban units** To develop the method to evaluate roofing material surfaces or lengths on the city scale, specific urban data are needed. Thus, a survey has been

¹¹⁴ IAU: Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile-de-France: institute of planning and development for the Greater Paris region. <http://www.iaurif.org/>

¹¹⁵ For sealing element and valley, no runoff rates data have been produced. Thus, we propose an approximation for these two values. For sealing element they have been approximated by the rooftop runoff value and valley it was approximated by the gutter one.

established by consulting different urban databases, scientific literature, technical documents and interviews. The results of this survey enable us to define new rules for identifying the use of a roofing material on the city scale. In what follows, rules will be described and applied to Créteil city.

3.3.1 Rule 1: A specific roofing material distribution is associated to each “Building class”

The choice of a roofing material depends on the building typology. For example, in France, individual housing roofs are mostly covered with concrete or clay tiles. In Créteil, a land use database named MOS-IAU is available. This database is very detailed and describes all types of land uses such as green space and roads. To optimize the use of this database for our objective, different operations have been elaborated (Belmeziti *et al.*, 2013). The first one is to focus only on building land use which still very detailed. Then, the building land use data are organized by gathering all buildings with the same use of roofing materials. Therefore, new building types have been created called “Building class” characterized by a specific roofing material distribution. Thirteen “Building classes” have been created: *individual houses, apartment, secondary activities, administrations, sports, commercial space, education, cultural, offices, health equipment, transport, other building (ex: jail), other equipment (water, gas...)*.

Finally, a new map of Créteil has been elaborated describing the different “Building classes” (see Figure 2). This map has been associated via QGIS¹¹⁶ software with a numerical cadastre named BD-topo database (IGN, 2008), which contains a vector description of the building layer. BD-topo database provides the roofing surface for each building. Thus, by crossing “Building classes” map and the BD-topo, roofing surface areas are computed for each “Building class”.

3.3.2 Rule 2: A specific roofing material distribution is associated to each historic urban area

The spatial and temporal urban evolution of the city affects the use of roofing material. For example, in central Paris, roughly 40% of all roofing surfaces are covered with rolled zinc, due to the urban planning made by Haussmann in the 19’s century (Gromaire *et al.*, 2002). The city of Créteil is divided into four major historical urban areas: Old center, Mont Mesly, New Creteil I, New Créteil II. This division is however not perfectly relevant to identify roofing materials. The urban survey made in the city, enabled us to divide the city into 3 historical urban areas corresponding to different periods of construction (see Figure 2).

- Area 1 from 19th century to 1950: characterized by downtown and a majority of individual houses.
- Area 2 from 1951 to 1980: construction of economic buildings with several floors and flat roof.
- Area 3 from 1981 to 2008: great urbanization of the city (mainly apartment buildings) with specific requirement of the mayor: each new building should be with a pitched roof in order to get an urban continuity with the downtown. Architects who preferred flat roofs tried to build flat roof with slate or tile roof breaks.

3.3.3 Rule 3: The town regulation framework allows/ prohibits roofing materials in the city.

In central Paris, architectural rules concerning the protection of historical monuments and their environment prevent any changes for many years (Gromaire *et al.*, 2002). In the city of Créteil, there is no specific recommendation for the roofing material use. The only restriction is the mayor requirements to have pitched roofs to preserve the identity of the old Créteil of the 19th century.

The application of the different rules enables us to produce two different maps. The first map is an historical map and the second one is the “Building classes” map (see Figure 2).

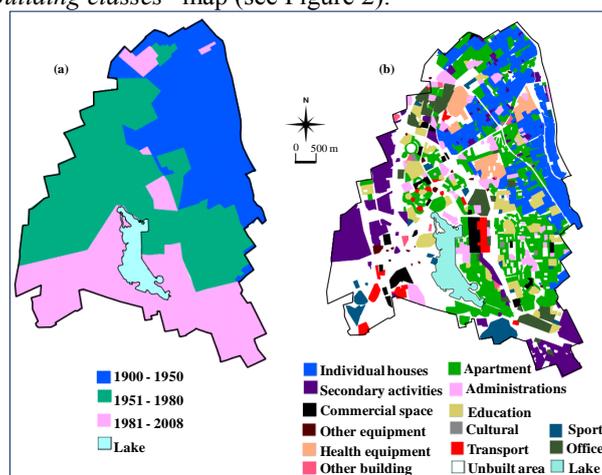


Figure 127: (a) Historical map (b) “Building classes” map

¹¹⁶ Quantum GIS (often abbreviated QGIS) is a cross-platform free and open source desktop geographic information systems application that provides data viewing, editing, and analysis capabilities. <http://www.qgis.org/>

3.3.4 Homogeneous urban units

By overlaying these two maps (see Figure 2); each building class located in an historical area is a homogeneous urban unit in terms of building types and historical location.

In what follows the term *unit* will be used. To optimize the computation time, only the most important “*Building classes*” corresponding to a cumulated surface of at least 95% of the total roofing surface of the considered historical area are selected (see Figure 3).

Three different units have been selected to study the influence of building typology and surfaces on the zinc emission:

Unit 1: “individual houses class” located in area 1 (58.5% of the area 1 roofing surface)

Unit 2: “apartment class” located in area 1 (37% of the area 1 roofing surface)

Unit 3: “health equipment class” located in area 1 (4.5% of the area 1 roofing surface). This unit has been selected because it presents many zinc roofs.

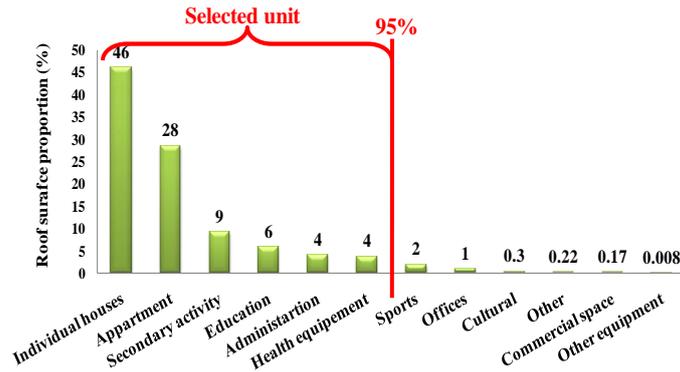


Figure 128: The distribution of roof surface “*Building classes*” in the area 1 (1900- 1950)

a. Quantification of rooftop material class surfaces and their associated valley and gutter lengths

This method is based on a stratified random sampling technique in conjunction with aerial photograph interpretation of the rooftop material class and their surfaces and measuring the gutter and valley lengths.

In this part, the statistical approach will be applied for the selected units. By overlying the unit map and the BD-topo database, the roof surface for each unit (N (m^2)) is obtained. The sampling strategy is based on randomly generating independent buildings. Each selected building (b) has a specific roofing material. So, a database of buildings sampled in the unit with their roof surfaces S_b (m^2) is generated. By associating BD-topo and BD-ortho¹¹⁷ (IGN, 2008), for each sampled building (b), its valley length $l_{v,b}$ (m) and gutter length $l_{g,b}$ (m) are measured with QGIS and its rooftop material class is identified by looking to the image. In the sample s the total building surfaces S_s (m^2), the total valley lengths $l_{v,s}$ (m) and the total gutter lengths $l_{g,s}$ (m) are evaluated.

Finally, for each rooftop material class i in the sample, the rooftop surface area $S_{s,i}$ (m^2) and its proportion $p_{s,i}$ (%), the gutter length $l_{g,s,i}$ (m) and the valley length $l_{v,s,i}$ (m) are computed. These results are then extrapolated to the unit with uncertainty calculations.

3. 3.4.1 Uncertainty calculations

The sampling strategy uncertainties were computed for:

- $p_{s,i}$: proportion of rooftop material class i in the sample s

- The ratio between the valley length for each material class i and the total valley length in the sample s :

$$R_{v,s,i} = \frac{l_{v,s,i}}{l_{v,s}}$$

- The ratio between the gutter length for each material class i and the total gutter length in the sample s :

$$R_{g,s,i} = \frac{l_{g,s,i}}{l_{g,s}}$$

The Theorem for Proportions (Saporta, 1990) is applied, in which the sampling distribution for samples with size $n \geq 30$ (generated without replacement) is approximately normal, so:

¹¹⁷ BD-ortho images come from IGN’s (Institut Géographique National) which contains digital colour ortho-photos with three or four (red–green–blue–near infrared) bands and with a 50 cm ground resolution.

$$T_{s,i} \rightarrow N\left(T_i; \sigma_{T_i} = \sqrt{\frac{T_i(1-T_i)}{n} \times \left(1 - \frac{n}{N}\right)}\right)$$

where $T_i \in \{p_i; R_{v,i}; R_{g,i}\}$, $T_{s,i} \in \{p_{s,i}; R_{v,s,i}; R_{g,s,i}\}$

p_i : the material proportion in the unit

$R_{v,i}$: the material valley ratio in the unit

$R_{g,i}$: the material gutter ratio in the unit

The point estimate of T_i is $T_{s,i}$ and an estimation of standard error is given by:

$$\sigma_{T_i} = \sqrt{\frac{T_{s,i}(1-T_{s,i})}{n} \times \left(1 - \frac{n}{N}\right)}$$

At the confidence-level coefficient of $\alpha=0.05$:

$$CI = T_i \in [T_{s,i} - 1.96 \times \sigma_{T_i}, T_{s,i} + 1.96 \times \sigma_{T_i}]$$

Results are illustrated in Table 3.

b. Quantification of rooftop material surfaces, gutter material lengths and the valley material lengths for the selected units

A survey was made by conducting interviews with experts of the roofing material sector (industrials, masters of work, architects...). Different documents have been consulted: town planning regulation framework, construction laws, standardized technical documents (in France, DTU: Documents Techniques Unifiés), marketing research (MSI, 2006, 2012). A historical study was made concerning the roofing material evolution (appearance, disappearance, evolution characteristics ...). In fact, the rapid development of industrial technologies affects the use and the material characteristics. Thus, an historical table was elaborated for roofing material historical evolution.

The objective of this survey is to identify the different parameters influencing the choice of a material from the different material class varieties. Different hypotheses have been identified from this survey; they allow us to define rules. These latter enable us to get a first distribution of the material in the different roofing elements.

In what follows, the different rules to evaluate materials in the selected unit are described.

The first step was to *cross roofing material historical evolution with the city of Créteil urban history*. This work allows us to identify the roofing materials potentially existing in an historical area.

Figure 4 describes the history of the different materials found in the city of Créteil and which emit the zinc contaminant (Aocdtf, 1989; Lamesch, 2004; Hartmann, 2004, 2006; Invernizzi, 2000; Payet-Gaspard, 2012; Schonnenbeck and Neumann, 2013).

In addition, in France, roofing techniques are described in details in standardized technical documents (DTU), addressed to professional roofers. Indeed, all roofing techniques are indexed: materials that may be used and the way of their implementation (DTU 40.1, 40.2, 40.3, 40.4, 40.5 and 43). All constructions are expected to respect these reference documents. Thus, these documents have been used in order to identify the roofing material used for the different roofing elements. In DTU documents, gutter material is not specified for each rooftop material class. The roofer has the choice between five gutter materials: zinc, copper, stainless steel, PVC and aluminium. For metal rooftops, valley is considered as a part of the rooftop and thus has the same metal material, whereas for the other rooftop material classes, valley materials could be zinc or lead or the same material as the rooftop (tile, stales...).

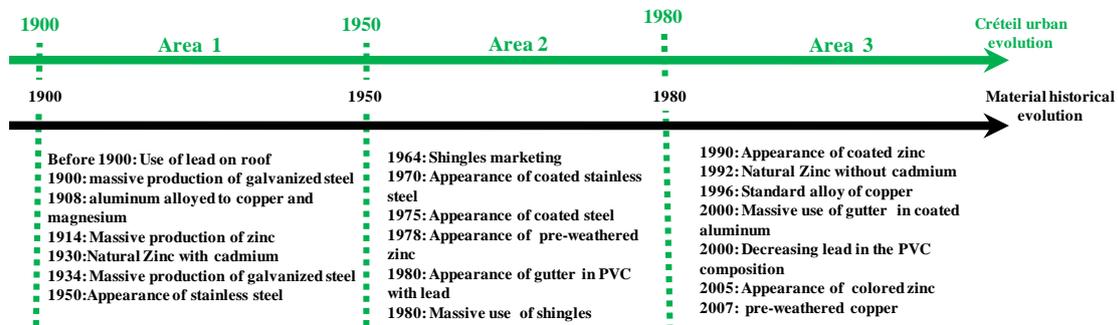


Figure 129: The historical evolution of roofing material emitting of zinc

Table68 : Rooftop surface area, gutter length and valley length computed for each material class for three units: individual houses, apartment and health equipment classes located in area 1 (1900-1950)

| Material class | Rooftop surface area $S_i \pm CI$ (m ²) ($p_{s,i} \pm CI$ (%)) | | | Gutter length $l_{g,i} \pm CI$ (m ²) ($R_{g,s,i} \pm CI$ (%)) | | | Valley length $l_{v,i} \pm CI$ (m ²) ($R_{v,s,i} \pm CI$ (%)) | | |
|----------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|---|----------------------------|--------------------------|---|---------------------------|------------------------|
| | Unit 1 | Unit 2 | Unit 3 | Unit 1 | Unit 2 | Unit 3 | Unit 1 | Unit 2 | Unit 3 |
| Tile | 278648±21123 (83.2±7.58) | 91793±9638 (43.32±10.50) | 5100± 123 (19.65±2.42) | 71676±5143 (85.31±7.18) | 22298±2069 (74.12±9.28) | 1033 ± 7 (66.66±0.68) | 7060±568 (80.43±8.04) | 1757± 147 (80.56±8.39) | 163 ± 7 (91±4.3) |
| Coated steel | 845±9 (0.25±1.02) | - | 851 ± 9 (3.28±1.08) | 335±4 (0.40±1.28) | - | 77 ± 3 (5±3.9) | - | - | - |
| Galvanized steel | 5306±134 (1.58±2.53) | - | - | 1280±32 (1.52±2.48) | - | - | - | - | - |
| Bituminous flat roof | 5409±138 (1.61±2.56) | 17813±1047 (8.41±5.88) | 6151 ± 159 (23.70±2.59) | - | - | - | - | - | - |
| Gravel flat roof | 6406±178 (1.91±2.78) | 68017± 6729 (32.10±9.89) | 11176 ± 336 (43.06±3.01) | - | - | - | - | - | - |
| Zinc | 7379±220 (2.20±2.98) | 28176± 2027 (13.30±7.19) | 2299 ± 40 (8.86±1.73) | 2506±86 (2.98±3.45) | 6703±591 (22.28±8.82) | 346 ± 6 (22.34±1.74) | 137± 3 (1.56±2.51) | 424±36 (19.44±8.39) | 16 ± 0.3 (8.9±1.87) |
| Slates | 20552±1000 (6.14±4.86) | - | - | 6510±353 (7.75±5.42) | - | - | 1581± 123 (18.01±7.79) | - | - |
| Shingles | 10405±366 (3.11±3.52) | 6102±216 (2.88±3.54) | 375 ± 3 (1.45±0.73) | 1708±49 (2.03±2.86) | 1081±43 (3.6±3.94) | 9 ± 4 (6±4.3) | - | - | - |

3.5.1 Rules linking the rooftop material class to the rooftop material

Table 3 and Table 2 show that the roofing material classes that emit zinc are galvanized steel, zinc, and coated steel. The zinc material class presents different material varieties: natural zinc, pre-weathered zinc, coated zinc and coloured zinc. During the identification of rooftop material from aerial images, all collared materials were classified into “other material class”. Thus, collared zinc will be ignored. To distinguish between the other zinc varieties, other information is needed. The selected units: individual housing class, apartment class and health equipment class, are located in area 1. In this latter, by looking to Figure 4, the only zinc existing variety is natural zinc. Buildings located in area 1 (1900-1950) are however old and their roofing materials have probably been renewed at least once time. The zinc cycle life is about 50 years (MSI, 2006). The zinc producers (e.g. VMZINC) say that old natural zinc renewal is usually done with the same zinc variety. To conclude, in area 1 the zinc variety used is natural zinc. The natural zinc age is less than 58 years if we consider that it was renewed once. For coated and galvanized steel they are appeared in roofs in 1975, their age is about 33 years. The life cycle of steel is about 100 years (MSI, 2006).

3.5.2 Rules linking the rooftop material to the gutter material

Gutter materials are of six different types (DTU). The used zinc is mainly natural zinc. The survey shows that today, the gutter market in France is divided between three principal materials: natural zinc, PVC and coated aluminium. The other gutter materials represent only 5% of the market and therefore, their contribution can be neglected in a first approach. Figure 4 shows that PVC appeared in the 1980's and coated aluminium in 2000. Therefore, in area 1 (1900-1950) these two materials are not originally present: the existing gutter materials are copper and natural zinc. If we consider the cycle life of natural zinc (50 years) and of copper (70 years) (MSI, 2006), thus, the gutters have been renewed at least once. Zinc and copper are noble materials, gutter with those materials are generally renewed by the same material (according to interview with roofing material experts). In selected units, gutters are linked to the rooftop material: tile, coated steel, galvanized steel zinc, slates and shingles. Coated steel and galvanized steel are economic roofing solution appeared in 1975. Such roofs are strongly correlated with PVC gutters, in the proportion of about 80% in PVC, the 20% remaining being mostly in natural zinc (according to interview with roofing material experts). For natural zinc rooftop, the gutter material is old natural zinc. For shingles which are mainly used during the 1980's and are considered as economic materials, the gutter material distribution is probably the same as for coated steel. Finally, for old tile and old slates rooftops, the considered materials are natural zinc and copper. Copper is an expensive material and its use in gutter will be very limited compared to natural zinc. In addition, as our objective is to evaluate zinc emission, we assume, using a first overestimation approach (Belmeziti *et al.*, 2013), that gutter material distribution for old tile rooftop is 95% in natural old zinc and 5% in old copper.

3.5.3 Rules linking the rooftop material to the valley material

The survey made with the actors of the roofing material sector shows that for metal rooftop, valley materials are the same as the rooftop materials. The obtained rule is: “*For metal rooftop, the valley is a part of the rooftop*”. Thus, valley will be computed only for non metal rooftop (tile, slates, shingle). In this case, valley material could be zinc or lead or the rooftop material (tile, slates, and shingle). The survey shows that the zinc used for valleys is then natural zinc. For lead, it was used in very old building built before the 19th century. In addition, in area 1, the oldest building is dating from 1900 and then lead in valley was not used. To have an estimation of the tile valley proportion, natural zinc valley proportion and slates valley proportion, we adopt here again an *overestimation approach* (Belmeziti *et al.*, 2013). It means that, as our objective is to evaluate zinc emission, the quantification of valley lengths will be majored by considering that all valleys are made in natural zinc.

1.1 Zinc annual flow calculation for the selected units

The zinc annual flow emits by rooftop, gutter and valley material will be computed using the following equation:

$$F_{zinc,roof.location} = \sum_{i=material} (D_{roof.location,i} \times r_{zinc,roof.location,i})$$

Where D represents the roof location dimension: area for rooftop (m²) and length for gutter and valley (m).

$r_{zinc,roof.location}$ is the zinc annual runoff rate emitted by the different roofing material elements. Runoff rates are taken from Table 2.

4. Results and discussion

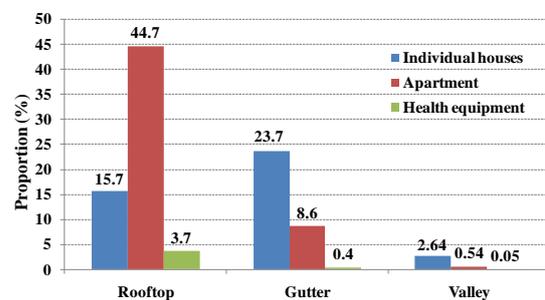
The evaluation of zinc emissions from roofing materials on a city scale shows that zinc emissions depend not only on the surface of the considered unit but, also on the building typology (see Table 4). In addition, the principal source of zinc emissions is the rooftop. However, other elements of the roof such as gutters and valleys may contribute significantly to zinc emissions. For instance, for the individual housing unit with rooftops with a majority of tiles (83% tile roof, 2% zinc roof), the principal source of zinc emissions is the gutter (23.7% of the whole zinc emissions from the three units versus 15.7% providing by rooftop) (see Figure 5). Besides, although the zinc emissions from valleys are the lowest (3.23% of the total for the three units), the valley emissions in the individual houses (2.64% of the total) are of the same order of magnitude as the rooftop emissions in the health equipment unit (3.7%). Thus, the zinc emission from tightness elements such as valleys should not be neglected. Therefore, the contribution of the different elements of the roof (rooftop, gutter and valley) to zinc emissions strongly depends on building typology and the unit area.

