



ACTION 2.2 : CONCEPTION PLURIDISCIPLINAIRE D'UNE METHODE GENERALE D'EVALUATION DES FLUX DE CONTAMINANTS ISSUS DES RUISSELLEMENTS DES MATERIAUX DE TOITURES A L'ECHELLE URBAINE.

DEVELOPPEMENT ET ILLUSTRATION A PARTIR DU CAS DU ZINC A CRETEIL

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Depuis les années 1990, plusieurs études ont été menées pour caractériser et quantifier les émissions par les matériaux de toitures (Quek *et al.*, 1993 ; Odnevall Wallinder *et al.*, 1998)¹. 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). Ils se sont élargis aux molécules organiques tels que l'émission des biocides dus aux pratiques d'entretien de toitures (Van de Voorde *et al.*, 2012).

Dans sa nouvelle étape, OPUR étend ces travaux à la quantification de ces émissions à l'échelle de la ville. A cette échelle, 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 n'a été menée pour évaluer les émissions de polluants dans les eaux de ruissellement de toiture au niveau d'une ville. **L'objectif de cette action a été de développer une méthode générale d'évaluation des flux de contaminants issus des ruissellements des matériaux de toiture à l'échelle urbaine.**

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.

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* a été 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%.

PRINCIPES METHODOLOGIQUES

Le travail a reposé sur une démarche pluridisciplinaire intégrant : hydrologie urbaine, urbanisme, architecture, géographie, chimie, sociologie et science de l'ingénieur. Des outils très différents ont été sollicités : enquête de terrain ; entretiens auprès de professionnels de la construction et de l'urbanisme ; statistiques ; analyses historiques ; documentations scientifiques et techniques ; systèmes d'informations géographiques et outils de traitement d'image ; analyse réglementaire. Ces outils permettent d'exploiter et d'intégrer des données urbaines existantes (ex : bases d'occupation du

¹ Les références bibliographiques complètes figurent dans le manuscrit de thèse.

sol, base d'images aériennes) et de définir de nouvelles approches sans avoir besoin de faire une description toit par toit ce qui reste un travail très fastidieux (ex : exploitation des dires des experts).

1. Méthode générale d'évaluation des flux de contaminants dans le ruissellement des matériaux de toiture à l'échelle urbaine

La méthodologie mise en place est présentée en deux grandes étapes (cf. Figure 1).

Elle 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 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, il s'agit de quantifier les dimensions des matériaux des différents éléments de toiture associés à chaque situation-type. La ville est découpée en *entités* homogènes en termes de classes de bâtiments localisées dans une zone historique. Ce découpage est effectué à partir du croisement d'une *étude historique couplée des matériaux* de toiture et de l'*urbanisation* avec l'exploitation d'une *base de mode d'occupation du sol*.

Pour chaque entité, la quantification des dimensions des matériaux des différents éléments de toiture est élaborée à partir d'une *approche statistique* en conjonction avec l'interprétation des photos aériennes croisée avec des *règles empiriques* d'identification et de quantification des matériaux de toiture à l'échelle urbaine.

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 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. (cf. 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 (m) 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 $g.ml^{-1}.an^{-1}$.