The validation of this method is difficult. In fact, it is impossible to experimentally measure roof emissions on a city scale. In addition, stormwater collected in the drainage systems are a mixture of the different types of urban surfaces. Moreover, in Créteil, no experimental data of zinc emissions from roofs or from other sources have been found.

Table 69: Results for annual zinc flow for the three selected units

| Unit (area 1) | Roof Area (m ²) | Roof area distribution (%) | Annual zinc flow \pm CI (kg/year) | Zinc emission distribution (%) |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Individual houses | 334950 | 58.5 | 111.44 \pm 5.72 | 42.1 |
| Apartment | 211901 | 37.0 | 142.65 \pm 10.71 | 53.8 |
| Health equipment | 25954 | 4.5 | 10.91 \pm 0.18 | 4.1 |
| Total | 572805 | 100 | 265\pm16.62 | 100 |

Figure 130: Distribution of the total zinc emissions from the three units from the different sources



Nevertheless, some literature zinc fluxes data can be found. In fact, zinc emissions can be measured in some experimental roof runoff, sometimes with a rough extrapolation to the whole roofing area of a catchment scale. In addition, measurements can be made in the stormwater sewer on a catchment scale.

Thus, annual zinc runoff rates from roofs, computed in this study, were compared to other values collected in the literature (see Table 5). We should note that annual zinc runoff load data are very limited in the literature. The comparison shows that results obtained from this method are promising.

Table 70: Comparison of annual zinc runoff rates for different sites and different sources

| Sources | Mean Zinc annual runoff rates (mg/m ² /year) | Site location | References |
|---------------------------------|---|--|---|
| Roofs | 333-673 | Créteil (France) | This study |
| | 478 | Residential site: 3.3% of zinc roofs (Nantes, France) | (Lamprea, 2009) |
| | 1062 | Residential site: about 50% of zinc roofs (Paris, France) | (Thévenot et al., 2007) |
| Atmosphere | 34.2 | Créteil (France) | (Robert-Sainte et al., 2009) |
| | 15 - 140 | France | (Azimi et al., 2005; Bressy, 2010; Garnaud et al., 1999; Lamprea, 2009; Sabin et al., 2005) |
| Stormwater on a catchment scale | 240 - 430 | Residential site: 30% of zinc roofs (Noisy-le-Grand, France) | (Bressy, 2010) |
| | 4 - 80 | Residential (Florida, USA) | (Wong et al., 2000) |
| | 39.8 | Residential site: 3.3% of zinc roofs (Nantes, France) | (Lamprea, 2009) |
| | 50.2 | Mixed site (Nantes, France) | |
| | 54.8 | Industrial site (Lyon, France) | (Becouze, 2010) |

In Table 5, the mean zinc annual runoff rates from roofs have been elaborated by a rough extrapolation on the catchment scale of data measured from some experimental roofs. For stormwater catchment, measurements have been taken in separate sewer systems. This latter contains mixed urban runoff sources (roof, green space, road, sewer transfer...). Thus, the zinc runoff rates computed correspond to the whole zinc emissions on a catchment scale provided by different urban sources. In France, a residential site with 3.3% of zinc roof emits 478 mg/m²/year and a residential site with 50% of zinc roof emits 1062 mg/m²/year. Therefore, values computed in this study belong to the range elaborated for the different sites. Measurements of zinc in stormwater have been taken in different sites in France and the USA. For sites with a high zinc roof density (30%), zinc emissions in stormwater on a catchment scale are very high. For instance, the zinc emission values measured in stormwater

catchments are evaluated throughout the whole catchment surface area, contrary to our study where the values are computed only for the roof area. Therefore, roofs are an important source of zinc emissions compared to the zinc emissions in stormwater on the catchment scale. It is important to note that this observation also remains valid even in the case where the zinc roof proportion is small. Finally, even if rooftops are the principal source of roof runoff contamination, the emissions of the other different roof elements (e.g. gutter and valley) should not be neglected.

A deeper validation of this method could be done by its integration into a larger substance flow analysis model that estimates the whole contaminant emission provided by different sources on the city scale. But, even with such an approach, this validation may create a difficulty to describe the processes within the sewage network. In the city of Créteil, Robert-Sainte (2009) evaluated the zinc annual atmospheric deposition rate (34.2 mg/m²/year). This value belongs to the range elaborated for different sites in France. Roofs are a large source of zinc emissions in Créteil compared to the atmosphere: industrial activities are very limited (14% of Créteil area) and consequently, the related zinc emissions in the atmosphere.

5. Conclusions

A new methodology evaluating contaminant flow emissions on the city scale has been developed by studying the zinc emissions in the city of Créteil. It is based on using and adapting existing urban databases in conjunction with a statistical approach. This method contributes to an assessment of pollutant flows on the city scale and then, the impact of a city or an urban area on the environment can be evaluated.

Our method can be used as a decision-making tool by urban planners at three levels to implement policies in order to reduce roofing pollutants emissions. This innovative method will firstly allow them to assess the state of the emissions for existing roofs all over the city. They will then be able to define a plan of renewing roofing materials on the urban scale. And finally, it will be also possible to define a roofing material choice strategy for the construction in new urban areas.

To conclude, some considerations should be taken into account to apply this method to other cities.

Some adaptations need specific work. The historical urban evolution of the city map has to be elaborated for each studied city. This type of map can be available in the municipality library databases. It is also important to identify the different existing rules in the city related to the roofing materials use such as the town planning regulation framework (e.g. the Local Urban Planning scheme) and construction regulations. For the Ile-de-France cities, the building class databases are the same as Créteil. Elsewhere, land use databases are available but present some differences versus MOS-IAU. Whatever the land use database, it should be reorganized to get the thirteen "Building classes" created from the MOS-IAU land use database.

Other elements of the method can be applied with minor changes. Most of the rules linking the rooftop material classes and the material of the different roofing elements could be directly applied. The historical evolution of the roofing material table can be used in any city. Other rules are specific to Créteil, but they highlight some principles which can be adapted to other cities. The renewal process of the material because of its age strongly depends on the historical evolution of the city. Moreover, the specificities of the city can be used to optimize the computing process. For instance, one can find texts prohibiting roofing materials in urban planning city regulations: the number of roofing materials to be taken into account is therefore reduced.

Finally, runoff rates for different contaminants emitted from roofing elements could be used in other cities except for those where very specific local conditions may affect emission processes. Actually, the practical table of runoff rates for different contaminants presented in this paper is not complete. The production of more runoff rates is still needed.

Acknowledgements

This study has been conducted as part of the OPUR research program. The authors gratefully acknowledge the Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) for their financial support.

References

- Aocdtf, 1989, Encyclopédie des métiers - L'art du Couvreur, p. 1872.
- Azimi S, Rocher V, Muller M, Moilleron R, and Thevenot DR (2005) Sources, distribution and variability of hydrocarbons and metals in atmospheric deposition in an urban area (Paris, France): Science of the total environment, v. 337 (1-3).
- Beouze C (2010). Caractérisation et estimation des flux de substances prioritaires dans les rejets urbains par temps de pluie sur deux bassins versants expérimentaux, L'institut national des sciences appliquées de Lyon.
- Belmeziti A, Coutard O, and de Gouvello B (2013) A New Methodology for Evaluating Potential for Potable Water Savings (PPWS) by Using Rainwater Harvesting at the Urban Level: The Case of the Municipality of Colombes (Paris Region) Water, v. 5, p. 312-326.
- Bergamasco L, and Asinari P (2011) Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy): Solar Energy, v. 85, p. 1041-1055.

- Bertling S, Odnevall Wallinder I, Leygraf C, and Berggren Kleja D, (2006) Occurrence and fate of corrosion-induced zinc in runoff water from external structures *Science of the Total Environment*, v. 367, p. 908-923.
- Bowen C and de Groot P., (2000) Health safety and the environment-aqueous leaching of pac's from bitumen, in B. C. A., ed., *Barcelona- Spain, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona 2000*.
- Bressy A (2010) Flux de micropolluants dans les eaux de ruissellement urbaines. Effets de différents modes de gestion des réseaux pluviaux Université PARIS-EST, 332 p.
- Burkhardt M, Kupper T, Hean S, Haag R, Schmid P, Kohler M and Boller M (2007) Biocides used in building materials and their leaching behavior to sewer systems: *Water Science and Technology*, v. 56, p. 63-67.
- Ellis JB and Hvitved Jacobsen T (1996) Urban drainage impacts on receiving waters.: *Journal of Hydraulic Research*, v. 34 (6), p. 771-783.
- Förster J (1996) Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration": *Water, Science and Technology*", v. 33 (6), p. 39 - 48.
- Garnaud S, Mouchel JM, Chebbo G, and Thévenot DR (1999) Heavy metal concentrations in dry and wet atmospheric deposits in Paris district : comparison with urban runoff: *The Science of the total environment*, v. 235 (1-3).
- Gill SE, Handley JF, Ennos AR and Pauleit AR (2006) Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure: *Built environment*, v. 33(1), p. 115-133.
- Gromaire MC, Chebbo G and Constant A, (2002) Incidence of zinc roofing on urban runoff pollutant loads: The case of Paris: *Water, Science and Technology*, v. 45, p. 113-112.
- Gromaire MC, Robert-Sainte P, Bressy A, Saad M, de Gouvello B, and Chebbo G (2011) Zn and Pb emissions from roofing materials-Modelling and mass balance attempt at the scale of a small urban catchment: *Water Science and Technology*, v. 63, p. 2590-2597.
- Gromaire-Mertz MC, Garnaud S, Gonzalez A, and Chebbo G (1999) Characterisation of urban runoff pollution in Paris: *Water, Science and Technology*, v. 39(2), p. 1 - 8.
- Hartmann G, (2004) L'aluminium historique: http://www.hydroretro.net/etudegh/aluminium_historique.pdf
- Hartmann G, (2006) L'acier historique: http://www.hydroretro.net/etudegh/acier_historique.pdf
- He W, Odnevall Wallinder I and Leygraf C (2001) A comparison between corrosion rates and runoff rates from new and aged copper and zinc as roofing material: *Water, Air and Soil Pollution*, v. Focus 1, p. 67 - 82.
- IGN (2008) Institut national de l'information géographique et forestière: www.ign.fr.
- INSEE (2008) (Institut national de la statistique et des études économiques): <http://www.recensement-2008.insee.fr/chiffresCles.action?zoneSearchField=CRETEIL&codeZone=94028-COM&idTheme=3>.
- Invernizzi R, (2000) Les couvertures métalliques : matériaux et techniques, L'inox en couverture, Paris, Section française de l'Icomos, p. 169-174.
- Izquierdo S, Rodrigues M, and Fueyo N (2008) A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations: *Solar Energy*, v. 82, p. 929-939.
- Jungnickel C, Stock F, Brandsch T and Ranke J (2008) Risk assessment of biocides in roof paint - Part 1: Experimental determination and modelling of biocides leaching from roof paint: *Environmental science and pollution research*, v. 15 (3) p. 258-265.
- Lamesch J (2004) Histoire mondiale de la galvanisation: Arcelor.
- Lamprea K (2009) Caractérisation des métaux traces, hydrocarbures aromatiques polycycliques et pesticides transportés par les retombées atmosphériques et les eaux de ruissellement dans les bassins versants séparatifs péri-urbains.
- Le Bris A, and Robert-Sainte P (2009) Classification of roof materials for rainwater pollution modelization: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/1_4_7-W5/paper/LE_BRIS-152.pdf
- Leuenberger-Minger AU, Faller M and Richner P (2002) Runoff of copper and zinc caused by atmospheric corrosion *Materials and Corrosion*, v. 53, p. 157-164.
- MSI (2006) MSI Etude: le marché des matériaux de couverture des toits en France, MSI Marketing Research for Industry Ltd.
- MSI (2012) Marché des Produits de Couverture de Toit en France 2012, Nouvelles tendances et prévisions., MSI Marketing Research for Industry Ltd.
- Odnevall Wallinder I, Verbiest P, He W and Leygraf C (2000) Effects of exposure direction and inclination on the runoff rates of zinc and copper roofs: *Corrosion Science*, v. 42, p. 1471 - 1487.
- Odnevall Wallinder I, Bertling S and Leygraf C (2004) Environmental interaction of copper and zinc released from building materials as a result of atmospheric corrosion: *Metal 58 Jahrgang*, p. 557 - 560.
- Odnevall Wallinder I, Leygraf C, Karlen C, Heijerick D and Janssen CR (2001) Atmospheric corrosion of zinc-based materials: runoff rates, chemical speciation and ecotoxicity effects: *Corrosion Science*, v. 43, p. 809-816.
- Odnevall Wallinder I, Verbiest P, He W and Leygraf C (1998) The influence of patina age and pollutant levels on the runoff rate of zinc from roofing materials": *Corrosion Science*, v. 40, p. 1977-1982.
- Payet-Gaspard P (2012) Célébration du 100e anniversaire de l'acier inoxydable : L'histoire de sa création, Les grandes étapes par secteur, Son avenir: La revue spécialisée du nickel et de ses applications.
- Quek U and Förster J (1993) Trace metals in roof runoff: *Water, Air and Soil Pollution*, v. 68, p. 373 - 389.
- Robert-Sainte P (2009) Contribution des matériaux de couverture à la contamination métallique des eaux de ruissellement": *Sciences et Techniques de l'Environnement thesis, Université PARIS-EST, Paris*, 335 p.
- Robert-Sainte P, Gromaire MC, de Gouvello B, Saad M and Chebbo G (2009) Annual metallic flows in roof runoff from different materials: test bed scale in Paris Conurbation: *Environmental Science and Technology*.
- Sabin LD, Lim JH and Stolzenbach KD (2005) Contribution of trace metals from atmospheric deposition to stormwater deposition in a small impervious urban catchment: *Water Research*, v. 39 (16).
- Saget A, Chebbo G and Desbordes M (1995) Urban discharges during wet weather - what volumes have to be treated: *Water Science and Technology*, v. 32(1), p. 225-232.

- Saporta G (1990) Probabilités analyse des données et statistiques: Paris (ed) Editions technip.
- Schoknecht U, Gruycheva J, Mathies H, Bergmann H and Burkhardt M (2009) Leaching of Biocides Used in Facade Coatings under laboratory Test Conditions: Environmental Science & Technology, v. 43, p. 9321-9328.
- Schonnenbeck M and Neumann F (2013) Histoire du zinc, sa production, sa mise en oeuvre, RHEINZINK.
- Thévenot DR, Moilleron R, Lestel L, Gromaire MC, Rocher V, Cambier P, Bonté P and Colin JL (2007) Critical budget of metal sources and pathways in the Seine River basin (1994-2003) for Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn: Science of the total environment, v. 375, p. 180-203.
- Van de Voorde A (2012) Incidence des pratiques d'entretien des toitures sur la qualité des eaux de ruissellement - Cas des traitements par produits biocides, Université PARIS-EST, Paris.
- Van de Voorde A, Lorgeoux C, Gromaire MC and Chebbo G (2012) Analysis of quaternary ammonium compounds in urban stormwater samples: Environmental Pollution, v. 164, p. 150-157.
- Wilson DN (2003) Atmospheric corrosion of lead, Release of metals due to corrosion of materials, Munich, Germany.
- Wong T, Breen P and Lloyd S (2000) Water sensitive road design- Design options for improving stormwater quality of road runoff, Cooperative research centre for catchment hydrology.

Evaluation of roofing materials emissions at the city scale: Statistical approach for computing roofing area distribution

Evaluation des émissions des matériaux de couverture à l'échelle de la ville : Approche statistique de calcul de la répartition des surfaces des toitures

Emna SELLAMI-KAANICHE^{1, 2}, Bernard DE GOUELLO^{1, 2}, Marie-Christine GROMAIRE² et Ghassan CHEBBO²

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 11 rue Henri Picherit, BP 82341 44323 Nantes Cedex, France

² Université Paris-Est, LEESU (UMR MA 102), UPEC, UPEMLV, ENPC, AGROPARISTECH, F77455 ou F94010, 6 - 8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes - Champs sur Marne, MARNE LA VALLEE CEDEX 2, France
e-mail: sellamie@leesu.enpc.fr; bernard.degouvello@leesu.enpc.fr; gromaire@leesu.enpc.fr; chebbo@leesu.enpc.fr

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, les matériaux de couverture sont considérés comme une source importante de contamination des eaux de ruissellement urbaines. Dans le cadre de la directive européenne sur l'eau (2000/60 CE), une évaluation des flux de contaminants issus des ruissellements des toitures est donc nécessaire à l'échelle de la ville. Or, en passant à l'échelle de la ville, on se confronte à la réalité d'une diversité très importante et difficile à quantifier les matériaux de couverture. Le but de ce papier est de résoudre la problématique « comment quantifier les matériaux de couverture à l'échelle de la ville ? ». Pour ce fait, nous avons développé une approche statistique basée sur deux étapes. La première étape utilise la théorie de l'échantillonnage qui a pour but de définir la bonne taille de l'échantillon à tirer qui représente la proportion R (%) de la surface totale de toute zone urbaine à étudier. Pour déterminer la valeur de R (%), nous avons calculé et analysé les erreurs absolues E_a . Cette analyse montre qu'un tirage avec remise de $R=4\%$ de la zone d'étude donne de bons résultats. La deuxième étape consiste à appliquer la théorie d'estimation. En effet, après avoir déterminé la proportion R (%) d'échantillonnage, nous allons estimer les caractéristiques inconnues d'une autre zone en tirant un échantillon représentant $R(\%)$ de la surface totale de la zone étudiée. La validation de la taille d'échantillonnage a été effectuée sur deux zones de caractéristiques différentes.

ABSTRACT

Roofing materials are considered as a major source of urban runoff contamination. Today, in the context of the European Water Directive (2000/60 CE), an accurate evaluation of contaminant flows from roofs is thus required at the city scale, and therefore the development of assessment tools is needed. However, at the city scale, the important diversity of roofing materials represents a difficult task. In fact, the most restrictive step when estimating contaminant flows for large-scale territories is the estimation of the roofing materials surfaces area, for which no direct data exists. This paper aims to describe the proposal statistical approach for computing roofing materials area distribution. This method is based on two steps. The first one is the sampling theory which aims to define the required size of the selected sample which represents the proportion R (%) from any total urban area surface. The second step is based on applying the estimation theory. In fact, after determining the proportion R (%), we estimate the unknown distribution of roofing materials in an urban area by performing a sample representing R (%) from the total urban area surface. The reliability of the methodology has been proved for two different urban areas with known roofing materials distribution. Results obtained showed that a sample representing $R=4\%$ of the zone area should be randomly generated.

KEYWORDS

City scale, representative sample, roofing material, statistical approach

1 INTRODUCTION

Roofing materials are considered as a major source of urban runoff metal contamination. This observation was revealed by several research programs conducted since the 1990s (Förster, 1996; Gromaire-Mertz *et al.*, 1999; Odnevall Wallinder, 1998). Further undergoing research aims at extending runoff rates at the city scale (Robert-Sainte, 2009; Gromaire *et al.*, 2011). The roof area estimation is a fundamental input for evaluating roofing materials emissions. However, at the city scale, the information concerning roofing materials and their surfaces on an urban district does not exist currently in urban data banks. Some methods have already been developed for the evaluation of roof surface on a large-scale, in order to study building-integrated solar-energy applications (Izquierdo *et al.*, 2008; Bergamasco and Asinari, 2011) or to explore the potential of green infrastructure in adapting cities for climate change (Gill *et al.*, 2006). But, in these studies, the roofing materials were not taken into account. Other approaches (Le Bris *et al.*, 2009; Gromaire *et al.* 2002) have evaluated roofing materials surfaces using data obtained from aerial photographs and image classification software. The classification method based on aerial images was applied to an urban catchment with 2.25 km² of surface (Le Bris *et al.*, 2009). The obtained results show about 75% of well classified roofing surfaces. Nevertheless, this classification method presents some limitations especially in terms of confusion between different classes (eg: zinc in the shadow and slates in the sun). On the other hand, in order to apply this method, we need a high resolution image which requires an expensive cost and it is not usually available in every study site. Therefore, a method must be developed to estimate roofing materials distribution at the city scale. Ideally, a method to calculate the roofing materials surfaces should: (a) be accurate; (b) be reliable, with the possibility of computing or bounding the error of roofing materials areas estimation; (c) be inexpensive (low cost); (d) require few, global, available and standard input data; (e) produce geo-referenced results; (g) be scalable from local to global scales.