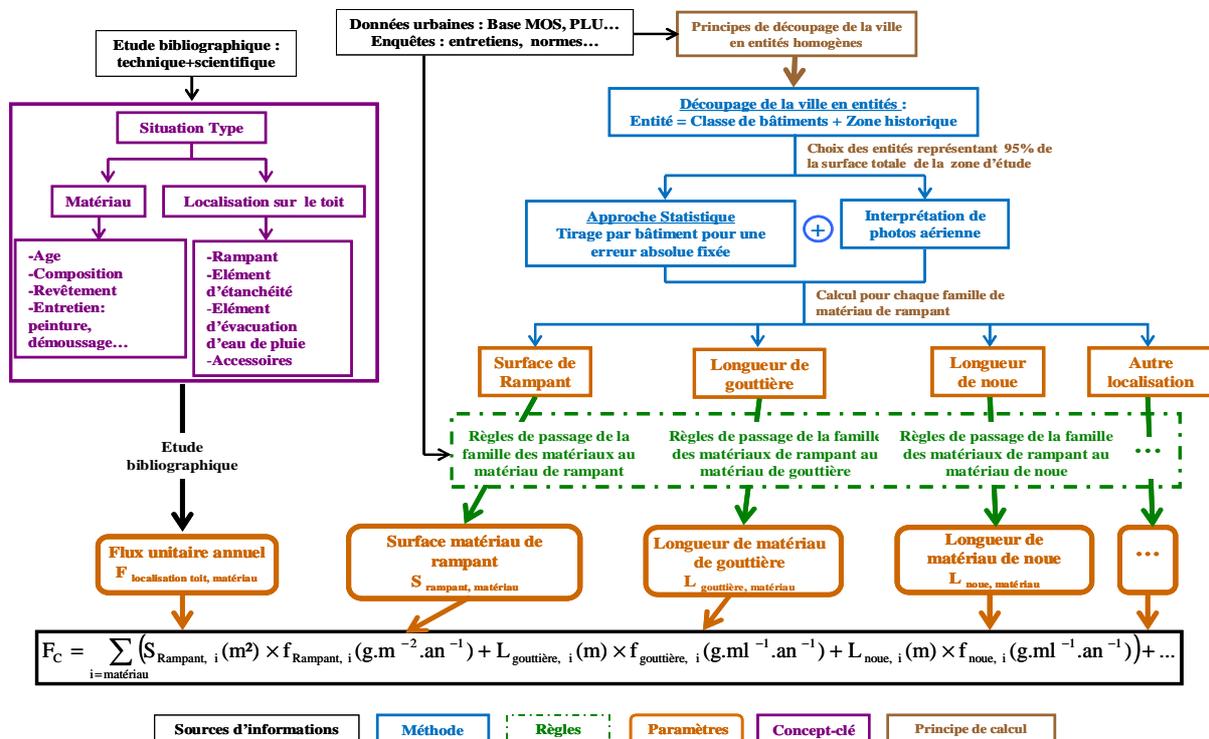


Figure 1 : Principes de la méthode générale d'évaluation des flux de contaminants

2. Notion de « Situation-type » d'émission d'un contaminant par les matériaux de toiture

A l'échelle du toit, l'émission de contaminants est influencée par différents paramètres liés aux caractéristiques du matériau (ex : âge, composition) (Bertling *et al.*, 2006; Odnevall Wallinder *et al.*, 2001), à la mise en œuvre de la toiture (inclinaison, orientation, élément du toit...) (Odonevall Wallinder *et al.*, 2000; (Robert-Sainte *et al.*, 2009) et aux conditions d'exposition (caractéristiques de la pluie, du temps sec...) (He, 2002; Mouyon, 2001).

A l'échelle urbaine, les *caractéristiques du matériau* doivent être identifiées. 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; Bertling, 2006).

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). Aussi, l'entretien subi par les toitures doit être pris en compte 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. L'évaluation portant sur des *flux moyens annuels de contaminants* émis par les matériaux de toiture à l'échelle urbaine, 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 sont pas pris en compte directement dans la méthode (ils le sont indirectement car ils conditionnent la valeur 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 permettront l'évaluation de l'émission à grande échelle.

Nous définissons 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 unique d'émission d'un contaminant (flux annuel par m² projeté ou par ml projeté de matériau) qui sera noté : $f_{\text{matériau, localisation toit}}$ (cf. Tableau 1).

Dans ce qui suit, nous décrivons les différents éléments composants la définition de la notion de situation-type. 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.

Tableau 1: Exemples de situations-types

Contaminant	Matériau			Localisation sur le toit	Flux unitaires
	Type	Age	Mode de présence		
Chrome	Acier inoxydable	neuf	Composant secondaire des feuilles en acier inoxydable	Rampant	0,8 à 1,2 (mg.m ⁻² .an ⁻¹) (Odnevall Wallinder <i>et al.</i> , 2002)
Plomb	Cuivre	ancien	Composant secondaire des feuilles en cuivre	Gouttière	0,9 (mg.ml ⁻¹ .an ⁻¹) (Robert-Sainte <i>et al.</i> , 2009)
Zinc	Zinc naturel	neuf	Composant principal des feuilles en zinc	Gouttière	0,871 (Robert-Sainte <i>et al.</i> , 2009)

• 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.

- Connaître l'*âge du matériau* est très important. D'une part, la composition du matériau dépend de sa période de construction. En effet, pour les matériaux métalliques, l'évolution de la métallurgie a pas mal changé la composition des alliages. Par exemple, en 1971, l'étain-plomb a été ajouté à la composition de l'acier inoxydable (Invernizzi, 2000). D'autre part, l'âge d'un matériau influence son émission de contaminants. Par exemple, l'émission du contaminant cuivre par les feuilles en cuivre âgées de 40 ans (2,1 g.m⁻².an⁻¹) est supérieure à celle des feuilles de cuivre neuf (1,3 g.m⁻².an⁻¹) (He *et al.*, 2001). 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).
- 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. Tout d'abord, le contaminant peut être présent dans la masse du matériau soit comme un composant principal, ou un composant secondaire ou un adjuvant. Pour les matériaux métalliques nous trouvons différents types d'alliages et donc des proportions de contaminants très variables. Par exemple, 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). Pour les plastiques nous distinguons comme adjuvants les stabilisants comme les phtalates (Nohra, 2010). Ensuite, le contaminant peut être aussi présent dans le revêtement du matériau. Nous distinguons, par exemple, les traitements de surface tels l'engobage ou le siliconage des tuiles en terre cuite (Lyonnet, 2004), 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). Enfin, le contaminant peut ne pas faire

partie de la composition du matériau, il est un agent extérieur déposé volontairement lié aux pratiques d'entretien des toitures. Par exemple, la peinture et les crépis contiennent des biocides qui sont lessivés par temps de pluie (Burkhardt *et al.*, 2007; Jungnickel *et al.*, 2008; Schoknecht *et al.*, 2009). Parmi ces contaminants le benzalkonium est une molécule très utilisée dans les produits de démaillage des tuiles (Van de Voorde *et al.*, 2012).

• Localisation sur le toit

La localisation du matériau sur un élément spécifique de la toiture induit une émission spécifique de contaminant. Quatre grandes catégories d'éléments sont identifiées : le rampant, les éléments d'étanchéité (ex : noue), les éléments d'évacuations des eaux de pluies (ex : gouttière) et autres (ex : crochets de fixations des ardoises). 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.

3. Identification et quantification des surfaces des familles de matériaux de rampants et des longueurs de gouttières et de noues associées

La méthode d'identification et de quantification des dimensions des matériaux des éléments de toit développée est basée sur deux approches différentes. La première consiste à développer des *règles empiriques*, à partir du croisement des données récoltées de différents types de documents (documents techniques des matériaux, règlementations d'urbanisme (PLU)...) avec des entretiens menés avec les professionnels des matériaux de toitures (industriels, architectes...) et les acteurs de la ville (maire, aménageurs...). La deuxième est 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.

D'après la Figure 1, la première étape consiste à découper la ville en entités de manière à obtenir des zones homogènes définies par 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». Ainsi, nous avons procédé à un travail d'adaptation et de croisement des bases de données existantes à l'échelle d'une ville (base d'occupation de sol, carte historique...). Il s'agit d'appliquer les principes d'identification des matériaux de toiture à l'échelle urbaine que nous avons définie à partir de notre travail d'enquête :

- 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 spatio-temporelle de l'échelle urbaine influence l'utilisation des matériaux de toiture.

Les résultats de ce travail se traduisent par des cartes opérationnelles facilement exploitables. Les zones homogènes 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.

À l'échelle de chaque entité, la distribution des matériaux de toiture est évaluée à l'aide d'une méthode statistique croisée à une interprétation visuelle des matériaux de toiture à partir des images aériennes. Il s'agit d'un échantillonnage aléatoire simple de bâtiments de taille n appliqué à chaque entité homogène de la ville. À partir de cet échantillon et nous évaluons les ratios des matériaux de toitures R_i (%) et nous calculons l'incertitude sur ces ratios en appliquons le Théorème sur les Proportions. Ce travail est couplé avec l'exploitation des règles empiriques permettant la quantification des matériaux des différents éléments de toit. Ces règles sont classées comme suit :

- Règles de passage de la famille de matériaux de rampant aux matériaux de rampant : ce sont des règles qui 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.
- Règles de corrélation entre le matériau de rampant et le matériau d'un élément de toit : ces règles permettent d'attribuer une répartition des matériaux d'un élément de toit à un matériau de rampant dans une entité donnée. Par exemple, entre 1950 et 1980 la réparation des matériaux de gouttières, pour les toitures en tuile est 60% en zinc et 40% en autres matériaux.