Given the size of the city, a complete census of the roofing material surfaces was unfeasible. Instead, a stratified random sampling technique was employed in conjunction with aerial photograph interpretation of surface roofing materials types. It is preferable to divide the city into distinctive homogenous strata in order to accurately characterize it. Stratified random sampling ensures that results can be extrapolated to the city level and is suitable for a heterogeneous population. Dividing a city into fairly homogeneous units reduces the variance of the estimates, thereby leading to more precise results (Nowak *et al.*, 2003).

Several considerations must be made in order to compute the roofing materials surfaces area. In fact, the choice of roofing material is extremely dependent on the history of the building (age, renewal), the urban planning (land use, building typology...), the social characteristics, the town regulation framework... For instance, in a previous work (Sellami-Kaaniche *et al.*, 2012), a set of rules have been developed for identifying the use of a roofing material at the city scale and have applied these rules to Créteil city. New maps of this city were then obtained from which homogeneous strata have been defined for identifying the distribution of roofing materials using a statistical approach.

In this work, a methodology based on a statistical approach to compute an estimation of roofing materials area distribution for a stratum is described. The methodology is applied to Créteil city (France). The data are processed with the aid of a Geographical Information System (QGIS) and Matlab was used to implement the statistical approach.

The remainder of this paper is organized as follows. In section 2, we describe the study site and the databases used. Then the developed methodology for computing roofing materials data is addressed in section 3. In section 4, experimental results are presented and discussed, and finally some conclusions are drawn in section 5.

2 CASE STUDY SITE

1.2 Urban Characterization

The goal of our research work is to develop a general method to quantify roofing material surfaces at the city scale. In this context we need to choose a case study to achieve two objectives. The first one is to validate the methodology. The second one is to make it possible to apply the methodology to other cities. Therefore we need to choose a complex site in which we try to have the different aspects of the city. In fact, the city should present a sufficient urban diversity. The selected city is Créteil (Department 94) located about 10 km from Paris (France). Créteil has 89 304 inhabitants (INSEE, 2008) distributed over 11.5 km² which represents a reasonable size for our research. This city is

divided into four major historical urban areas: Old center, Mont Mesly, New Créteil I, New Créteil II. Each area presents a specific urban organization which depends especially on the period of construction (PLU, 2010). The recent zone is New Créteil II. Figure 1.b shows the interesting urban and functional diversity of Créteil. In fact, we can see different land use represented by different color: industrial activities located nearby, health equipment, different types of building (apartment, individual houses). The land use is not homogeneous in the different urban areas of the city. For example the Old center mainly consists of individual habitat. However Mont Mesly is composed of collective habitat. This distribution is mainly due to historical factors. Finally, Créteil is easily accessible from the laboratory.

1.3 Databases

Créteil city presents a big diversity and a large number of buildings which represents an area of 6.18 km², about 54% of the city area. To quantify the different roofing materials, urban data banks (cadastre), land use database *MOS-IAU*¹¹⁸ (IAU-IDF, 2008) have been consulted and interviews have been conducted with various actors and stakeholders (eg: master of work, contracting authority, architect). These contacts showed that informations relating roofing materials and their surfaces on an urban district does not exist currently in urban data banks. Therefore, in a previous work (Sellami-Kaaniche et al, 2012), we have developed a set of rules for identifying the use of a roofing material at the city scale. These rules have been applied to Créteil city. In this work, we have associated different databases for Créteil: land use database *MOS-IAU*, images database *BD-topo*¹¹⁹ and *BD-ortho*¹²⁰ (IGN, 2008). The obtained results correspond to two maps of Créteil city (see Figure 1).

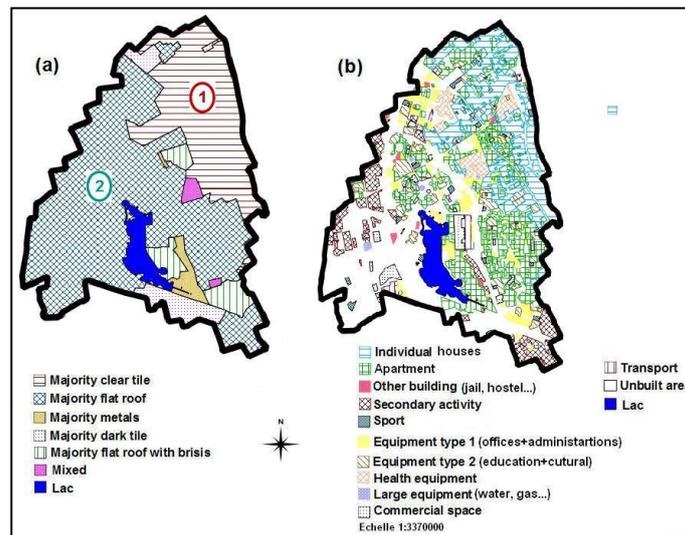


Figure 131 : (a) Material distribution map (b) Building class map

The first map represents the roofing material distribution (see Figure 1.a). Each color represents an area with the same material distribution. The second one is a building class map (see Figure 2.b) established from reorganizing the *MOS-IAU* database. Each color represents a building class. These maps are the basis of the statistical approach.

Issue

By overlaying these two maps (Figure 1), we consider that each building class in Figure 1.b located in an area of the Figure 1.a is a homogeneous urban area in terms of building types and the historical location. We define homogeneous urban area as an area representing specific probabilities of roofing material distribution. In this context, the question that arises is: "How to evaluate the roofing materials distribution for each homogeneous urban area?"

¹¹⁸ IAU: Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile-de-France: institute of planning and development for the Greater Paris region.

¹¹⁹ BD-Topo is a database for Topographic Information IGN roughly corresponding to the traditional content of the map at 1: 25,000, with a much higher precision of the order of 1:10000 or 1:5000, made from an aerial image. These images define only the built by masking inbuilt areas (roads, gardens ...).

¹²⁰ BD-ortho images come from IGN's (Institut Géographique National) which contains digital colour ortho-photos with three or four (red-green-blue-near infrared) bands and with a 50 cm ground resolution

3 METHOD FOR ROOFING MATERIALS AREA ESTIMATION, AND APPLICATION TO CRÉTEIL

In this section, we focus on describing the method of evaluating the roofing materials distribution for a stratum. We define a stratum as a building class in Figure 1.b located in an area in Figure 1.a. For each stratum we are looking to evaluate the proportion p_i of each material i . The proposed methodology is explained through its application to Créteil. To solve the previous problem, we propose to apply an inferential statistic which aims to extend the observed sample properties to the entire population and to validate or invalidate hypotheses made *a priori* or after an exploratory phase (Saporta, 1990).

The method developed is based on two steps. The first step is the sampling theory which aims at determining the number of samples n_r , which is required for all existing materials in a stratum. This step involves taking a stratum with known characteristics area (N (m²)), proportion of different existing materials (p_i (%)), which allows us to make the sampling. To make a choice of an optimized sample size, absolute error E_a has been computed. The second step is the application of the estimation theory. Indeed, after determining the number of required samples n_r , we determine the proportion $R = n_r/N$ and then we estimate the unknown characteristics of a population by selecting a sample representing R (%) from the total population area. To validate this proportion R (%) we have tested two other stratums with different characteristics.

In what follows, we will use the different symbols defined in table 1.

Table 71 : Symbols definition

| Symbol | Definition | Symbol | Definition |
|-------------------------|---------------------------------------|-----------------|--|
| N (m ²) | zone 1 surface area | N_b | Number of building in zone 1 |
| n_r (m ²) | Sample size required in zone 1 | $R = n_r/N$ (%) | proportion of the required sample |
| n (m ²) | sample size tested | p_i (%) | real proportion of material i in zone 1 |
| k | the number of draws from a population | $p_{e,i}$ (%) | proportion of material i in zone 1 in the sample e |
| C_b (m ²) | cumulative area | CI (%) | confidence interval |
| E_a (%) | absolute error | r | a value selected in an uniform random variable between 1 and C_b |

3.1 Sampling Strategy-Monte Carlo simulation

The chosen stratum is zone 1: the individual houses class (Figure 1.b) located in area **(1)** (Figure 1.a). For this zone we have associated, with QGIS, the different previous maps with BD-topo and BD-ortho images and we have obtained a database T of existing buildings (numbered $1 \dots N_b$) and their roofing materials (see Table 2). For each building, roofing material has been identified by looking to the ortho-photo. From this database we have identified the roofing materials distribution for zone 1 (see Table 3).

To study the impact of sampling on the roofing materials proportions uncertainty, we have used a Monte Carlo simulation. To perform this study, samples should be representative. In fact, it is necessary that each element of the zone has an equal chance of belonging to this sample. Thus, a random sampling technique of independent individuals of 1 m² from a population composed of the total roofs surfaces areas (N (m²)) was employed. In this case, the observations become random variables following a probability law that will be identified (Saporta, 1990). The random variable is the roofing material. Each sample has a statistical parameter: the proportion $p_{e,i}$ of each material i for which related statistical law has to be defined.

To proceed, a number of samples n (individuals of 1 m²) (where $n \leq N$) was randomly generated among the surface N (m²). To generate each sample n , a variable r between 1 and C_b (see Table 1) has been generated (with and without replacement, the final choice of the draw strategy is defined in section 4.3). Then, in table 1, for each value r we seek (in the column of cumulative area) for the first surface greater or equal to r and we identify the roofing materials corresponding to that surface.

Finally, we obtain the proportion for each material for each sample. The process is repeated k times for each value of n (the choice of k value is defined in section 4.1).

For each material, we plot the different statistics of its distribution (the mean, maximum and minimum values, confidence interval at level of 95% computed using the method of percentiles) and for the two draws (repeated k times) with and without replacement. We also plot the actual distribution for each material to be compared with the simulation results. In addition, we have verified, using the Shapiro-Wilk normality test at the 5% threshold, that for $n \geq 2$, the normal distribution of each material is readily accepted. Finally, we have determined from the different value of n the number of samples n_r which is required for all roofing materials. This was being done for each material.

Table 72: Urban database for zone 1

| | Building | Area (m ²) | Cumulative area (m ²) | Roofing material (j) |
|---|----------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| I | 1 | $S_1=100$ | $C_1=100$ | Clear tile |
| | 2 | $S_2=40$ | $C_2=S_1+ S_2=140$ | Slates |
| | ... | ... | ... | ... |
| | N_b | S_{N_b} | $C_b = N$ | |

Table 73 : The real roofing materials distribution for zone 1

| Material | Area (m ²) | Proportion p_i (%) |
|------------------|------------------------|----------------------|
| Clear tile | 2107.05 | 33.68 |
| Dark tile | 1228.71 | 19.64 |
| Slates | 889.67 | 14.22 |
| Zinc | 833.95 | 13.33 |
| Flat roof | 983.38 | 15.72 |
| Steel | 116.58 | 1.86 |
| Other material | 97.50 | 1.56 |
| Total (N) | 6256.84 | 100.00 |

3.2 Estimation

The objective of this section is to describe the method of estimating roofing materials distribution (p_i : proportion of material i) in a given zone by sampling (see Figure 2). For this purpose, we need to apply the Theorem for Proportions (Saporta, 1990) in which the sampling distribution for samples (with size $n \geq 30$ and $p_{e,i}$: proportion of material i in the sample e) is approximately normal, so :

$$p_{e,i} \rightarrow N\left(p_i; \sigma_{p_i} = \sqrt{\frac{p_i(1-p_i)}{n}}\right)$$

The point estimate of p_i is $p_{e,i}$ and an estimation of standard error is given by:

$$\sigma_{p_i} = \sqrt{\frac{p_{e,i}(1-p_{e,i})}{n}}$$

A confidence-level coefficient of $\alpha = 0.05$ has been chosen and therefore:

$$p_i \in [p_{e,i} - 1,96 \cdot \sigma_{p,i}, p_{e,i} + 1,96 \cdot \sigma_{p,i}]$$

Before applying this theorem in a given zone to estimate its roofing material distribution, we need to choose the number of samples n_r and the draw strategy. Thus, we have compared the different statistics computed for each draw (with and without replacement) with statistics related to the Theorem for Proportions. In fact, we have applied this theorem for zone 1 with the same previous conditions.

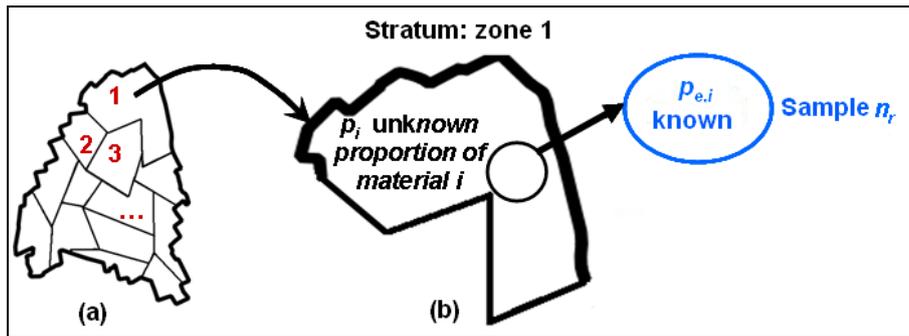


Figure 132 : (a) Créteil city divided into homogeneous strata; (b) Estimation strategy for a stratum

4 RESULTS AND DISCUSSIONS

4.1 The number of draws

To choose the required k value for each value n , we have tested some arbitrarily values of k for different values of n . The illustration was made for clear tile material as an example (see Figure 3). In this Figure, from $k=1000$ upwards, the different computed statistics (mean value, confidence interval) become stable. In what follows, we have kept $k=1000$.

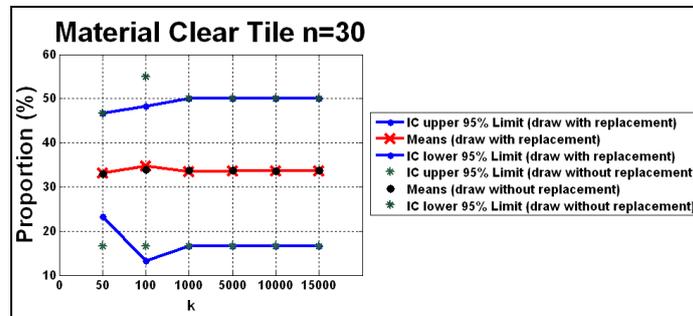


Figure 133 : k value variability- case of Clear tile and for $n = 30$

4.2 Analysis of sampling simulations

Sampling simulations with and without replacement were applied. In Figure 4, confidence intervals, the mean, maximum and minimum value and the actual proportion for clear tile material are illustrated.

As we can see in Figure 4, the mean computed over 1000 draws (with and draw without replacement) for each sample n coincides with the actual proportion of the clear tile. This observation confirms our choice of $k=1000$ and shows that the sampling strategy represents the reality of the roofing material distribution in zone1. This result was validated for all roofing materials (slates, steel, dark tile...).

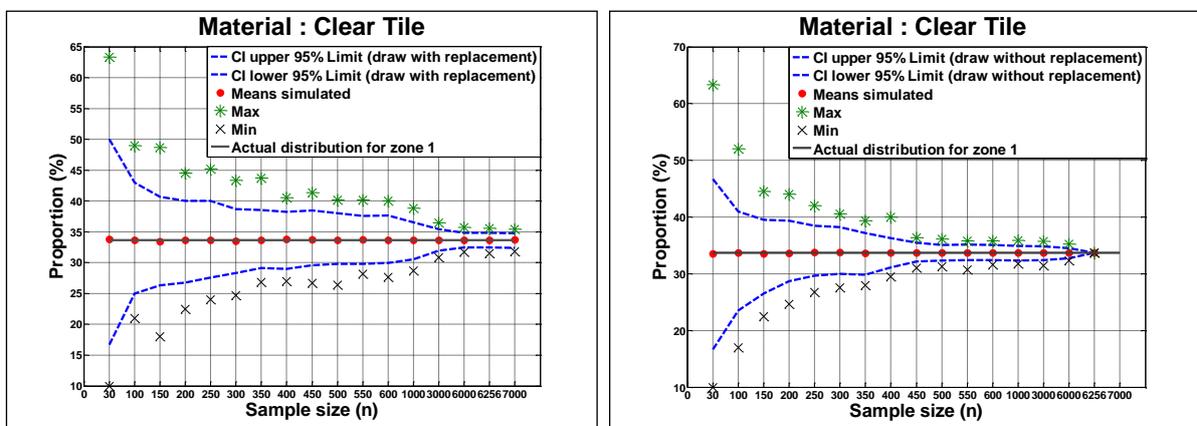


Figure 134 : Computing statistics for the clear tile material for the two draws strategies -Zone1-

4.3 Sampling strategy choice

The comparison of the different statistics computed for each draw (with and without replacement) with statistics related to the Theorem for Proportions, shows that the mean values computed from the theorem coincide with those calculated for each draw. The illustration was made for the slates material as an example (see Figure 5). Theoretically, the draw with replacement is used to ensure that each independent element of the population has an equal chance of belonging to the sample. Figure 5 shows that the sampling simulation results obtained from the draw with replacement (dotted red line (-)) coincide with those of the Theorem for Proportions (solid blue line). In addition, for $n \leq 250$, limits of the confidence interval for the two draws (with and without replacement) coincide with those of the Theorem for Proportion. However, for $n > 250$ the limits of the confidence interval for the draw without replacement (green point in Figure 5) do not coincide with those of the theorem. Therefore, draw without replacement could be used only for $n \ll N$.

In what follows, for the estimation method, the draw with replacement will be elaborated.

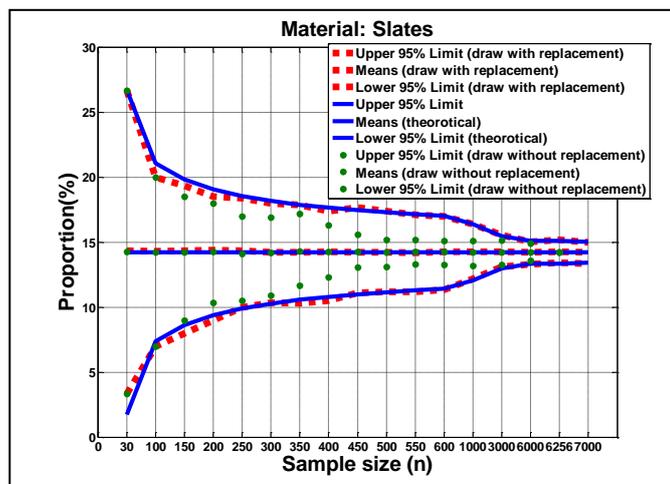


Figure 135 : Comparison computed statistics for draws with replacement and without replacement with computed statistics for the Theorem for Proportions - Slates case -

4.4 The sample number choice

The objective of this section is to determine the number of samples n_r which is required for all roofing materials. Table 4 shows that sample size greatly varies from one material to another for the same confidence interval. In fact, to obtain a confidence level of $\pm 20\%$ for clear tile, we need a sample of 182 m², whereas for steel, we need $n=5250$ m². This large difference can be explained by the actual roofing material distribution in zone 1. Indeed, table 3 shows that clear tile represents 33.7 % of the zone 1 area while steel represents only 2%.

In this context, absolute error E_a was computed for each material. This error is the result of the multiplication of confidence interval obtained for each n with the real proportion of the material i .