Ces règles vont être détaillées en étudiant le cas de l'émission du contaminant zinc dans la ville de Créteil.

DEVELOPPEMENT DE LA METHODE VIA LE CALCUL D'EMISSION DU ZINC SUR LA VILLE DE CRETEIL

Créteil 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. Chaque région présente une organisation urbaine spécifique qui dépend notamment de la période de construction.

1. « Situation-types » et flux unitaires d'émission du zinc

Les situations-types d'émissions du zinc renseignées sont résumées dans le [Tableau 2](#). 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. 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. Néanmoins, une valeur du flux annuel d'émission du zinc par le rampant en quartz-zinc a été produite par VMZINC ([Vmzinc, 2010b](#)). Nous allons donc retenir cette donnée qui sera introduite dans le [Tableau 2](#) en couleur verte.

Tableau 2 : 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*
	40 ans	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

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 2](#). 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. Les nouvelles valeurs approximées sont en rouge dans le [Tableau 2](#). D'après l'étude historique des matériaux 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, 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 (d'après VMZINC). Ainsi, en termes de patrimoine ces matériaux ne représentent même pas 1% des toitures de la ville Créteil construite essentiellement avant 2005. Par application du principe de hiérarchisation, les situations-types associées à ces matériaux sont négligées.

2. Découpage de la ville en entités urbaines homogènes

L'exploitation des bases de données urbaines repérées croisée avec l'analyse de l'histoire des matériaux de toiture et de l'urbanisation et les données des entretiens nous ont permis de ressortir des principes permettant de découper l'échelle urbaine en zones 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 principes ont été identifiés :

- **A chaque « classe de bâtiment » correspond une répartition spécifique des matériaux de toitures.**

L'analyse des études récentes du marché des matériaux de toiture (MSI, 2006; MSI, 2012) croisée avec les entretiens menés avec les experts de la couverture nous a permis de conclure que l'utilisation des matériaux de toiture dépend de la typologie du bâtiment. Par exemple, en France, les toitures des maisons individuelles sont majoritairement en tuiles (béton ou en terre cuite). A l'échelle de Créteil, nous disposons de la base d'occupation du sol MOS-IAU. Cette base est très détaillée, elle décrit tous types de mode d'occupation du sol (ex : espace vert, route). L'exploitation de cette base a pour objectif de créer une nouvelle typologie de 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 avons réorganisé de la base MOS de l'IAU-IDF (Belmeziti *et al.*, 2013) en se basant sur l'analyse des entretiens. Ainsi, 13 « classes de bâtiments » ont été créées : *Habitat individuel*, *Habitat collectif*, *Habitat autre* (prison, auberge...), *Activité secondaire*, *Surface commerciale* (magasin, hypermarché, station de service...), *Bureau*, *Sport* (construit), *Equipement d'enseignement* (secondaire, supérieur...), *Equipement de santé* (hôpital, clinique...), *Equipement culturel* (centre de congrès, bibliothèque...), *Equipement administratif* (mairie, préfecture...), *Entrepôt logistique* (gaz, électricité...), *Transport* (gares...).

- **A chaque période historique correspond une répartition spécifique de matériaux de toitures**

L'analyse des entretiens et le croisement de l'histoire du paysage urbain français et de l'évolution des matériaux de toiture nous ont permis de ressortir les grandes périodes d'urbanisation qui ont marqué les matériaux de toiture. En particulier, 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.

Pour la ville de Créteil, trois principales périodes historiques 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 dite des « trente glorieuses », les toitures sont majoritairement des terrasses ;
- zone historique 3 (1981-2008) : les toitures sont majoritairement inclinées.