Table 74 : Computed confidence interval for each material for different sample size value

| Material Sample size (n) (m ²) | CI confidence interval (\pm) (%) | | | | | | |
|---|--------------------------------------|-----------|--------|------|-----------|-------|----------------|
| | Clear Tile | Dark Tile | Slates | Zinc | Flat roof | Steel | Other material |
| 100 | 28 | 42 | 40 | 43 | 44 | 111 | 168 |
| 300 | 15 | 23 | 26 | 30 | 23 | 75 | 76 |
| 600 | 12 | 15 | 19 | 18 | 17 | 60 | 60 |
| 3000 | 5 | 6 | 9 | 8 | 9 | 26 | 28 |
| 6000 | 4 | 5 | 6 | 6 | 6 | 17 | 20 |

Results are obtained in Figure 6. Figure 6 shows the evolution of the absolute error E_a with the sample size for each roofing material. The analysis of the shape of the different curves shows that the zone Z is a critical zone for the E_a evolution. In fact, for the left hand side of the zone Z ($n \leq n^-$), E_a fluctuations become much more important when fewer samples have been taken. However, for the right hand side of the zone Z ($n \geq n^+$), E_a has progressively stabilized. We can observe that when E_a is very low, the roofing material proportions are closer to the real distribution. Therefore, the range of acceptable sample size is the range n^- for n^+ corresponding to a range of absolute errors between 1% and 7% for all roofing materials. From this range, we choose $n_r=250$ m² (a value in the middle of zone Z) as the required sampling size. In fact, for n values close to n^- , absolute error is very high and for n close to n^+ , the sampling size becomes important. In addition, we look to optimize this size. Thus, we define n_r , representing $R=4\%$ of the zone area as the size sampling needed. For this size we get a confidence level $\leq 30\%$ for the roofing materials with high densities but absolute error low values (see Table 5).

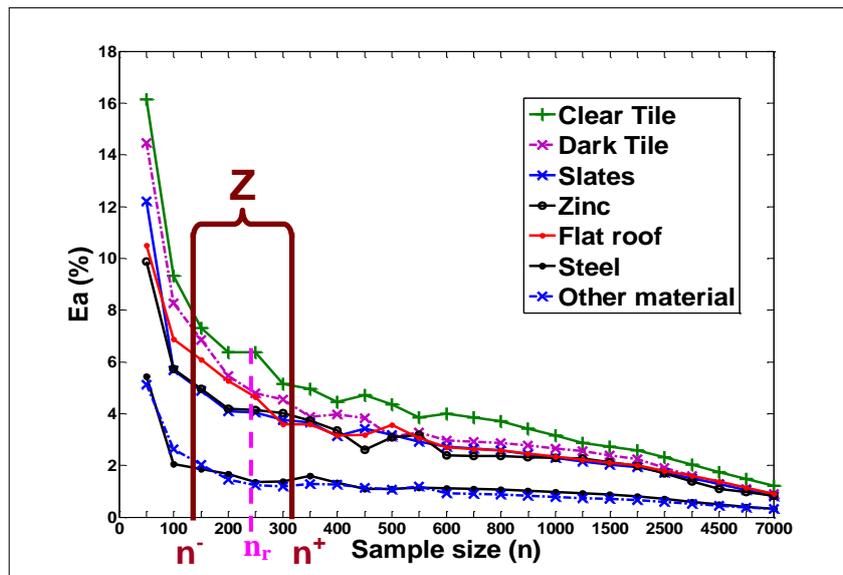


Figure 136 : E_a variability for different samples sizes for each material

Table 75 : E_a value for $n_r=250$

| $n=250$ m ² | Clear Tile | Dark Tile | Slates | Zinc | Flat roof | Steel | Other material |
|------------------------|------------|-----------|--------|------|-----------|-------|----------------|
| E_a (%) | 6.37 | 4.79 | 4.05 | 4.14 | 4.65 | 1.36 | 1.24 |

4.5 Estimation and validation of the sampling size

In this section, we firstly describe the operational method for roofing material distribution estimation in an unknown area. Then, we will validate the choice of sampling size by estimating roofing material distribution in two new stratum (zones 2 and 3). In each stratum, we have identified the real roofing material distribution as described in section 3.1 for zone 1. For each zone, a random sample representing $R=4\%$ of the zone area was generated with replacement. The sampling strategy is based on randomly generating independent individuals of 1 m² representing 4% of the stratum roofs area (N (m²)). Each 1 m² belongs to a specific building with specific roofing material. So, we obtain two databases, the first one is a database of different buildings (with their roof surface) existing in the stratum, and the second one is composed of the selected surfaces for each building in the sample. By associating BD-topo and BD-ortho we identify its roofing material. Therefore, we compute for each material i :

- in the stratum (area (N (m²)): surface area of each material i and the proportion of different existing materials (p_i (%)),
- in the sample e representing 4% of the stratum area (N) : surface area of each material i and the proportion of materials ($p_{e,i}$ (%))

Finally, we have computed the confidence interval, and the absolute error values (see table 6 and 7).

The two zones 2 and 3 are described as follows:

- zone 2 ($N_2=81100.11 \text{ m}^2$): apartment class (Figure1.b) located in area **(2)** (Figure1.a)
- zone 3 ($N_3=105304.04 \text{ m}^2$): secondary activity class (Figure 1.b) located in area **(2)** (Figure1.a)

Table 6 and 7 show that E_a absolute error values are low for the two zones. It is also less than 1% for all roofing material. The computed confidence level is very low for roofing material distribution with high density, this is the case of flat roof with 92% of real proportion in zone 2 and 87% in zone 3, we get a confidence level $\leq 1\%$ so a high precision. For material with confidence level $\geq 30\%$, E_a is still low and their real proportions do not exceed 2% in the whole zone 2 or 3. This indicates that the results gained through this method are truly representative and can be used with confidence.

Table 76 : Results obtained for zone 2

| Material | Real roofing material distribution (%) | Material proportion (%) for n = 3244 m ² (4% of zone 2 area) | CI confidence interval (\pm) (%) | E_a (%) |
|----------------|--|---|--------------------------------------|--------------|
| Dark Tile | 5,58 | 5,52 | 11,48 | 0,641 |
| Slates | 1,18 | 1,23 | 33,28 | 0,393 |
| Flat roof | 91,95 | 91,95 | 0,92 | 0,842 |
| Steel | 0,69 | 0,52 | 8,16 | 0,056 |
| Other material | 0,6 | 0,77 | 73,30 | 0,440 |

Table 77 : Results obtained for zone 3

| Material | Real roofing material distribution (%) | Material proportion (%) for n = 4213 m ² (4% of zone 3 area) | CI confidence interval (\pm) (%) | E_a (%) |
|----------------|--|---|--------------------------------------|---------------|
| Zinc | 1,07 | 1,31 | 38,427 | 0,4127 |
| Flat roof | 86,50 | 86,31 | 1,002 | 0,8668 |
| Steel | 8,78 | 8,64 | 12,859 | 1,1291 |
| Other material | 3,65 | 3,74 | 10,171 | 0,3709 |

5 CONCLUSIONS

In this paper we have developed a statistical method to quantify roofing materials distribution at the city scale. Given the size of the city, a stratified random sampling technique was proposed. We have divided the city into distinctive homogenous strata. In this paper, we have focused on describing the statistical approach to evaluate roofing materials distribution for a stratum. This method is based on two steps. The first one is the sampling theory which aims to determine the number of samples n_r required for all roofing materials. The second step is the application of the estimation theory. Indeed, after determining the number of samples n_r , we determine the proportion $R = n_r/N$ and then we estimate the unknown characteristics of a stratum by generating a sample representing R (%) from the total area of the new stratum. To validate this proportion R we have tested two other strata with different characteristics. The obtained results show that a random sample representing $R=4\%$ of the zone area could be drawn from the available population with and without replacement. In fact, we consider that a sample representing 4% of the whole stratum area is very small, thus the draw without replacement could be used. Then, the estimated roofing material distribution of the zone will be established by applying theorem for proportions. Thus, we will obtain an estimation of each roofing material proportion by computing the confidence interval.

The object of our future study is to evaluate the roofing materials distribution for the entire city. Firstly, the city should be divided into fairly homogenous urban areas, and each urban area represents a

stratum. Then, for each stratum (with known area) a sample representing $R=4\%$ of the stratum area is randomly generated. After that, using GIS software we associate different maps BD-topo, BD-ortho and the map of strata to identify the roofing material sample generated for each stratum. Finally we obtain the roofing materials proportions and their confidence intervals.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study has been conducted as part of the OPUR research program. The authors gratefully acknowledge the Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) for their financial support and Ali Hannouche for his helpful suggestions in the statistical approach.

LIST OF REFERENCES

- Bergamasco L., Asinari P. (2011) *Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy)*. Solar Energy 85:1041-1055
- Förster J., (1996). - *Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration*. Water, Science and Technology, 33 (6): 39 - 48.
- Gill S.E., Handley J.F., Ennos A.R., Pauleit A.R. (2006) *Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure*. Built environment 33(1):115-133
- Gromaire-Mertz, M., Garnaud, S., Gonzalez, A. et Chebbo, G., (1999). - *Characterisation of urban runoff pollution in paris*. Water, Science and Technology, 39 (2): 1-8.
- Gromaire, M. C., Chebbo, G. et Constant, A. (2002). -*Incidence of zinc roofing on urban runoff pollutant loads: The case of Paris*. Water, Science and Technology 45(7): 113 - 122.
- Gromaire M.C., Robert-Sainte P., Bressy A., Saad M., de Gouvello B. et Chebbo G., (2011). - *Zn and Pb emissions from roofing materials-Modelling and mass balance attempt at the scale of a small urban catchment*. Water Science and Technology, 63 (11): 2590-2597.
- IAU-IDF. <http://www.iaurif.org/>
- INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques) (2008): <http://www.recensement-2008.insee.fr/chiffresCles.action?zoneSearchField=CRETEIL&codeZone=94028-COM&idTheme=3>
- Izquierdo S., Rodrigues M., Fueyo N. (2008). *A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations*. Solar Energy 82:929-939
- Le Bris A. et Robert-Sainte P. (2009). - *Classification of roof materials for rainwater pollution modelization*.
- Nowak, D., J., Crane, D., E., Stevens, J., C. and Hoehn, R., E. (2003). *The Urban Forests Effects (UFORE) Model: Field Data Collection Manual*. USDA Forest Service, Syracuse.
- Odnevall Wallinder I., Verbiest P., He W. et Leygraf C., (1998). - *The influence of patina age and pollutant levels on the runoff rate of zinc from roofing materials*. Corrosion Science 40: 1977-1982
- PLU (Plan Local de l'Urbanisme) de Créteil (2010). <http://www.ville-creteil.fr/PDF/PDF-vm/PDF-urb/Rapport%20de%20presentation%20PLU%202010.pdf>
- Robert-Sainte P., (2009). - *Contribution des matériaux de couverture à la contamination métallique des eaux de ruissellement*. Ecole doctorale "Ville et environnement". Paris: Université PARIS-EST, 335.
- Saporta G. (1990) *Probabilités, analyse des données et statistiques*. Editions technip, Paris
- Sellami-Kaaniche E., De Gouvello B., Gromaire M.C. and Chebbo G., (2012). *Règles de choix des matériaux de couverture dans une ville, Cas de la ville de Créteil*. 5èmes Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine Strasbourg (France)

EJSW-2013

Evaluation of gutter and valley materials emissions at the city scale: Statistical approach for computing gutter and valley lengths

E. Sellami-Kaaniche*, **, B. de Gouvello*, **, M.C Gromaire** et G. Chebbo**

* Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 11 rue Henri Picherit, BP 82341 44323 Nantes Cedex, France. (email: sellamie@leesu.enpc.fr; bernard.degouvello@leesu.enpc.fr)

** Université Paris-Est, LEESU (UMR MA 102), UPEC, UPEMLV, ENPC, AGROPARISTECH, F77455 ou F94010, 6 - 8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes - Champs sur Marne, MARNE LA VALLEE CEDEX 2, France. (email: gromaire@leesu.enpc.fr; chebbo@leesu.enpc.fr)

Abstract: Roofing materials are considered as a major source of urban runoff contamination. Today, in the context of the European Water Directive (2000/60 CE), an accurate evaluation of contaminant flows from roofs is thus required at the city scale, and therefore the development of assessment tools is needed. However, at the city scale, the important diversity of roofing materials represents a difficult task for the quantification. In fact, the most restrictive step when estimating contaminant flows for large-scale territories is the estimation of the roofing materials surfaces area, for which no direct data exists. This study focuses on describing the method to evaluate gutter and valley lengths at the city scale. The proposal approach is based on statistical approach. The city was divided into homogenous urban area. Then a stratified random sampling technique was employed. The reliability of the methodology has been proved for three different urban areas (drained by sewer system) with known roofing materials distribution and known gutter and valley lengths. Results obtained showed that a sample representing R=4% of the urban area ensure an absolute error less than 2% for gutter and valley length values.

Keywords: City scale, gutter, roofing material, statistical approach, valley

1 INTRODUCTION

Several studies lead since the 1970's have highlighted the pollution from urban wet weather discharge and its negative impact on receiving water (Saget *et al.*, 1995; Ellis and Hvitved Jacobsen, 1996). Roofing materials are considered as a major source of urban runoff metal contamination received by sewer system. This observation was revealed by several research programs conducted since the 1990s (Förster, 1996; Odnevall Wallinder *et al.*, 1998; Gromaire-Mertz *et al.*, 1999). In this context, annual metallic runoff rates at different scales (test-bed and roof) have been evaluated, for the different roofing materials commonly used in Paris and suburbs (Robert-Sainte, 2009). Further undergoing research aims at extending runoff rates at the city scale (Robert-Sainte, 2009; Gromaire *et al.*, 2011). The roof area estimation is a fundamental input for evaluating roofing materials emissions. However, at the city scale, the information concerning roofing materials and their surfaces on an urban district does not exist currently in urban data banks. Some methods (Gromaire *et al.*, 2002; Le Bris and Robert-Sainte, 2009) have evaluated roofing materials surfaces using data obtained from aerial photographs and image classification software. This classification method based on aerial images was applied to an urban catchment with 2.25 km² of surface. This method allows only identifying and quantifying roof area. For the other element of roof (ex: gutter and valley) no method has been found to identify and evaluate their materials surfaces. Therefore, a method must be developed to quantify gutter and valley lengths at the city scale.

In this work, a methodology was developed to quantify gutter and valley lengths at the city scale. The method is based on a statistical approach and was applied to Créteil city (France). The data are processed with the aid of a Geographical Information System (QGIS) and Matlab was used to implement the statistical approach.

2 METHODOLOGY

Case study site

The selected city is Créteil (Department 94) located about 10 km from Paris (France). Créteil has 89 304 inhabitants (INSEE, 2008) distributed over 11.5 km². Créteil city presents a big diversity and a large number of buildings which represents about 54% of the city area.

In a previous work, we have developed a set of rules for identifying the use of a roofing material at the city scale. These rules have been applied to Créteil city. In this work, we have associated different databases for Créteil: land use database MOS-IAU¹²¹, images database BD-topo¹²² and BD-ortho¹²³. The obtained results correspond to two maps of Créteil city (see Figure 1). The first map represents the roofing material historical distribution (see Figure 1.a). Each color represents an area with the same material historical distribution. The second one is a building class map (see Figure 2.b) established from reorganizing the MOS-IAU database. Each color represents a building class.

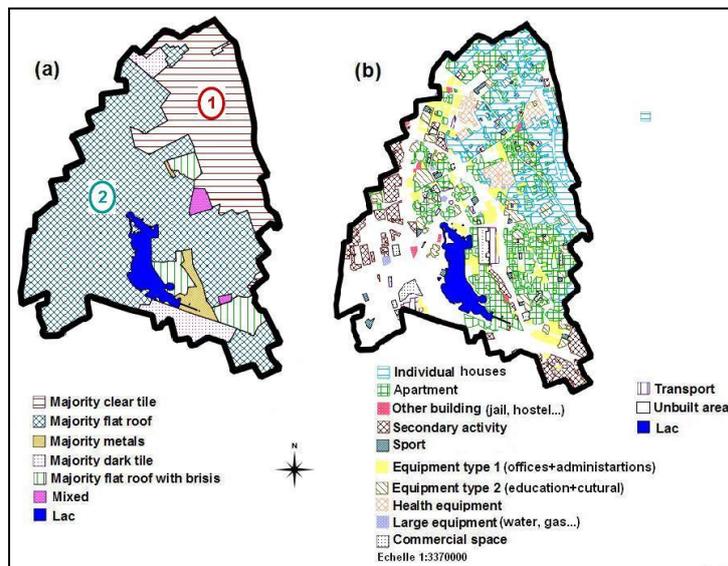


Figure 137 : (a) Material distribution map (b) Building class map

Method for gutter and valley lengths estimation and application to Créteil

Given the size of the city, a complete census of the roofing material surfaces was unfeasible. In a previous work (Sellami-Kaaniche *et al.*, 2013, submitted), we have developed a statistical approach to evaluate roofing material area distribution at the city scale. This method was based on a stratified random sampling technique which was employed in conjunction with aerial photograph interpretation of surface roofing materials types (ex: zinc, tile).

The city was divided into distinctive homogenous strata in order to accurately characterize it. The homogenous strata are obtained by overlaying the two previous maps (Figure 1). In fact, we consider that each building class in figure 1.b located in an area of the figure 1.a is a homogeneous urban area in terms of building types and the historical location. We define

¹²¹ IAU: institute of planning and development for the Greater Paris region (<http://www.iaurif.org>)

¹²² BD-Topo is a database for Topographic Information IGN made from an aerial image. These images define only the built by masking inbuilt areas

¹²³ BD-ortho images come from IGN's (Institut Géographique National) which contains digital colour ortho-photos with a 50 cm ground resolution.

homogeneous urban area as an area representing specific probabilities of roofing material distribution.

The statistical approach to evaluate roofing materials distribution for a stratum (roofs area (N (m^2))) was based on two steps. The first one is the sampling theory which aims to determine the number of samples required n_r for all roofing materials. The second step is the application of the estimation theory. Indeed, after determining the number of samples n_r , we determine the proportion $R = n_r/N$ and then we estimate the unknown characteristics of a stratum by generating a sample representing R (%) from the total area of the new stratum. To validate this proportion R we have tested three stratums with different characteristics. The obtained results have shown that a random sample representing $R=4\%$ of the zone area could be draw with or without replacement. Then, the estimated roofing material distribution of the zone will be established by applying theorem for proportions. Thus, we will obtain an estimation of each roofing material proportion by computing the confidence interval. This statistical method will be applied to quantify gutter and valley lengths. We propose to evaluate gutter and valley lengths for each roofing material type.

The sampling strategy is based on randomly generating independents individuals of $1 m^2$ representing 4% of the stratum roofs area (N (m^2))). Each $1 m^2$ belongs to a specific building with specific roofing material. So, we obtain two databases, the first one is a database of different buildings (with their roof surface ($S_{r,b}$ (m^2))) existing in the stratum, and the second one is a database of buildings with their selected surfaces ($S_{s,b}$ (m^2))) in the sample. By associating BD-topo and BD-ortho we can measure with QGIS the length of valley ($l_{v,b}$ (m)) and gutter ($l_{g,b}$ (m)) for each building and also identify its roofing material. For each $1 m^2$ of roof surface ($S_{r,b}$ (m^2))) we associate x_r (m) of gutter length and y_r (m) of valley length selected in each building. Then, in the sample, the length of gutter ($l_{g,s}$ (m)) and valley ($l_{v,s}$ (m)) will be evaluated as follow:

$$x_r = \frac{l_{g,b}}{S_{r,b}} ; \quad l_{g,s} = x_r \times S_{s,b} ; \quad y_r = \frac{l_{v,b}}{S_{r,b}} ; \quad l_{v,s} = y_r \times S_{s,b}$$

Finally, we compute for each material i we obtain:

- in the stratum: (area (N (m^2))), proportion of different existing materials (p_i (%)), surface area of each material i (S_i), the real gutter length $l_{g,i}$ (m) and the real valley length $l_{v,i}$ (m)
- in the sample representing 4% of the stratum area (N) : surface area of each material i ($S_{s,i}$), gutter length $l_{g,s,i}$ (m) and valley length $l_{v,s,i}$ (m).

3 RESULTS

The method of evaluating gutter and valley lengths at the city scale was applied and validated for three strata with known and different characteristics. The three tested strata are described as follows:

- Zone1 ($N_1=6256.84 m^2$): individual houses class (Figure 1.b) located in area (1) (Figure 1.a).
- Zone2 ($N_2=81100.11 m^2$): apartment class (Figure1.b) located in area (2) (Figure1.a)
- Zone3 ($N_3=105304.04 m^2$): secondary activity class (Figure 1.b) located in area (2) (Figure1.a)

Uncertainty in the gutter and valley lengths evaluation

Results obtained (see table1) in each sample have been compared to the real values in each stratum by computing an absolute error ($E_{a,g}$ and $E_{a,v}$). This latter is the difference between $R_{g,r,i}$ real ratio and $R_{g,s,i}$ ratio in the sample for gutter length and the difference between $R_{v,r,i}$ real ratio and $R_{v,s,i}$ ratio in the sample for valley length.

$$R_{g,r,i} = \frac{l_{g,i}}{S_i} \times 100 ; \quad R_{g,s,i} = \frac{l_{g,s,i}}{S_{s,i}} \times 100 ; \quad R_{v,r,i} = \frac{l_{v,i}}{S_i} \times 100 ; \quad R_{v,s,i} = \frac{l_{v,s,i}}{S_{s,i}} \times 100$$

$$E_{a,g} = R_{g,r,i} - R_{g,s,i} ; \quad E_{a,v} = R_{v,r,i} - R_{v,s,i}$$

The table 1 shows that for the three zones absolute error for the gutter and valley lengths is less than 2%. Therefore, the developed method ensures good results in computing gutter and valley lengths at the city scale.

Table 78 : Absolute errors values computed for each material and for the three zones

| Material | Zone 1 | | | Zone 2 | | | Zone 3 | | |
|----------------|-------------------------|---------------|---------------|-------------------------|---------------|---------------|-------------------------|---------------|---------------|
| | Proportion p_i (%) | $E_{a,g}$ (%) | $E_{v,n}$ (%) | Proportion p_i (%) | $E_{a,g}$ (%) | $E_{v,n}$ (%) | Proportion p_i (%) | $E_{a,g}$ (%) | $E_{v,n}$ (%) |
| Clear tile | 33,7 | 0.51 | 1.55 | x | x | x | x | x | x |
| Dark tile | 19,6 | 0.44 | 0.31 | 5,6 | 0.08 | 0.00 | x | x | x |
| Slates | 14,2 | 1.25 | 2 | 1,2 | 1.73 | 0.04 | x | x | x |
| Zinc | 13,3 | 0.98 | 0.50 | x | x | x | 1,1 | 0.46 | 0.00 |
| Flat roof | 15,7 | 0.00 | 0.00 | 91,9 | 0.00 | 0.00 | 86,5 | 0.00 | 0.00 |
| Steel | 1,9 | 0.00 | 0.80 | 0,7 | 0.01 | 1.03 | 8,8 | 0.17 | 0.00 |
| Other material | 1,6 | 0.00 | 0.13 | 0,6 | 0.99 | 0.60 | 3,6 | 0.28 | 0.00 |

4 CONCLUSION AND PERSPECTIVES

This work shows that the quantification of gutter and valley lengths at the city scale is possible, using the statistical method. In fact, the city should be divided into fairly homogenous urban areas, and each urban area represents a stratum. Then, for each stratum (with known area) a sample representing $R=4\%$ of the stratum area is randomly generated. After that, for each sample, using GIS software we associate different maps BD-topo, BD-ortho and the map of strata to identify the roofing material, the gutter and the valley lengths. Finally we obtain the roofing materials proportions, gutter and the valley lengths for each material type.

The next task is to identify the gutter and valley material for each roofing material type and finally evaluate their contaminants emissions at the city scale.

ACKNOWLEDGEMENTS: This study has been conducted as part of the OPUR research program. The authors gratefully acknowledge the Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) for their financial support.

5 BIBLIOGRAPHE

- Ellis, J.B., and Hvitved Jacobsen, T. (1996). Urban drainage impacts on receiving waters. *Journal of Hydraulic Research* 34 (6), 771-783.
- Förster, J. (1996). "Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration". *Water, Science and Technology* 33 (6), 39 - 48.
- Gromaire, M.C., Chebbo, G., and Constant, A. (2002). Incidence of zinc roofing on urban runoff pollutant loads: The case of Paris. *Water, Science and Technology* 45, 113-112.
- Gromaire, M.C., Robert-Sainte, P., Bressy, A., Saad, M., de Gouvello, B., and Chebbo, G. (2011). "Zn and Pb emissions from roofing materials-Modelling and mass balance attempt at the scale of a small urban catchment". *Water Science and Technology* 63, 2590-2597.
- Gromaire-Mertz, M., Garnaud, S., Gonzalez, A., and Chebbo, G. (1999). Characterisation of urban runoff pollution in paris. *Water, Science and Technology* 39, 1-8.
- INSEE. (2008). (Institut national de la statistique et des études économiques): <http://www.recensement-2008.insee.fr/chiffresCles.action?zoneSearchField=CRETEIL&codeZone=94028-COM&idTheme=3>.
- Le Bris, A., and Robert-Sainte, P. (2009). Classification of roof materials for rainwater pollution modelization.
- Odnevall Wallinder, I., Verbiest, P., He, W., and Leygraf, C. (1998). The influence of patina age and pollutant levels on the runoff rate of zinc from roofing materials". *Corrosion Science* 40, 1977-1982.

- Robert-Sainte, P. (2009). "Contribution des matériaux de couverture à la contamination métallique des eaux de ruissellement". Sciences et Techniques de l'Environnement, Université PARIS-EST, Paris.
- Saget, A., Chebbo, G., and Desbordes, M. (1995). Urban discharges during wet weather - what volumes have to be treated. *Water Science and Technology* 32(1), 225-232.
- Sellami-Kaaniche, E., De Gouvello, B., Gromaire, M.C., and Chebbo, G. (2013, submitted). Evaluation of roofing materials emissions at the city scale: Statistical approach for computing roofing area distribution. In: Novatech, Lyon.

JDHU-2012

REGLES DE CHOIX DES MATERIAUX DE COUVERTURE DANS UNE VILLE -CAS DE LA VILLE DE CRETEIL-

Emna SELLAMI-KAANICHE^(1,2), Bernard DE GOUELLO^(1,2), Marie-Christine GROMAIRE⁽²⁾ et Ghassan CHEBBO⁽²⁾

⁽¹⁾Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 11 rue Henri Picherit, BP 82341 44323 Nantes Cedex, France

⁽²⁾Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU), Ecole des Ponts ParisTech, 6-8 Av. Blaise Pascal, 77455 – Champs-sur-Marne, France - e-mail : sellamie@leesu.enpc.fr; bernard.degouvello@leesu.enpc.fr; gromaire@leesu.enpc.fr; chebbo@cereve.enpc.fr)

Résumé

Aujourd'hui, les matériaux de couverture sont considérés comme une source importante de contamination des eaux de ruissellement urbaines. Dans le cadre de la directive européenne sur l'eau (2000/60 CE), une évaluation des flux de contaminants issus des ruissellements des toitures est donc nécessaire à l'échelle de la ville. Le but de ce papier est de définir une méthode d'identification des matériaux de couverture à grandes échelles. Dans une première partie nous avons identifié les différents critères influençant le choix d'un matériau de couverture à partir d'une analyse bibliographique. Ces critères ont été classés en cinq dimensions : dimension historique, dimension spatiale, dimension réglementaire, dimension technique et dimension esthétique architecturale. A partir de ces critères nous avons élaboré un ensemble de règles permettant d'identifier l'utilisation d'un matériau de toiture à l'échelle de la ville. Par exemple, pour chaque période historique correspond une répartition des matériaux de toit. Donc, nous avons dressé un tableau chronologique de l'évolution historique des matériaux de toiture qui sera croisé avec l'histoire de l'urbanisation de la zone d'étude pour mieux cerner et identifier les matériaux de couverture. Enfin, nous avons appliqué ces règles sur la ville de Créteil. Dans ce travail nous avons obtenu de nouvelles cartes de Créteil permettant d'identifier la répartition des matériaux de couverture.

MOTS CLEFS : toiture, ville, matériaux, critères

Rules of roofing materials choice in a city -Case of Créteil city-

Abstract

Today, urban runoff is considered as an important source of environment pollution. Roofing materials are considered as a major source of urban runoff contamination. In the context of the European Water Directive (2000/60 CE), an accurate evaluation of contaminant flows from roofs is thus required at the city scale. This paper aims at defining a method to identify roofing materials at the city scale. In the first part, we describe the different criteria that influence the choice of roofing material by analyzing the existing works in the literature. After that, we have developed a set of rules for identifying the use of a roofing material at the city scale. Finally, we have applied these rules to Créteil city. In this context, we have obtained new maps of this city which can be interesting for identifying the distribution of the roofing materials. This will be the object of our future study.

KEY WORDS: roof, city, materials, criteria

1 INTRODUCTION

Depuis les années 1990, plusieurs études ont montré que les matériaux de couverture constituent une source importante de contamination des eaux de ruissellement des toitures [Förster, 1996; Gromaire-Mertz et al., 1999; Odnevall Wallinder et al., 1998]. Dans ce cadre, les travaux menés au sein du programme OPUR (Observatoire des Polluants Urbains en Ile-de-France) se sont focalisés

sur la caractérisation et la quantification des émissions des matériaux de couverture dans les eaux de ruissellement à différentes échelles spatiales allant des bancs d'essai et du toit jusqu'à une petite zone urbaine [Gromaire et al, 2011 ; Robert-Sainte, 2009]. Dans sa nouvelle étape, OPUR étend ces travaux à la quantification de ces émissions à l'échelle de la ville.

Cette quantification repose sur une première étape essentielle qui est l'identification des matériaux de toit. Or, en passant à l'échelle de la ville, on se confronte à la réalité d'une diversité très importante de matériaux utilisés en couverture. Cette diversité révèle que la quantification sera très difficile. Quelques travaux [Odnevall Wallinder et Leygraf, 1997; Persson et Kucera, 2001; Odnevall Wallinder et Leygraf, 2001 ; Gromaire et al. 2002] ont déjà entrepris une ventilation des surfaces des toits et par suite l'estimation des flux de polluants à des échelles spatiales importantes. L'estimation des surfaces des toitures était grossière. [Le Bris et Robert-Sainte, 2009] ont évalué les surfaces émettrices d'une petite zone urbaine (2.25 km²) à l'aide d'une méthode de classification des matériaux de toiture à partir d'images aériennes. En pratique, cette méthode a montré quelques limitations telles que la confusion entre certains matériaux comme le zinc et l'ardoise à la lumière.

Dans ces travaux, les toitures ont été identifiées comme des entités indépendantes et isolées. Or, une toiture d'un bâtiment donné est extrêmement dépendante de son histoire (date de construction, renouvellement), son environnement extérieur (quartier, ville...) et intérieur (architecture du bâtiment, ...). Donc, pour mieux identifier les matériaux de toit à l'échelle de la ville, il est indispensable de comprendre les différents facteurs agissant sur le choix du matériau du toit. Ceci nous amène d'une part, à étudier et comprendre le processus de construction d'une ville (urbanisme, histoire, caractéristiques...) [Merlin, 1989 ; Le Xuan, 2011]. D'autre part, à déterminer les réglementations ainsi que les décideurs (acteurs de la ville) du choix des matériaux de couverture.

Le but de notre papier est de définir *les règles d'identification des matériaux de toiture dans une zone urbaine donnée*. Pour cela, une première étape théorique consiste à identifier les facteurs influençant l'utilisation des matériaux de couverture dans un projet de construction. Dans une deuxième étape nous allons analyser ces facteurs de manière à identifier les règles de choix de matériau. La troisième partie de ce papier consiste à appliquer les règles de choix théoriques définies dans la première partie dans le cas de la ville de Créteil (France).

2 CRITERES DE CHOIX DES MATERIAUX DE COUVERTURE A L'ECHELLE DE LA VILLE :

Les matériaux de construction dans le domaine de l'architecture font l'objet de nombreuses études depuis plusieurs années. Dans ces études les matériaux sont traités sous des angles et dans des domaines bien spécifiques. Nous distinguons de nombreux ouvrages qui s'intéressent à un matériau spécifique comme le bois [Asensio, 2005]. La plupart de ces études se focalisent sur les propriétés techniques, esthétiques du matériau et ses effets sur la santé [Bathias et Baïlon, 1980 ; Couasnet, 2005 ; Deoux et Deoux, 2004]. D'autres études ont vu le jour avec l'émergence des démarches environnementales dans les années 1990. Ils abordent de manière globale les différents aspects traités lorsqu'il est question d'écologie et de préservation de nos ressources [Gauzin-Müller, 2001 ; Wines, 2000 ; Oliva et al., 2002].

Cette diversité de matériaux de construction ainsi que les études sur leurs caractéristiques montrent que le choix d'un matériau dans un projet de construction est une tâche complexe et délicate. Ceci a incité certains travaux [Ogunkah et Yang, 2012 ; Tornay, 2010 ; Fernandez, 2010] à étudier les critères de choix des matériaux dans un projet de construction dans le but de développer des modèles pour faciliter le processus de sélection des matériaux. En effet, à l'échelle de l'architecture, le choix des matériaux s'effectue principalement autour de trois critères : « technique, usage et esthétique » [Tornay, 2010]. A cette échelle, selon les périodes, les différents courants de pensée, les effets de modes, ou la sensibilité des concepteurs, l'importance donnée à ces trois critères diffère, certains projets mettent l'accent sur un critère par rapport à un autre [Tornay, 2010]. Une autre étude plus détaillée [Fernandez, 2010] décline les critères de choix des matériaux de construction en cinq niveaux de critères allant d'un niveau très global à un niveau très spécialisé. Cette étude a été faite dans le but de développer une approche d'aide à la décision pour les architectes dans le choix du matériau de construction.

Nous avons analysé ces études pour ressortir les principaux critères de choix des matériaux qui nous aideront à comprendre le processus d'utilisation des matériaux de couverture à l'échelle de la ville dans le cadre de notre recherche. De ce fait, nous devons faire un choix des différents critères, décrits dans les études précédentes, qui mettent en interaction trois entités : *la toiture, le bâtiment et la ville*. En effet, en plus des caractéristiques propres du matériau le choix de matériaux de toiture dépend aussi du type de bâtiment et des caractéristiques urbanistiques (règles d'urbanisme, démarche d'intégration dans la ville...) et réglementaires de la ville.

L'analyse bibliographique que nous avons effectuée, nous a permis de classer les différents critères de choix de matériau de toiture en cinq dimensions : dimension historique, dimension spatiale, dimension réglementaire, dimension technique et dimension esthétique architecturale. Chaque dimension comporte des composantes qui regroupent un ensemble de critères déterminant le choix d'un matériau (cf. figure 1).

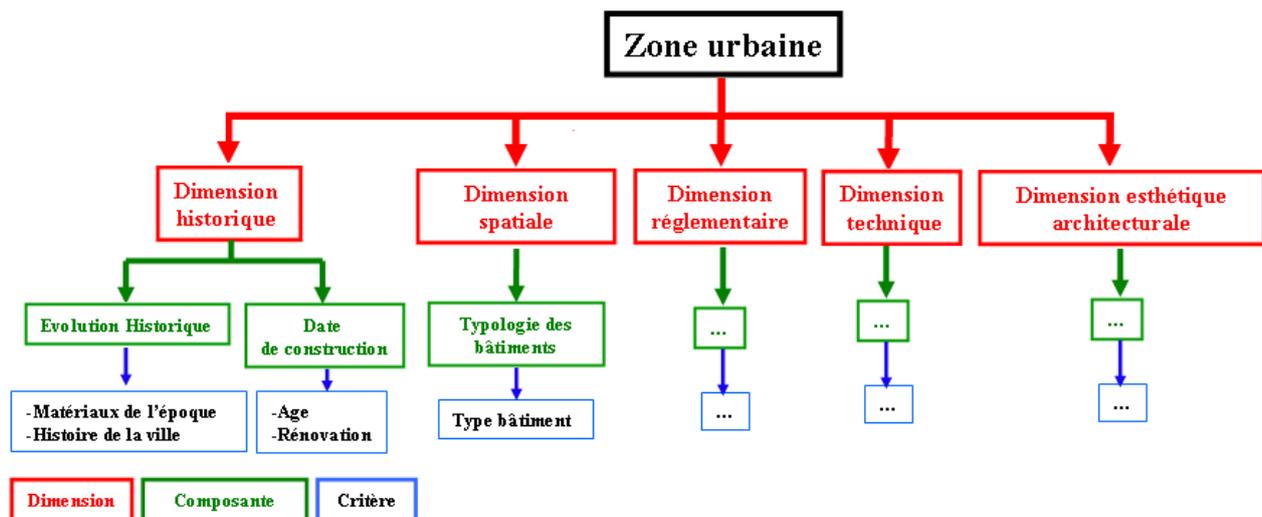


Figure 138 : Critères de choix des matériaux

2.1 Dimension historique:

Cette classe se décline en deux composantes: une liée à *l'évolution historique* (d'une part les matériaux de l'époque et d'autre part l'histoire de l'urbanisation de la ville). La deuxième concerne *la date de construction* des bâtiments qui permet d'identifier la *possibilité d'avoir des rénovations*.

L'évolution historique de l'urbanisation ainsi que le développement rapide de l'industrie et la technologie des matériaux agissent sur l'utilisation, l'apparition, la disparition et l'évolution d'un matériau. Ce développement se manifeste par l'apparition de nouveaux matériaux, des nouvelles méthodes de fabrication, des améliorations des propriétés des matériaux, une forte augmentation de l'utilisation de certains matériaux et enfin la concurrence entre les matériaux (Sandström, 1994).

Cette évolution historique relie deux choses la *ville* et les *matériaux de construction*. Ce duo est extrêmement dépendant, l'évolution de l'un explique l'autre et inversement.

En effet, Jusqu'au milieu du vingtième siècle, la majorité des habitants des pays développés habitaient en milieu rural, dans des constructions réalisées selon les traditions régionales, les savoir faire des artisans et les matériaux disponibles localement [Wignacourt, 2009]. Avec l'ère industrielle du XIXe siècle, les villes ont connu une croissance fulgurante (par exemple de 1850 à 1970, la population de Paris double). Pour faire face à cette croissance, de nouvelles formes de planification et d'interventions vont apparaître. Cet accroissement des grandes villes, le capitalisme, ainsi que le souci urbanistique, créent un bouleversement architectural en Europe et aux Etats-Unis. On assiste à une véritable révolution industrielle, avec l'apparition de nouveaux matériaux de construction, qui permettent l'élaboration d'immeubles plus nombreux, des édifices plus vastes¹²⁴. Un nouveau paysage urbain se

¹²⁴

<http://www.artemis-artetphotos.com/art-contemporain/11-techniques-et-materiaux-de-construction#II>

dessine : l'apparition de nouveaux bâtiments tel que l'usine, une modification et une évolution des moyens de production d'où l'apparition de nouveaux matériaux dans des dimensions et des quantités importantes [AOCDTF, 1989 ; Fernandez, 2010]. Ce mouvement historique a toujours suscité l'intérêt des architectes qui essaient d'exploiter les nouveaux matériaux pour avoir de nouveaux aspects architecturaux. On assiste alors à une évolution des formes des toits [Belhoste, 1997] qui utilisent les métaux comme matériaux de toit vu la facilité de leurs façonnages. On conclut de cette évolution historique, que le véritable développement des matériaux de construction a commencé avec la révolution industrielle.

La dimension historique nous informe aussi sur la durabilité du matériau. En effet, un matériau de construction a une durée de vie [MSI, 2006]. Une fois cette durée atteinte, le matériau doit être changé, par le même matériau ou par un autre. Ce renouvellement dépend d'une part du propriétaire qui a envie de changer l'aspect de sa toiture ou des contraintes réglementaires ou de l'époque. Par exemple certains matériaux n'existent plus sur le marché, d'autres ont été interdits ou encore participent à un effet de mode (des matériaux nouveaux très commercialisés).