- **Le cadre réglementaire, dans une échelle urbaine autorise/préconise des matériaux de toiture**

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 (loi n°1930-05-02 du 2 mai 1930 et la loi Malraux Loi n° 62-903 du 4 août 1962). A Créteil, le Maire a exigé des toitures inclinées pour préserver l'identité du centre ancien de Créteil du 19^{ème} siècle.

L'application de ces trois principes a permis d'élaborer la carte de classe de bâtiments et la carte historique (cf. Figure 2).

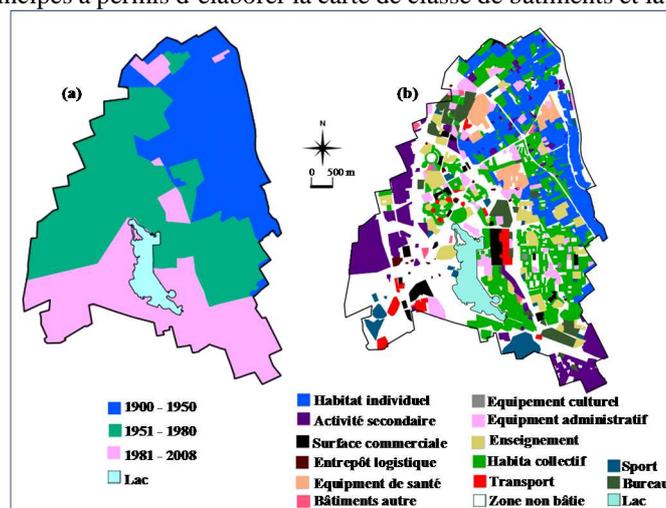


Figure 2 : (a) Carte historique (b) Carte de classes de bâtiments

- **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 » de la Figure 2. A l'aide de QGIS, 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 (IGN, 2008) 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 (cf. Figure 3). Certaines classes de bâtiments sont négligeables en termes de surfaces dans une zone historique donnée, nous avons décidé, pour optimiser le temps de calcul, 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. Erreur ! Source du renvoi introuvable.). Le calcul est mené pour 21 entités sur le total des 37 entités de Créteil.

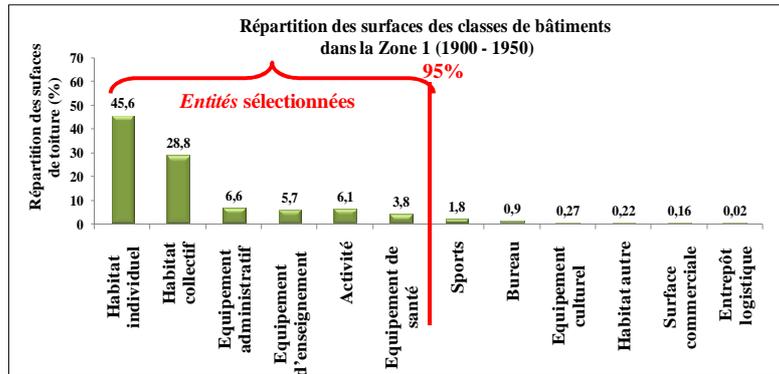


Figure 3 : Répartition hiérarchique des classes de bâtiments dans la « zone historique 1 »

3. Méthode de quantification des surfaces des familles des matériaux de rampants et des longueurs de gouttières et de noues associées

Un échantillonnage aléatoire en conjonction avec l'interprétation des photos aériennes des différentes parties du toit est réalisé. Il s'agit d'une interprétation visuelle directe des familles de matériaux de rampant et indirecte pour les matériaux de gouttières et de noues. Cette méthode est appliquée aux entités sélectionnées. Le croisement de la carte des entités et la BD-TOPO, nous obtenons la surface des toitures pour chaque entité (N (m²)). L'échantillonnage est basé sur un tirage aléatoire sans remise de bâtiments de taille n . Chaque bâtiment (b) a un matériau de toiture spécifique. Nous obtenons ainsi une base des bâtiments tirés avec la surface de leurs toitures S_b (m²). Le croisement de la BD-TOPO avec la BD-ORTHO (IGN, 2008) permet, pour chaque bâtiment, d'identifier la famille des matériaux du rampant, de mesurer à l'aide QGIS la longueur de gouttières $l_{g,b}$ (m) et la longueur de noue $l_{n,b}$ (m). Pour l'échantillon e tiré d'une entité, nous calculons la surface totale des rampants S_e (m²), la longueur totale des gouttières $l_{g,e}$ (m) et la longueur totale des noues $l_{n,e}$ (m). Enfin, pour chaque famille de matériau i de l'échantillon e tiré, nous déterminons la surface des rampants $S_{e,i}$ (m²), 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). Ces résultats sont ensuite extrapolés au niveau de l'entité. Le calcul d'incertitude se base sur le calcul d'intervalle de confiance.