2.2 Dimension spatiale :

Le bâtiment est une structure architecturale qui a comme fonction principale d'abriter des personnes et/ou des activités ou des produits. Cette fonction du bâtiment influe fortement sur sa conception et sa construction¹²⁵. De ce fait, les bâtiments sont généralement classés par rapport à leurs fonctions [Beltrán et al , 2010]. Cette classification des bâtiments peut être très générale ce qui donne lieu à énumérer des fonctions globales comme des logements, bâtiments d'activités, des équipements... Une classification très détaillée amène à décomposer les premières classes en sous classes en différenciant les bâtiments sous d'autres critères, par exemple pour les logements on trouve des habitats collectifs et d'autres. On dénombre ainsi une grande variété de bâtiments aux exigences toutes aussi variées.

Chaque type de bâtiment présente une structure particulière qui engendre des toitures sous différentes formes (inclinée, plate, voûte...). Par exemple, les bâtiments religieux présentent souvent des toitures particulières sous formes de voûte. Les installations de sport ont aussi des couvertures particulières sous forme de coupole ou autre. De ce fait, l'utilisation des matériaux de toitures dépendra énormément de la typologie du bâtiment. Ceci est confirmé par l'étude de marché [MSI, 2006]. Les tuiles en terre cuite sont ainsi principalement utilisées pour la couverture de logements individuels. Les couvertures métalliques en acier sont principalement utilisées pour des bâtiments industriels et bâtiments tertiaires.

2.3 Dimension réglementaire :

Cette dimension s'intéresse à l'ensemble des mesures légales, règlements, règles, lois qui influencent l'utilisation des matériaux de toit au niveau du bâtiment, à l'échelle de la ville et à l'échelle nationale.

A l'échelle internationale, des réglementations existent qui par exemple interdisent l'utilisation d'un matériau. L'amiante par exemple a été interdite à cause de ses effets nocifs sur la santé. En effet, en 1997, la France rejoint les 7 autres pays européens (Allemagne, Italie, Danemark, Suède, Pays-Bas, Norvège et Suisse) pour l'Interdiction de toute fabrication, importation ou commercialisation de l'amiante [Andeva¹²⁶ et INRS¹²⁷]. D'autres réglementations s'intéressent aux exigences thermiques, écologiques des matériaux. On peut citer les normes internationales de l'ISO (international standard for organisations) qui fournissent des principes généraux qui guident les déclarations et les étiquetages environnementaux, ISO 14 020 [Wignacourt, 2009]. A l'échelle nationale on trouve comme documents les DTU (Documents techniques unifiés) qui définissent les conditions à respecter dans le choix et la mise en œuvre des matériaux de construction. Les normes AFNOR attestent la conformité des produits aux exigences réglementaires européennes¹²⁸.

¹²⁵ <http://www.wbdg.org/>

¹²⁶ Andeva : Association nationale des victimes de l'amiante

¹²⁷ INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité

¹²⁸ www.afnor.org

A l'échelle urbaine, le PLU (Plan Local d'Urbanisme) représente une contrainte réglementaire importante dans le choix des matériaux. On y trouve les réglementations imposées dans les projets de construction, le découpage en zones (ex : ZUP, ZAC), les quartiers, le contexte d'aménagement... De plus on trouve l'influence des aménageurs qui exigent ou incitent à l'utilisation d'un matériau de couverture pour des objectifs divers. Au niveau du projet de construction du bâtiment, certaines mesures sont prescrites pour utiliser un tel matériau dans le cahier de charge prescrit par le maître d'ouvrage [Tornay, 2010].

2.4 Dimension esthétique architecturale

L'esthétique est un critère de choix du matériau. En effet, le toit doit être en harmonie avec les autres composantes du bâtiment. De plus, le bâtiment doit être intégré dans son environnement extérieur et doit être en cohérence avec les bâtiments existants. Cette cohérence peut se définir par un matériau unique ou une couleur unique. Par exemple dans certaines zones (région, commune...) on impose un matériau (ex : recourir à un matériau régional) pour avoir l'image de la zone - c'est le cas de la Bretagne (France) où des toitures en ardoise sont exigées. De plus, on peut imposer un type de matériau dans un projet pour être en harmonie avec les bâtiments voisins (par exemple exiger un matériau ou une couleur unique pour les toits d'un quartier). Ceci s'intègre généralement dans le cadre du paysage dessiné pour la ville. En effet, au début du 20^{ème} siècle les nouveaux mouvements architecturaux et urbanistiques imposent une esthétique nouvelle qui met en interaction la ville et ses éléments (ex : bâtiments, jardin, route...). On cherche à avoir une harmonie entre les différentes composantes de la ville du point de vue structure, couleur, organisation... [Estienne-Duval, 2010].

2.5 Dimension technique :

Cette dimension englobe toutes les caractéristiques du matériau influençant son utilisation. En effet, le choix des matériaux de couverture dépend de son coût. Ce dernier se décline sous différentes composantes [Fernandez, 2010, Tornay, 2010 ; Wignacourt, 2009] : prix du matériau, prix du transport, coût de main d'œuvre et d'entretien. D'autre part, la forme et des accidents du toit (ex : toiture inclinée, terrasse) orientent généralement le choix des matériaux. Par exemple pour assurer la résistance du toit au vent, certaines catégories de tuiles ne sont pas possibles en fonction de l'inclinaison du rampant. De plus, les toitures terrasses sont généralement préférées par les architectes, pour les bâtiments collectifs, (source entretiens avec les architectes) vu la facilité de leur mise en œuvre. Les toitures inclinées ou qui présentent une forme particulières posent plus de problèmes. Ce critère technique se décline sous différentes composantes¹²⁹ [Wignacourt, 2009] : la performance technique, la durabilité, la qualité architecturale et la facilité d'entretien.

On assiste aujourd'hui à une tendance à respecter l'environnement, soit par des matériaux non nocifs - on parle alors d'éco-matériau [Wignacourt, 2009], soit par la nouvelle tendance des toitures végétalisées qui offrent un milieu plus sain par exemple par réduction du réchauffement climatique [Kokogiannakis et al., 2011]. Cette démarche environnementale fait apparaître de nouveaux critères dans le choix des matériaux de construction [Bornarel, 2003] qui se déclinent en trois catégories : économie de ressources, maîtrise des risques sur l'environnement et maîtrise des risques sur la santé. Parmi ces critères nous pouvons citer, sans exhaustivité la prise en compte de l'empreinte énergétique, la consommation de ressources, la pollution, les déchets... [Gauzin-Müller, 2001 ; Wines, 2000].

¹²⁹ http://www.industrie.gouv.fr/techno_cles_2010/html/mat_24.html

3 REGLES D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX DE COUVERTURE A L'ECHELLE DE LA VILLE

Définition :

Tous les facteurs définis précédemment influent de près ou de loin le choix et l'utilisation des matériaux de toiture. A ce niveau, la question qui se pose est « *comment ces critères peuvent nous aider pour mieux identifier les matériaux de toiture à l'échelle de la ville ?* »

Pour cela, nous proposons de définir la notion de règles d'identification de l'utilisation d'un matériau de toit en fonction des critères déjà décrits. La définition de ces règles est « *A chaque classe de bâtiment localisée historiquement et spatialement dans la ville correspond une répartition propre de probabilité préférentielle des matériaux de toiture* ».

Dans cette partie, il s'agit d'analyser les différents critères précédents de manière à ressortir toutes les informations permettant d'identifier les matériaux de toitures à l'échelle de la ville.

Cette analyse nous a permis d'identifier trois types de résultats :

- des critères qui aboutissent à des règles d'identification des matériaux à l'échelle urbaine d'ordre générale, c'est-à-dire applicables à toutes zones d'étude,
- des critères donnant des règles spécifiques à la zone d'étude,
- des critères très spécifiques ou ayant un caractère singulier, c'est-à-dire qui ne peuvent pas être transposés à grande échelle et donc ne donnent lieu à aucune règle.

3.1 Règles générales :

3.1.1. *Tableau chronologique des matériaux de toitures*

Pour mieux cerner et identifier les matériaux de toiture dans une zone urbaine donnée il est nécessaire de connaître l'histoire de cette zone. En effet, pour chaque période historique correspond une répartition des matériaux de toit. De ce fait, il est important de dresser un tableau chronologique de l'évolution historique des matériaux de toiture (apparition, disparition, évolution...). Nous allons partir d'une liste des matériaux utilisés en France en nous basant sur les DTU, l'étude de marché [MSI, 2006] et la littérature commerciale (documents professionnels des fabricants)... En fait, nous allons tenir compte de deux types de critères : l'histoire et le cadre réglementaire. Ce tableau (cf. figure 2) est issu d'une analyse bibliographique [Hartmann; Fuchs et al; Payet-Gaspard, 2012; AOCDF, 1989; Schonnenbeck et al ; Habashi, 2002; vmzinc; GRS ; CSTB, 2012]. Pour les métaux (utilisé en toiture sous forme de plaques), le développement qui marque leur utilisation massive est le laminage permettant d'avoir la forme de plaques.

3.1.2. *Mode d'occupation du sol*

Dans la littérature, la définition de la typologie des bâtiments a été utilisée pour plusieurs objectifs comme l'étude de la récupération de l'eau de pluie [Belmeziti, 2012], étude de la performance énergétique des bâtiments [Loga et al., 2010 ; Herzele et al., 2008] et l'étude de l'évolutions de l'occupation du sol régional IAU-idf (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme – Ile de France). Pour la question de l'utilisation des matériaux de toitures on ne trouve pas une étude spécifique sur toiture et typologie de bâtiment. Par contre, l'analyse de l'étude du marché [MSI, 2006] nous a permis de conclure qu'à chaque type de bâtiment correspond une utilisation majoritaire de matériau de toit.

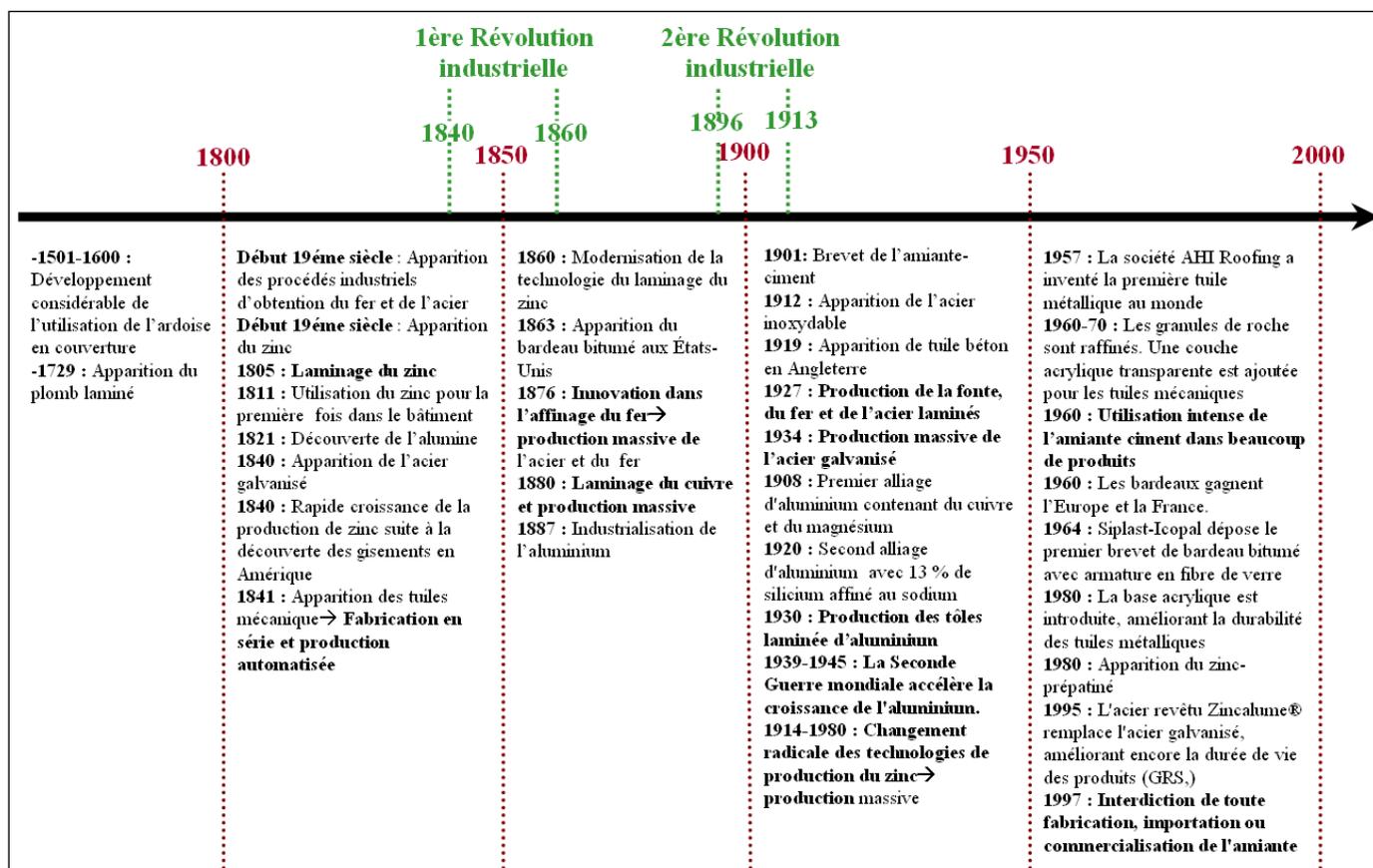
Dans ce cadre, nous proposons de créer de nouvelles typologies de bâtiments qui se caractérisent par un même « scénario d'utilisation de matériau de toit ».

Ce travail est basé sur l'utilisation et l'adaptation de la base de données existante en France, MOS (Mode d'occupation du sol) de l'IAU-IDF très détaillée (81 types de bâtiments appelés « MOS-bâtiment »). Nous avons effectué une réorganisation de cette base de manière à obtenir de nouvelles classes de bâtiments qui se caractérisent par un même « scénario d'utilisation de matériau de toit ». Un ensemble d'opérations a été effectué, par exemple se focaliser sur les données du mode urbain construit (MUC), supprimer un certain nombre de « MOS-bâtiment » où les toitures sont absentes (exemple : cimetières, chantiers, emprises de transport ferré...).

Nous avons retenu au final 11 classes de bâtiments : habitat individuel, habitat collectif, habitat autre (prison, auberge...), activités secondaires, sport, équipement type 1 (bureau+administratifs),

équipement type2 (enseignement+culturel), surfaces commerciales, équipement de santé, grands équipements (eau, gaz...), transport.

Figure 139 : Tableau chronologique des matériaux de toitures (extrait)



3.2 Règles spécifique à la zone d'étude

3.1.1. Carte de spatialisation chronologique de l'urbanisation

La connaissance de l'évolution historique de l'urbanisation de la ville permet de découper la ville en zones urbaines homogènes temporellement. Ce découpage historique permettra, en le croisant avec le tableau chronologique des matériaux, d'associer à chaque zone urbaine les différents potentiels matériaux de couvertures existants. De ce fait, pour chaque ville étudiée il est indispensable d'avoir une carte de spatialisation chronologique de son urbanisation. Ce type de carte peut être existant et facile à avoir à partir des Mairies qui possèdent des cartes historiques accessibles sur leur site ou dans les archives. Le PLU (Plan Local d'Urbanisme) d'une ville pourra également présenter une telle carte. En cas d'absence de ce type de carte, il conviendra de la produire à partir des informations historiques sur l'urbanisation de la ville, ces informations étant à rechercher dans les bibliothèques des mairies, aux archives nationales...

3.1.2. Taux de renouvellement du matériau

L'âge de la toiture est une donnée nécessaire dans notre étude, en effet l'émission d'un contaminant dans les eaux pluviales varie en fonction de l'âge du matériau [Robert-Sainte, 2009]. Or une toiture subit dans sa vie en œuvre des transformations (entretien, rénovation...) que nous cherchons à estimer. Le renouvellement d'une toiture dépend de sa durée de vie. Pour déterminer la possibilité et le taux de renouvellement d'un matériau il suffit de croiser âge du matériau et sa durée de vie. D'après [MSI, 2006], on possède des informations sur la durée de vie des matériaux de couverture - par exemple le zinc a une durée de vie entre 40 et 50 ans. L'âge du matériau sera déterminé dans une fourchette en fonction de sa localisation dans la ville. En effet, une première étape sera de découper la ville en zones en fonction de leur période d'urbanisations et ensuite associer à chaque zone ses potentiels matériaux existants.

3.1.3. Carte relative à la liste des matériaux autorisés /préconisés dans la ville

Au niveau de la ville certains textes réglementaires, comme le PLU (Plan Local d'Urbanisme) et les règles d'aménagement, représentent une contrainte réglementaire importante dans le choix des matériaux. Donc il est indispensable de consulter et étudier les différentes réglementations spécifiques à la zone d'étude pour ressortir les contraintes influençant l'utilisation des matériaux de couverture. Ces données permettront d'obtenir une carte de spatialisation des matériaux de couverture dans la ville.

3.3 Critères spécifiques non objectivables

Les critères issus des dimensions techniques et esthétiques sont des critères très variables et ne peuvent pas être transposés en règles d'utilisation d'un matériau à l'échelle de la ville. Si l'on considère le critère 'esthétique', ce dernier est très relatif il dépend du choix de l'architecte ou du client : un tel choix ne peut pas être généralisé à grande échelle et reste limité à un bâtiment donné. Les critères techniques comme la durabilité et la facilité d'entretien du matériau dépendent énormément du projet de construction : le budget alloué, l'importance accordée au toit par l'architecte... Donc, ces critères sont aussi singuliers, subjectifs et spécifiques au bâtiment. Rappelons que notre objectif de recherche est de développer une méthode pour identifier la répartition des matériaux de couverture à l'échelle de la ville sans avoir recours à déterminer toutes les toitures (ce qui reste un travail fastidieux).

4 APPLICATION A LA VILLE DE CRETEIL

4.1 Choix de la ville de Créteil

Le but de notre recherche est de développer une méthodologie générale de quantification des surfaces émettrices des matériaux de couvertures à l'échelle de la ville. Dans ce cadre nous avons besoin de choisir un cas d'étude pour remplir deux objectifs, d'une part valider la méthodologie et d'autre part pouvoir généraliser la méthodologie à d'autres sites. Notre choix s'est fixé sur la ville de Créteil (Département 94). C'est une grande ville de 89 304 habitants [INSEE, 2008] répartie sur une surface de 11,5 km². Il s'agit d'un site urbain assez dense situé à une dizaine de kilomètres au sud-est de Paris. Elle présente une mixité urbaine très marquée : des modes d'occupation de sol très variés. Créteil est divisée en quatre grandes zones urbaines historiques: Centre ancien, Mont Mesly, Nouveau Créteil I, Nouveau Créteil II, comme illustré dans la figure 3.a. Chaque région présente une organisation urbaine spécifique qui dépend notamment de la période de construction. La zone la plus récente est la zone 4. La figure 3.b montre une intéressante diversité urbaine et fonctionnelle de Créteil.

D'après la figure 3.b, les différents modes d'occupation du sol sont représentés par des couleurs différentes: par exemple les activités industrielles sont en violet, les habitats collectifs sont en rouge et les habitats individuels sont en jaune. La répartition du mode d'occupation du sol n'est pas homogène dans les différentes zones urbaines de la ville. Par exemple, le centre ancien se compose principalement d'habitats individuels. Toutefois Mont Mesly est composé essentiellement d'habitats collectifs. Cette distribution est principalement due à des facteurs historiques.

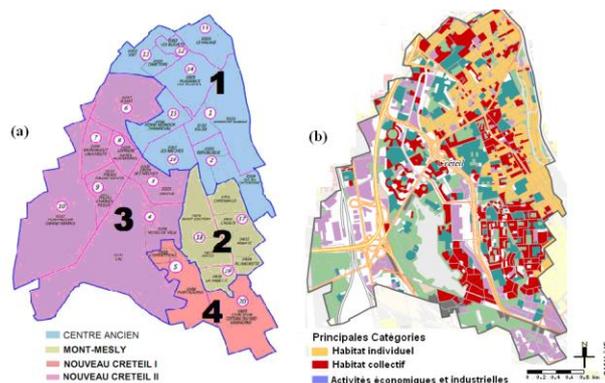


Figure 140 : (a) Les quatre zones urbaines (source : PLU de Créteil) ; (b) Les différents modes d'occupation du sol (source : IAU-IDF)

4.2 Règles d'identification des matériaux de couverture dans la ville de Créteil

Pour analyser et appliquer les différentes règles d'identification des matériaux nous avons effectué une étude urbaine de la ville. Cette étude a été basée d'une part sur l'organisation d'entretiens avec des différents acteurs de la production de la ville (ex : architectes, des aménageurs) ayant opéré sur Créteil. D'autre part, nous avons effectué une étude du Plan Local d'Urbanisme (PLU) de Créteil et de ses annexes afin de connaître la réglementation en matière d'urbanisme au niveau de la toiture. Enfin, pour les constructions anciennes, une consultation des archives a été effectuée.

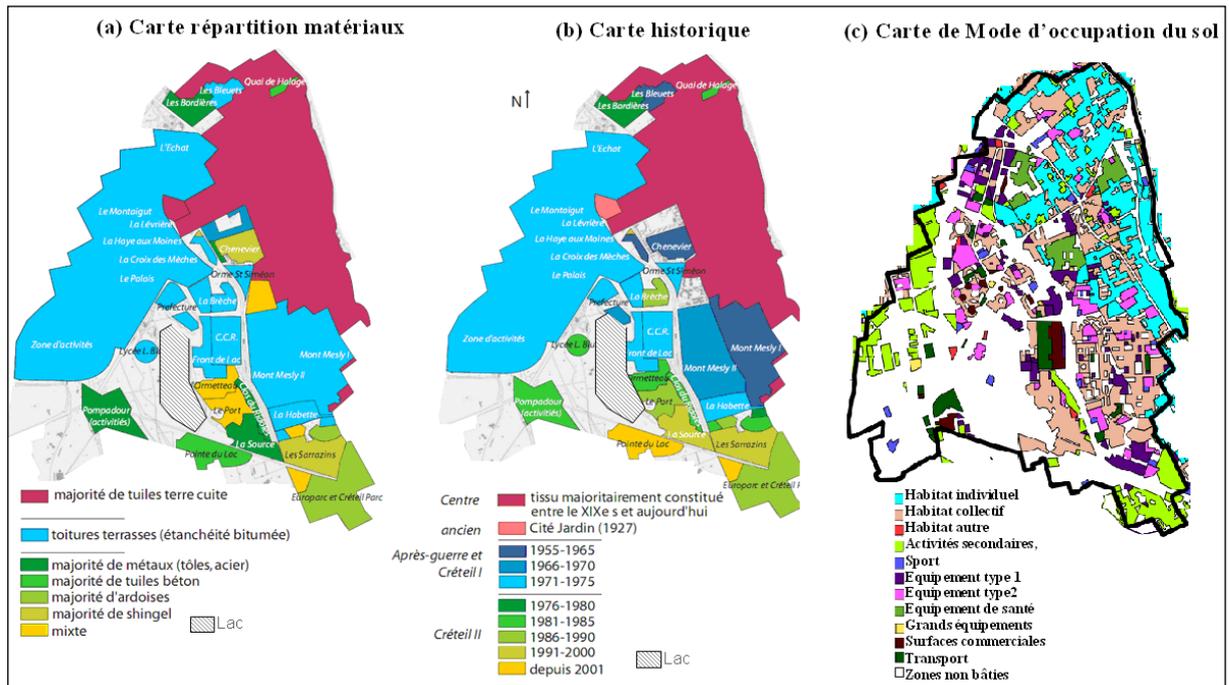
D'après l'étude de la ville de Créteil, les toitures sont majoritairement inclinées. Pour le choix des matériaux de toiture, de cette étude, on a ressorti que l'architecte a le rôle le plus important. Le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre ont, suivant les cas, plus ou moins d'influence concernant les choix de matériaux. Il est donc ressorti des entretiens que le choix de matériaux de toiture ne résulte pas systématiquement de la même personne.

Dans le PLU de Créteil il y a une obligation de toitures à pans dans l'optique d'assurer la préservation de l'identité architecturale. Ceci est prescrit pour les constructions du XIX^{ème} siècle. Cela se traduit donc par un paysage de *toits traditionnels en tuiles*. On trouve de la *terre cuite sur les constructions relativement anciennes*, celles plus récentes étant plus souvent en *tuile béton* (même si ce n'est pas systématique) pour des raisons de coût.

L'application des règles de choix des matériaux, établies précédemment, pour la ville de Créteil nous a permis d'une part d'obtenir une carte de spatialisation chronologique de l'urbanisation de Créteil et une carte de la répartition des matériaux. Cette dernière a été établie à partir des données requises de l'étude urbaine de Créteil ainsi que le tableau chronologique établi dans le paragraphe des règles. Pour le mode d'occupation du sol, nous avons réorganisé la base de données MOS obtenue de l'IAU-IDF pour la ville de Créteil. Les résultats de l'application de notre méthodologie se résument dans les cartes illustrés dans la figure 4. Ces cartes seront utilisées dans un prochain travail.

5 CONCLUSION

Dans ce papier nous avons essayé de montrer que le choix d'un matériau de couverture dépend de plusieurs critères que nous avons classés en cinq dimensions : dimension historique, dimension spatiale, dimension réglementaire, dimension technique et dimension esthétique architecturale. Le but de ce travail est de faciliter l'identification des matériaux de couverture à grandes échelles. Donc, nous avons analysé les différents critères identifiés de manière à définir un ensemble de règles d'identification de l'utilisation d'un matériau de couverture dans une ville. Cette analyse a permis d'élaborer des règles générales applicables à toutes échelles et des règles spécifiques à la zone d'étude. Toutefois, certains facteurs ne sont pas transposables à grande échelle et donc ne donnent lieu à aucune règle. Dans une dernière section nous avons appliqué ces règles à un cas d'étude : la ville de Créteil. Ce travail a permis de créer des cartes pour cette ville donnant une première vision de la répartition des matériaux de couverture. A terme, ce travail élaboré dans ce papier permettra



d'alimenter une approche de quantification des matériaux de toit à l'échelle de la ville basée sur un découpage de la ville en zones homogènes en fonctions des différents critères élaborés et leurs attribuées des classes possibles de matériaux par une méthode statistique.

Figure 141 : Les différentes cartes de Créteil

6 REFERENCES ET CITATIONS

- AOCDTF (Association Ouvrière Des Compagnons Du Devoir Du Tour De France) (1989). - Encyclopédie des métiers - L'art du Couvreur. *Les Compagnons Du Devoir*, p 1872
- Asensio N. (2005). - Architecture bois. *Edition L'Inédite*, Paris, 288 pages
- Bajard P. (2006). - Les matériaux de construction peuvent-ils s'inscrire dans des réseaux de proximité. Ecole d'architecture de Lyon p41
- Bathias C., Bailon JP. (1980). - La fatigue des matériaux et des structures. Collection Université de Compiègne, *Edition les Presses de l'Université de Montréal*, Maloine S.A. Editeur, Paris, 547 pages
- Belmeziti A., de Gouvello B. (2010). - Une approche prospective de la diffusion des pratiques d'utilisation de l'eau de pluie en Ile-de-France. *Novatech*
- Bellhoste J.F (1997). - L'impacte des techniques de fabrication sur l'emploi des métaux dans les couvertures. *Section française de l'Icomos : Les couvertures métalliques: matériaux et techniques*, Paris, pp 41-42
- Beltrán S.G., Kochova L., Pugliese G., Sopoliga P. (2010). - Les Bâtiments : efficacité énergétique et énergies renouvelables. *Intelligent Energy Europe*
- Bornarel A. (2003). - Qualité environnementale des bâtiments - manuel à l'usage de la maîtrise d'ouvrage et des acteurs du bâtiment. *Angers*, 294 pages
- Cousanet Y. (2005). - Mémento, Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction. *Editions le Moniteur*, Paris, 248 pages.
- CSTB (2012). - Document Technique d'Application-Tuile métallique. *CSTB-Commission chargée de formuler des Avis Techniques*
- Deoux P., Deoux S. ME (2004). - Le guide de l'habitat sain, les effets sur la santé de chaque élément du bâtiment, l'implantation, les matériaux, l'isolation, la ventilation, le chauffage, la décoration. *Mediaco Editions, Andorre*, (première édition 2002), 407 pages.
- Estienne-Duval I. (2010). - L'intervention du paysagiste dans la ville, de 1960 à aujourd'hui - Pertinence et enjeux pour les architectes et les urbanistes. *Géographie et aménagement*. Université de Lille-Sciences et Technologies, Lille, p 444
- Fernandez L. (2010). - Transposition en architecture des connaissances d'ingénierie environnementale et des savoirs relatifs au choix des matériaux. *Ecole doctorale : Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés (MEGeP)*. Université de Toulouse, Toulouse, p 325
- Förster J., (1996). - Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration. *Water, Science and Technology*, **33 (6)**: 39 - 48.

- Fuchs J., Francesconi D., Coiffier J-C., Roisne V. et Strasser N. - La galvanisation à chaud en continu : ses évolutions pour une plus grande utilisation dans le secteur du génie civil. *ARCELOR FCS COMMERCIAL* - <http://www.easy-steel.com/pro/wp-content/uploads/GUIDEPREGALVA.PDF> consulté le 07/09/2012
- Gauzin-Muller D. (2001). - L'architecture écologique, 29 exemples européens, enjeux et perspectives, urbanisme et développement durable, architecture et qualité environnementale, démarche HQE. *Edition Le Moniteur*, Paris, 287 pages
- Gromaire M.C., Robert-Sainte P., Bressy A., Saad M., de Gouvello B. et Chebbo G., (2011). - Zn and Pb emissions from roofing materials-Modelling and mass balance attempt at the scale of a small urban catchment. *Water Science and Technology*, **63 (11)**: 2590-2597.
- Gromaire, M. C., Chebbo, G. et Constant, A. (2002). -Incidence of zinc roofing on urban runoff pollutant loads: The case of Paris. *Water, Science and Technology* **45(7)**: 113 - 122.
- Gromaire-Mertz, M., Garnaud, S., Gonzalez, A. et Chebbo, G., (1999). - Characterisation of urban runoff pollution in paris. *Water, Science and Technology*, **39 (2)**: 1-8.
- GRS (GERARD ROOFING SYSTEMS). - Historique de AHI ROOFING, la marque GERARD® Roofing Systems. *AHI ROOFING*. <http://gerardroofs.fr/app/download/5785502459/Historique+AHI+ROOFING+la+marque+GERARD+ROOFING+SYSTEMS.pdf> consulté le 03/09/2012
- Habashi F. (2002). - Discovering the 8th Metal - A History of Zinc. *Brussels - International Zinc Association (IZA)*
- Hartmann G. - L'acier historique : http://www.hydroretro.net/etudegh/acier_historique.pdf, consulté le 05/09/2012
- Hartmann G. L'aluminium historique : http://www.hydroretro.net/etudegh/aluminium_historique.pdf, consulté le 05/09/2012
- Herzele A.V. et Gossum P.V. (2008). - Typology building for owner-specific policies and communications to advance forest conversion in small pine plantations. *Landscape and Urban Planning* **87**: 201-209.
- IAU-IDF. <http://www.iaurif.org/>
- INSEE (2008): <http://www.recensement-2008.insee.fr/chiffresCles.action?zoneSearchField=CRETEIL&codeZone=94028-COM&idTheme=3>
- Kogiannakis G., Tietje A., et Darkwa J. (2011). - The role of Green Roofs on Reducing Heating and Cooling Loads : A Database across Chinese Climates. *Procedia Environmental Sciences*, p 604–610
- Le Bris A. et Robert-Sainte P., (2009). - Classification of roof materials for rainwater pollution modelization.
- Le Xuan S. (2011). - Lieux et modèles: l'exemple des villes de fondations au XXe siècle. *Architecture Université PARIS-EST*, Paris, p 472
- Loga T. et Diefenbach N. (2010). - Use of building typologies for energy performance assessment of national building stocks, existent experiences in European countries and common approach. *First TABULA Synthesis Report*.
- Merlin P., (1989). - Bibliographie sur les villes nouvelles françaises et étrangères, Laboratoire théorie des mutations urbaines en pays développés. *Institut Français de l'Urbanisme*
- MSI (Msi Marketing Research for Industry Ltd) (2006). – Etude : le marché des matériaux de couverture des toits en France.
- Odnevall Wallinder I., Verbiest P., He W. et Leygraf C., (1998). - The influence of patina age and pollutant levels on the runoff rate of zinc from roofing materials. *Corrosion Science* **40**: 1977-1982
- Odnevall Wallinder, I. et Leygraf, C. (1997). - A study of copper runoff in an urban atmosphere. *Corrosion Science* **39(12)**: 2039 - 2052.
- Odnevall Wallinder, I. et Leygraf, C. (2001). - Seasonal variations in corrosion rate and runoff rate of copper roofs in a rural atmospheric environment. *Corrosion Science* **43**: 2379 – 2396
- Ogunkah I. et Yang J. (2012). - Investigating Factors Affecting Material Selection: The Impacts on Green Vernacular Building Materials in the Design. *Decision Making Process Buildings* **2**: 1-32
- Oliva JP., Besse-Platiere A. et Aubert C. (2002). - Maisons écologiques d'aujourd'hui. *Editions Terre vivante, Mens*, 155 pages
- Payet-Gaspard P. (2012). - Célébration du 100e anniversaire de l'acier inoxydable: L'histoire de sa création, Les grandes étapes par secteur, Son avenir. *La revue spécialisée du nickel et de ses applications*
- Persson, D. et Kucera, V. (2001). - Release of metals from buildings, constructions, and products during atmospheric exposure in Stockholm. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* **1(3-4)**: 133-150.
- Robert-Sainte P., (2009). - Contribution des matériaux de couverture à la contamination métallique des eaux de ruissellement. *Ecole doctorale "Ville et environnement"*. Paris: Université PARIS-EST, 335.
- Sandström R. (1994). - Criteria in Material Selection. *EAA – European Aluminium Association Stockholm*
- Schonnenbeck M., et Neumann F. - Histoire du zinc, sa production, sa mise en œuvre. *RHEINZINK*. http://www.rheinzink.fr/fileadmin/inhalt/bilder/ebooks/9046374855032282a3b54f/index_en.html consulté le 03/09/2012
- Tornay N. (2010). - Vers des outils d'aide à la conception pour intégrer les dimensions techniques, écologiques et sensibles des matériaux de construction. *Ecole doctorale : Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés*. Université de Toulouse, Toulouse, p 410

VMzinc : <http://www.vnzinc.fr/le-zinc/aspects-de-surface.html> consulté le 05/09/2012

Wines J. (2000). - L'architecture verte. *Editions Taschen*, Chine, 240 pages

Wignacourt A. (2009). - Caractérisation, mesure et évaluation des indicateurs techniques, économiques et financiers des éco-matériaux : Application au secteur du bâtiment. *Ecole centrale de Lille*, Lille, p 284.

Modelling the Zn emissions from roofing materials at Créteil city scale - Defining a methodology

Emna SELLAMI-KAANICHE^{1,2}, Bernard de GOUELLO^{1,2}, Arnaud Le BRIS³, Marie-Christine GROMAIRE² and Ghassan CHEBBO²

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 11 rue Henri Picherit, BP 82341, 44323 Nantes Cedex, France

² Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU), Ecole des ponts ParisTech, 6-8 Avenue Blaise Pascal, 77455 Champs-sur-Marne, France.

³ Institut Géographique National (IGN), MATIS Laboratory, 2-4 Avenue Pasteur, 94165 Saint Mandé Cedex, France

(E-mail: sellamie@leesu.enpc.fr; bernard.degouello@leesu.enpc.fr; arnaud.le-bris@ign.fr; gromaire@leesu.enpc.fr; chebbo@cereve.enpc.fr)

Abstract

Today, urban runoff is considered as an important source of environment pollution. Roofing materials, in particular the metallic ones are considered as a major source of urban runoff contamination. An accurate evaluation of contaminant flows from roofs is thus required at the city scale. This paper aims to describe the definition of an appropriate methodology for evaluating the zinc emission at the city scale. This methodology is based on combining two different methods. The first one is an automatic classification and the second one is a theoretical urban study site. In order to obtain representative data, the choice of the study site was based on the diversity of land use and the urban and social context. Finally some results and future works will be presented.

Key words

Urban water; contaminant; methodology; roofing materials; runoff

INTRODUCTION

Roofing materials, in particularly the metallic ones are considered as a major source of urban runoff. This observation was revealed by several research programs conducted since the 1990s (Förster, 1996; Gromaire-Mertz et al., 1999; Odnevall Wallinder, 1998). The OPUR (Observatoire des Polluants URbains en Ile-de-France) program then focused on identifying and quantifying the emission of different contaminant (Zn, Pb...) at the test-bed, roof and small urban catchment scales (Robert-Sainte, 2009). This works have been conducted in the context of TOITEAU project, in which annual metallic runoff rates at different scales (test-bed and roof) have been evaluated, for the different roofing materials commonly used in Paris and suburbs. Then, in other works (Gromaire et al., 2011; Le Bris et al., 2009), the previous results have been extended to larger special scales by using roof surface areas data obtained from aerial photographs and image classification software.

The classification method based on aerial images was applied to an urban catchment with 2.25 km² of surface. The obtained results showed about 75 to 80% of well classified roofing surfaces. Nevertheless, classification method presents some limitations especially in terms of confusion between different classes (eg: zinc and slates at light).

The goal of this paper is to describe the methodology defined to evaluate the zinc emitting surfaces at the city scale. On the one hand, this methodology is based on applying the automatic classification method. In the other hand, we propose to overcome the limitations of the classification method by adding further information. These informations are developed by another work which seeks to understand the key factors leading to the choice of roofing materials on construction projects and defining the related performance indicators. To validate and apply this methodology in other cities, a complex representative site had to be chosen.

In this paper, we firstly describe the classification method and its limitations. Then, the different criteria of the chosen city will be presented. Finally, we present the proposed solutions and discuss the awaited performances.

METHODS

Our work aims at evaluating the zinc roofing emitting surfaces at the city scale. However, this task seems difficult because of the diversity and the very large number of buildings. So a specific methodology has to be developed to identify and evaluate the different roofing material at the city scale.

Previous studies (Gromaire et al., 2011; Le Bris et al., 2009) have evaluated the surface of zinc at the scale of a small urban catchment by using a classification method based on aerial images. They have shown about 25% of misclassification which is due to some limitations. In fact, some classes have similar radiometry, so it becomes difficult to distinguish between them (eg: zinc and slates at light). Then, roofing materials in shadow are misclassified; this is the case of red tiles in the shadow which are classified as brown tiles. In addition, radiometry greatly varies in the same class.

If we want to apply this method at the city scale, classification errors may be increased because of the larger scale and the different limitations.

As illustrated in Figure 1, we propose to combine the automatic classification method with a theoretical approach based on a study of the site (history, urban land use, social characteristics...). This approach aims to define criteria to interpret the results of the classification method. Therefore we can improve the results by adding further informations, for example in individual habitat we know that zinc as roof material is rarely used. So if the classification result in this area gives zinc, there is an important probability that it is actually slate roof.

To validate and to generalize the methodology we need to apply it to a significant complex urban area which will be chosen according to different criteria which will be described later.