Tableau 3 : 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) ($R_{g,i,e} \pm CI$ (%))			Longueur de noue $l_{n,i} \pm CI$ (m) ($R_{n,i,e} \pm CI$ (%))		
	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 éclairément	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Terrasse étanchéité	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Terrasse végétalisée	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Inox	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(-) La famille de matériau ou l'élément de toit n'existe pas

- **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 $I_{g,i} (m)$: $I_{g,i} = \frac{I_{g,i,e}}{S_{i,e}} \times S_i$

- la longueur totale de noues $I_{n,i} (m)$: $I_{n,i} = \frac{I_{n,i,e}}{S_{i,e}} \times S_i$

Le **Tableau 3** décrit un extrait des résultats de calcul.

4. Méthode de quantification des matériaux de rampants et des matériaux de gouttières et de noues associées

La quantification de la distribution des matériaux rampant et éléments de toit est basées sur des règles définies empiriquement classées entre des règles de passage et règles de corrélation. 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) qui ont permis de formuler les règles. Ensuite, ce travail est complété par une enquête plus ciblée auprès de fabricants (commerciaux, industriels) et d'artisans (essentiellement des couvreurs) pour valider ou invalider.

La démarche de formulation de ces règles se base tout d'abord sur la classification des experts en fonction de leurs activités et de leurs connaissances par rapport aux matériaux de toitures. Ainsi, quatre types d'experts interrogés ressortent de cette étude :

- **Type I** : il s'agit des experts internes aux fabricants industriels leaders du matériau.
- **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.
- **Type III** : il s'agit des experts des fabricants non leaders du matériau.
- **Type IV** : il s'agit des représentants professionnels et évaluateurs.

Néanmoins cette classification n'indique 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. Dans le but d'obtenir des données du patrimoine bâti, en effet, certains experts ont un recul historique d'autres ont des données de marché. Trois catégories ont pu être formulées :

- **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 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. Enfin, un expert type II peut être de catégorie 3 lorsque son discours est douteux par rapport à un matériau donné (ex : M. Bourgoin 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 ».

Pour formuler une règle nous effectuons une analyse, à l'aide d'un *arbre de décision*, des données par rapport aux catégories des experts interrogés et en rajoutant des informations issues de l'étude de marché et historique. Pour qualifier et valider les règles que nous produisons. Nous décidons de classer les règles en certaine « classe A », probable « classe B » et incertaine « classe C ».

La **Figure 3** décrit un cas de formulation de règles pour une famille de matériau dont un expert de catégorie 1(CE1) a fourni des données quantitatives. Dans ce cas, toutes les données quantitatives de cet expert (notées DEC1) se transforment en règles de classe A. Ensuite, nous regardons les experts de catégorie 2 (CE2). Si les données fournies par ces experts (DEC2) sont du même sujet 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. Il s'agit d'attribuer à une règle quantifiée une distributions unique à partir des données cohérentes fournies par au moins deux experts. En d'autres termes, nous effectuons une opération de moyenne approximée par une valeur multiple de 5%.

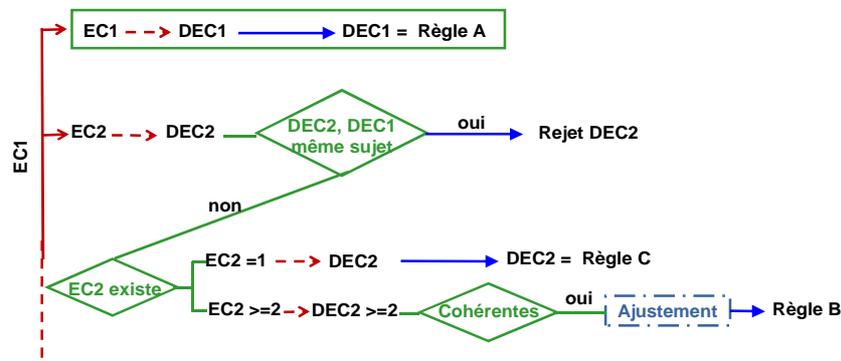


Figure 3 : Exemple de formulation de règles

- **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)**

L'analyse et l'exploitation des résultats des entretiens et de l'enquête, croisées avec les études de marché et historique ont permis d'élaborer des règles d'identification et de quantification des matériaux de rampant en zinc suivante :

- Règles classe A :

- 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.

- Règles classe B :

- 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).

- **Exemple de règles de corrélation entre la famille de matériaux ou matériau du rampant et le matériau de gouttière**

Les règles de corrélation entre les rampants en tuiles et les matériaux de gouttière (RCGT) sont de classe B :

- 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).

5. 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 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.

$$\text{Équation 3 : } F_{Zn} = \sum_{i=\text{matériau}} (f_{i,\text{rampant}} \times S_{i,\text{rampant}} + f_{i,\text{gouttière}} \times l_{i,\text{gouttière}} + f_{i,\text{noue}} \times l_{i,\text{noue}})$$

Avec : $S_{i,\text{rampant}}$ (m^2) : surface du matériau i de rampant

$l_{i,\text{gouttière}}$ (ml) : longueur du matériau i de gouttière

$l_{i,\text{noue}}$ (ml) : 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 2](#).

- **Calcul de l'incertitude sur le flux**

Le calcul de l'incertitude sur le flux s'effectue en utilisant l'Équation 4. Ce calcul combine l'incertitude sur le flux unitaire du contaminant et l'incertitude sur la dimension de l'élément du toit. 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.

$$\text{Equation 4 : } IC_{\text{matériau}} = \sqrt{(D \times IC_f)^2 + (f \times IC_e)^2}$$

$$IC_{\text{entité}} = \sqrt{\sum_{i=\text{matériau}} (IC_i^2)}$$

$$IC_{\text{ville}} = \sqrt{\sum_{i=\text{entité}} (IC_i^2)}$$

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.
- 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.

RESULTATS

1. Variabilité de la distribution des matériaux par zone historique et par classe de bâtiments

La distribution des matériaux de toiture est variable d'une zone historique à une autre (cf. Figure 4). 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%.

Dans une même zone historique, la distribution des matériaux de toiture est variable d'une classe de bâtiments à une autre (cf. Figure 5). Ainsi, dans la zone historique 1900-1950, les toitures des habitats individuels sont à 80% en tuile alors que pour les équipements d'enseignement la majorité des toitures sont des terrasses.

Donc, le calcul effectué à Créteil montre bien que le découpage en zones historiques et en classes bâtiments de l'échelle urbaine considérée permet de mieux quantifier les matériaux de toiture à l'échelle urbaine.