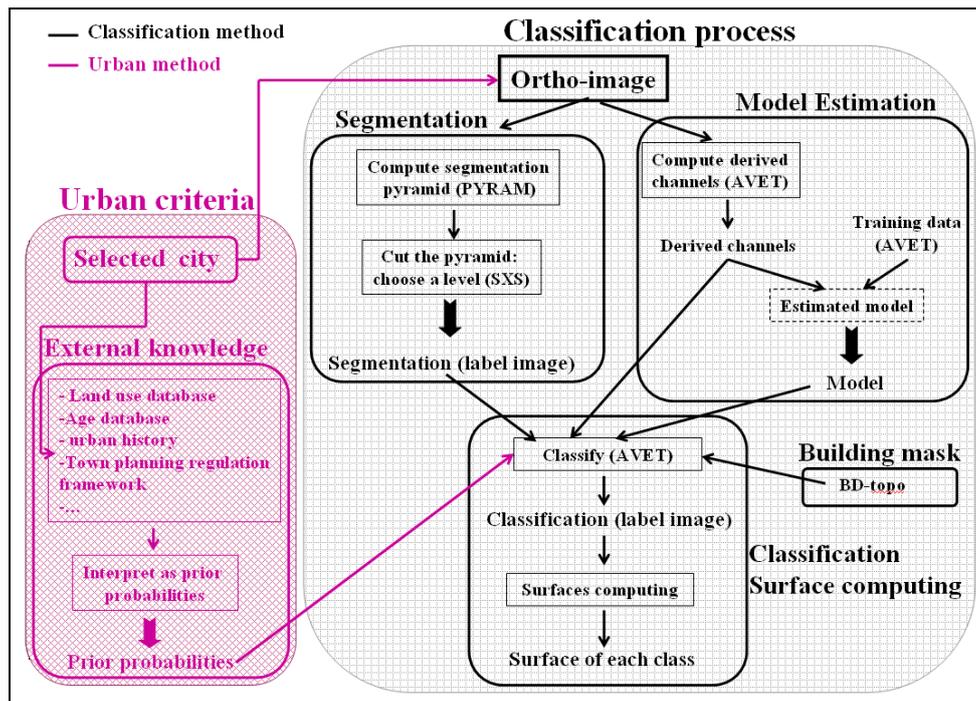


Figure 142 : Methodology to identify and evaluate the different roofing material at the city scale

Classification method

As mentioned earlier, the chosen method is the classification of roofing materials from aerial images using the AVET (Automatic Vegetation Extraction Technique) tool (Trias-Sanz, 2006). This tool was developed to extract information on vegetation areas from aerial images. Then it was adapted by (Le Bris, 2009) for urban roof classification. In fact, six classes corresponding to the following kinds of roofs were defined: *zinc sheetings*, *slates*, *red tiles*, *brown tiles* and *flat roofs*. Before classification, some treatments are undergone on the images: segmentation and computing building mask.

Data: the ortho-images

The identification of roofing materials will be based on the analysis of aerial photography. These latter, will inform us about the materials used on roofs with their radiometry and their projected surfaces. Aerial images have undergone some treatment to be transformed into orthorectified images. Indeed, in these photos the deformation due to relief and the inclination of the axis of the shooting have been corrected (Lafont et al., 2003).

The images come from IGN's (Institut Géographique National) ortho-image database named BD-ortho, which contains digital colour ortho-photos with three or four (red-green-blue-near infrared) bands and with a 50 cm ground resolution.

Method steps

The classification method consists in the following steps:

- *Segmentation*: First of all, the ortho image is segmented into homogeneous radiometric regions. This is achieved thanks to the multi-scale segmentation method by PYRAM and SXS tools (Guigues et al., 2006; Guigues, 2003).
- *Derived channels*: The classification process is combined with the computing of derived channels. In fact, derived channels have been calculated from the original (red-green-blue-

near infrared) bands of the ortho-image. These channels can be radiometric channels computed as combinations of the original bands (such as channels of another color space or indices as the well known *ndvi* computed from red and near infrared bands to discriminate vegetation) or texture channels.

Therefore, the choice of good associations of channels is important to obtain good classification results. Different tests should be made to get the best association of channels.

- *Building mask*: In this classification method, we focalise only on buildings, so hiding non buildings objects in the ortho-images is needed. In our case, a mask named BD-topo (database for Topographic Information comes from IGN) is used to focalise in buildings. This operation has limitations. In fact, the limits of buildings in BD-topo don't overlap exactly the limits of buildings in BD-ortho (see figure 2). In some cases, the mask didn't include the entire roof, or it includes a small part of roads. This problem is more important for the highest buildings for which the shift between the roof on the ortho-image and the corresponding database building object is sometimes important.



Figure 143 : The building mask don't overlap exactly the limits of buildings in BD-ortho

- *Classification*: The segmented regions are then classified by the AVET classification tool (Trias-Sanz et al., 2005 and Trias-Sanz, 2006). This tool works in tow steps. First model estimation from training data captured by an operator will be computed: for each class of material (zinc, tile...), an n-dimensional histogram of the radiometry of the class is calculated. Then AVET estimate the best statistical distributions (such as gaussian, laplacian laws but also histograms (raw or obtained by kernel density estimation) to fit to the radiometric histogram. Finally, the best model is selected thanks to a Bayes information criterion (Schwarz, 1978) enabling to choose an alternative between fit to data and model complexity. Secondly classification will be applied: the image can then be classified according to the statistical model of the radiometry of the different classes. Several per pixel and per region classification algorithms are proposed (Trias-Sanz, 2006). In the present work, a 'maximum a posteriori' (MAP) classification algorithm is used because it makes possible to take into account external knowledge as prior probabilities (this method will be described in the proposed solution section). The label $c_0(R)$ given to a region R is its most probable class according to the model previously estimated (and to prior probabilities). Hence, with the MAP algorithm, $c_0(R)$ is the class c that maximizes the following function:

$$\text{Equation 13 : } P_{\text{prior_knowledge}}(c(R) = c) \cdot \prod_{\text{pixel_s} \in R} P_{\text{radiometric_model}}(I(s) | c(s) = c)^{1/\text{Card}(R)}$$

with $I(s)$ standing for the radiometry vector of pixel s , $c(z)$ meaning region or pixel "z's class" and $P(c(z) = c)$ standing for the probability for pixel or region z to belong to class c . $\text{Card}(R)$ the number of pixels in the region.

-*Surfaces computing*: for each class its surface is calculated by computing the number of pixels and multiplying them by the resolution of the image.

All of these steps have been applied for the city selected and figures were illustrated in results paragraph.

Problems and limits

The classification method of roofing materials from aerial image is perturbed by several phenomena causing misclassification (about 20% to 25% of errors at the scale of a small catchment). Indeed, the information provided by the aerial images is not sufficient to classify and separate the different classes of roofing materials at the city scale.

Shadows/Illumination effect

The superstructures of roofs or higher buildings overshadow the lower ones. In this case, red tiles in the shadow are classified as brown tiles and zinc plates in shadow are classified as slate.

Classes with similar radiometry

Some classes have similar radiometry. Therefore it becomes difficult to distinguish between them even by a human operator. These are the case of brown tiles and slates, some red tiles and flats roofs and also zinc sheets and sunny slates.

Radiometric variations within a class

This variation in radiometry is due to several factors:

- *Industrial*: the material could undergo surface treatments which changes the shade of its color.
- *Age*: the material is exposed to the atmosphere (eg: the corrosion for metals) which changes its surface characteristics.
- *Shadow*: shadow could influence the color of the material and then the radiometry in the image.

Resolution of the ortho-images

The resolution of the images is 50 cm. Therefore, it's difficult to use texture channels. Indeed, every roofing material is characterized by a specific texture, for example zinc is used as plates. However tiles are small pieces posed one against the other. These textures cannot be detected in the 50 cm available aerial image.

Age of buildings

The previous studies have shown that the age of the material have an important influence in the emission of contaminants. So it becomes necessary to introduce this information in our work. However, the aerial image cannot or weakly inform us about the age of roofs.

Proposed solution

Shadow/No shadow class

To obtain a correct classification of the image, roofs in shadow must be taken into account. So, we can correct the radiometry in shadows areas after having detected them.

However, this correction is limited by several uncertainties:

- The ortho-images have undergone a process of radiometric treatments as described in the previous section. Therefore there is a loss of information in shadow areas.
- The resolution of the image is taken at 50 cm.
- The accuracy of 3D urban model at the selected city is not available.

In this case, a method was proposed and successfully used in a previous study (Le Men et al., 2002). This method has shown that radiometry of a class will be completely different in the shadow and light. Simpler solution have been proposed (Le Bris et al., 2008) which consist in dividing each class “*c*” into two classes “*c in shadow*” and “*c in light*”. So, two distinct radiometric models are obtained for each class of roofing material from the first part of training data in AVET tool.

Introduction of external knowledge in the classification process

The study made by (Le Bris et al., 2008) has shown that it is possible to improve the classification results by taking into account knowledge from external sources.

First, external informations should be identified by studying the urban characteristics of the city which influence the use of roofing materials. In this study many sources are used: urban documents, land use database, planning method, history documents, conducting interviews with actors (master work, architect...).

Secondly, these informations will be used as prior probabilities in the ‘maximum a posteriori’ (MAP) classification algorithm. With this classification method, the label $c_o(R)$ given to a region R is the most probable class according to the radiometric model previously estimated and to prior probabilities. Hence, $c_o(R)$ is the class c that maximises the following function:

$$\text{Equation 14 : } \prod_{i_external_information_source} = (P_i(c(R) = c)^{a_i} \cdot (\prod_{pixel_s \in R} P_{radiometric_model}(I(s) | c(s) = c)^{1/Card(R)}))$$

With $I(s)$ standing for the radiometry vector of pixel s ($I(s)$ is an n -dimension vector with n standing for the number of channels used for the classification), $c(z)$ meaning class of the region [or pixel] “ z ” and $P(c(z)= c)$ standing for the probability for region [or pixel] z to belong to class c . The a_i terms stand for weight parameters balancing the different prior probability sources.

Study site

To validate our methodology we need to choose a complex site in which we try to have the different aspects of the city. In fact, the city should present a sufficient urban diversity so as to make it possible to apply the methodology to other cities. Therefore our choice will be based on the following criteria:

- *Diversity*: the site should represent urban, functional and social diversity. We should have different type of habitats (houses, collective habitats, and social habitats), different activity areas (economic, industrial, and commercial) and an old downtown.
- “*Sufficient but reasonable*” size: the site should have between 50,000 and 100,000 inhabitants. This makes it easier to identify and study the various aspects of the city during the three year of my thesis.
- *Availability and accessibility of data*: in our work we need different type of data: urban, social, annual contaminant runoff *unit rates*... Therefore it is important to ensure their availability and also their accessibility in the study site. In addition, the

site should be easily accessible from our laboratory in order to investigate on it (eg: to make survey).

PRIMARY RESULTS

In this part the different tests that will be applied in our methodology and the selected city are described.

Selected appropriated city

The selected city is Créteil (Department 94) located about 10 km from Paris (France). Créteil has 89 304 inhabitants (www.insee.fr) distributed over 11.5 km² which represents a reasonable size.

This city is presented in figure 2. Créteil is divided into four major historical urban areas: Old center, Mont Mesly, New Creteil I, New Créteil II as illustrated in figure 2.a. Each area presents a specific urban organization which depends especially of the period of construction. The recent zone is number four. Figure 2.b shows the interesting urban and functional diversity of Créteil.

Table 79 : Créteil characteristics

| Créteil | Area | Population (in 2008) | Location |
|---------|-----------------------|----------------------|---------------------------|
| | 11, 5 km ² | 89 304 inh | 10 km from Paris (France) |

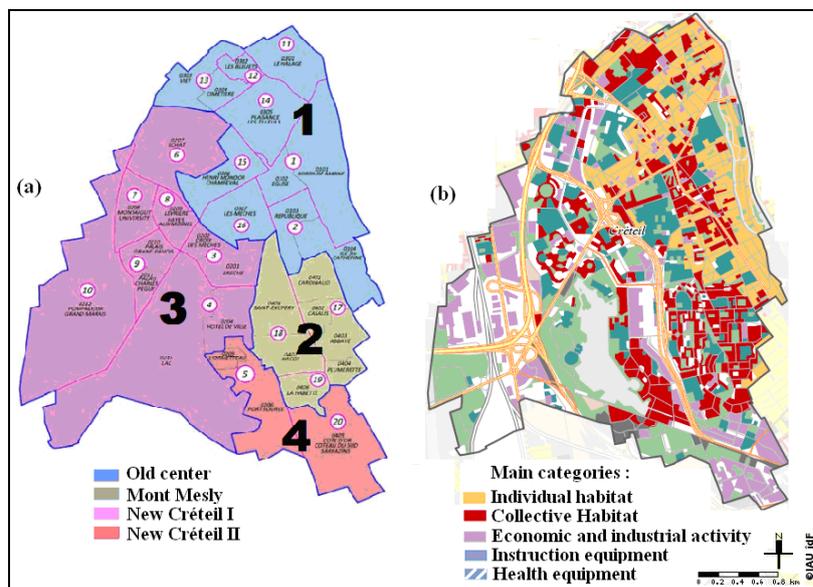


Figure 144: (a): The four urban areas of Créteil (source PLU); (b): The different land uses (source: IAU-IDF)

In fact, we can see different land use represented by different color: industrial activities located nearby (violet color), health equipment (light blue) different types of habitat (collective: red color, individual: yellow color). The land use is not homogeneous in the different urban area of the city. For example the Old center mainly consists of individual habitat. However Mont Mesly is composed of collective habitat. This distribution is mainly due to historical factors. In addition, Créteil is easily accessible from the laboratory. Finally contaminant runoff *unit rates* are available at this site (Robert Sainte, 2009).

Tests

In the classification method, different association of channels will be tested. Then we will apply the classification process to each historical urban area of Créteil (in particularly for each area we get its training data). This operation has double aim. First, we will obtain roofing material classified with their ages with taking into account possible renovation area. Secondly, we can improve results by decreasing the radiometric variations within a class knowing its age. In fact, the age of the material influences its color and then the radiometry in the image. Finally, external informations will be introduced to the classification process by testing different fusion data methods and then their performances will be tested.

The following figures represent the first results of applying only classification method using Créteil city images. In figure 4 we can see the segmentation of roofs in different regions corresponding to the different classes of materials. After segmentation, a building mask was computed as we can see in figure 5: the BD-ortho associated to its BD-topo. Finally, classification was applied and we get the results in figure 6. In this latter, every color represent the material assigned by AVET classification. These first results present misclassification. For example, as we can see in figure 6, a same slate roof was classified into three materials: slate, flat and shadow area. This is due to the shadow problem.



Figure 145 : Example of segmentation



Figure 146: Left: BD-ortho; Right: BD-topo

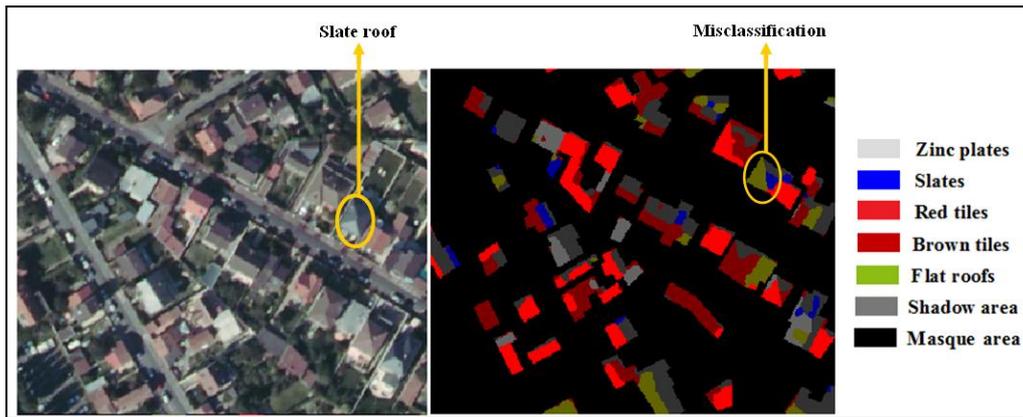


Figure 6: Example of results obtained in Créteil

Introduction of external knowledge in the classification process

In this part, the possible external knowledge to take into account in the classification process is described.

A recent work (which is still under study) aims at understanding the procedure of selecting roofing materials in a given building by studying the history, planning method, land use...at Créteil city. Interviews were conducted with various actors and stakeholders (eg: master of work, contracting authority, architect). This work seeks to identify the decision maker and to understand the key factors leading to the choice of roofing materials on construction projects. The primary results of this study have shown that the choice of roofing materials depends especially on the architect. Nevertheless, this actor is subjected to many constraints: laws constraints, aesthetics, type of building (equipment, house, tower...), the context and the period of the construction, the cost...

In this context, it is proposed to take into account the ages of buildings and the land use in our classification. On the one hand, zinc emission depends on the age of roof. On the other hand, the use of roofing material depends on the land use. In fact, zinc is mostly used in collectives habitats and rarely in individual ones.

Informations related to the land use

For each land use, probability of presence of each class of roofing materials will be calculated: *zinc plates*, *slates*, *red tiles*, *brown tiles* and *flat roofs*. These probabilities will be integrated in the MAP algorithm. In our classification method a land use database is employed and it comes from IAU_IDF (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de l'Ile-de-France).

These informations will be integrated in AVET tool in addition to the building mask. Indeed, we use a mask of land use.

Informations related to the ages of buildings

Créteil city is divided into four major historical urban areas. The idea is to subdivide the image of Créteil into different areas with their age. Then, we obtain the surfaces of different classes versus their ages.

Once validated, this approach allows us to compute the zinc plates surfaces versus their ages and the land use, and then the zinc runoff rates will be use to obtain the emission of zinc contaminant from zinc plates at Créteil city scale.

CONCLUSION : In conclusion, to quantify zinc emitting surfaces at the city scale, we have defined a methodology based on combining two different methods. The first one is an automatic classification method based on using AVET tool. At a small urban catchment, this automatic classification has shown some limitations. Therefore, to apply this method at the city scale, we have proposed to integrate a second theoretical method based on an urban study of the selected city. Thus, results will be improved. The selection procedure was based on different criteria to validate and generalize the methodology developed in other cities.

REFERENCES

- Förster J., (1996). Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration. *Water, Science and Technology*", 33 (6):39 - 48.
- Gromaire M.C., Robert-Sainte P., Bressy A., Saad M., de Gouvello B. and Chebbo G., (2011). Zn and Pb emissions from roofing materials-Modelling and mass balance attempt at the scale of a small urban catchment. *Water Science and Technology*, 63 (11):2590-2597.
- Gromaire-Mertz, M., Garnaud, S., Gonzalez, A. and Chebbo, G., (1999). Characterisation of urban runoff pollution in Paris. *Water, Science and Technology*, 39 (2):1-8.
- Gromaire-Mertz M. C., (1998). La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire : caractéristiques et origines. *Thèse de Doctorat -Sciences et techniques de l'Environnement*: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 506 p (+ annexes).
- Guigues, L., Cocquerez, J.-P. and Le Men, H., (2006). Scale-sets image analysis. *International Journal of Computer Vision*, 68 (3):289-317.
- Guigues L., (2003). Modèles multi-échelles pour la segmentation d'images. *École Doctorale Sciences et Ingénierie de l'Université de Cergy-Pontoise*, 302.
- IAU-IDF: Institut d'aménagement et d'urbanisme de l'Ile-de-France <http://www.iau-idf.fr/>
- Lafont C. and Troispoux G., (2003). Orthophotographies, définition et mise en oeuvre appliquée à la BD ORTHO de l'IGN. *Edition du Certu (n°149)*, 122p.
- Le Bris A. and Robert-Sainte P., (2009). 'Classification of roof materials for rainwater pollution modelization'.
- Le Bris A. and Boldo D., (2008). Extraction of land cover themes from aerial ortho-images in mountainous areas using external information. *The Photogrammetric Record*, 23 (124):387-404.
- Le Men H., Trévisan J. and Boldo D., (2002). Automatic extraction of landcover themes on digital orthophotos in mountainous area for mapping at 1/25k. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (2):331-337.
- Odnevall Wallinder I., Verbiest P., He W., Leygraf C., (1998) The influence of patina age and pollutant levels on the runoff rate of zinc from roofing materials. *Corrosion Science* 40:1977-1982.
- OPUR : Observatoire des Polluants URbains en Ile-de-France, <http://leesu.univ-paris-est.fr/opur/>.
- PLU : plan local de l'urbanisme : <http://www.ville-creteil.fr>
- Robert-Sainte P., (2009). Contribution des matériaux de couverture à la contamination métallique des eaux de ruissellement. *École doctorale Ville et environnement*. Paris: Université Paris-Est, 335 pp.
- Schwarz G., (1978). Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, 6 (2):461-464.
- Trias-Sanz, R., (2006). Semi-automatic high-resolution rural land cover classification. Paris: Université René Descartes-Paris 5, 344.
- Trias-Sanz R. and Boldo D., (2005). A high-reliability, high-resolution method for land cover classification into forest and non-forest. *Proceedings of the 14th Scandinavian Conference on Image Analysis. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Heidelberg: (Eds. H. Kalviainen, J. Parkkinen & A. Kaarna), 831-840.
- www.insee.fr.