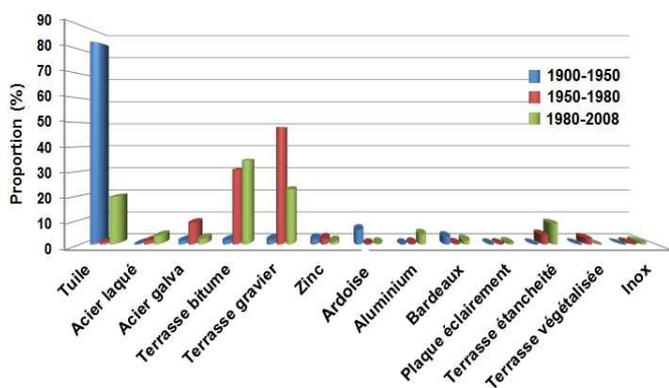


Figure 4 : Variabilité de la distribution des matériaux par zone historique

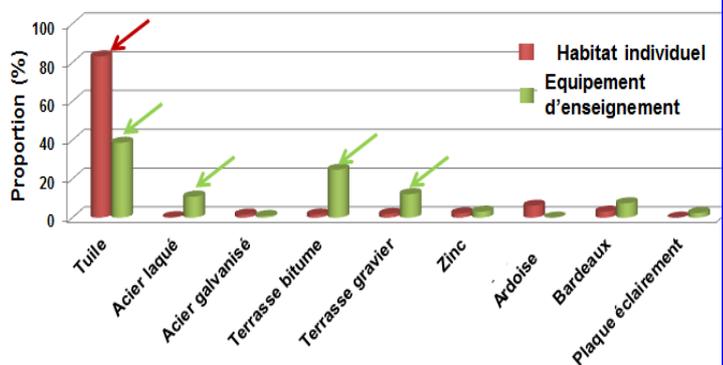


Figure 5 : Variabilité de la distribution des matériaux par classe de bâtiments dans la zone 1900-1950

2. Variabilité de l'émission du zinc

L'émission du zinc par les toitures à l'échelle de la ville dépend de la période de construction d'une classe de bâtiment (cf. Erreur ! Source du renvoi introuvable.4). Si nous prenons la classe « habitat collectif » son flux unitaire du zinc est le plus important pour la période 1900-1950 avec $0,67 \text{ g/an/m}^2$. Ce flux chute pour atteindre $0,1 \text{ g/an/m}^2$ pour la période 1951-1980 (trente glorieuses), durant laquelle la construction des habitats collectifs se manifeste par des tours avec des toitures-terrasses.

La zone historique 3 (1981-2008) est la moins émettrice du zinc avec $50,32 \text{ kg/an}$ par rapport aux autres zones historiques. Ainsi, pour chaque classe de bâtiment construite durant une période historique précise correspond un ratio d'émission du zinc spécifique

Tableau 4 : 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 unitaire du zinc $\pm 2\sigma \text{ (g/an/m}^2\text{)}$	Flux unitaire du zinc $\pm 2\sigma \text{ (g/an/m}^2\text{)}$	Flux unitaire du zinc $\pm 2\sigma \text{ (g/an/m}^2\text{)}$
Habitat collectif	$0,67 \pm 0,31$	$0,1 \pm 0,08$	$0,08 \pm 1,30$

...
Flux par zone	0,46±0,12	0,31±0,08	0,11±0,32

3. Distribution du flux du zinc entre rampant, gouttière et noue

D'après la Figure 6, 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.

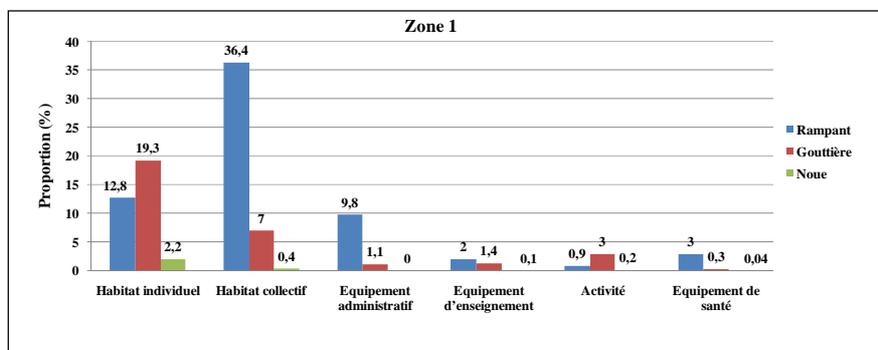


Figure 6 : Distribution du flux du zinc dans la « zone historique 1 » émis par les rampants, les gouttières et les noues

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 qu'elles ont les mêmes matériaux que les gouttières.

4. Flux global du zinc à l'échelle de la ville de Créteil

A 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% :

Les évaluations des flux annuels du zinc issus des toitures à grandes échelles sont très limitées dans la littérature (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.5**). 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 : 478mg.m⁻².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 mg.m⁻².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 mg.m⁻².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.

Tableau 5 : 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 (mg.m ⁻² .an ⁻¹)	Site	Références
Toitures	315 (±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)

Pour les eaux pluviales les mesures sont effectuées à l'exutoire dans les réseaux d'assainissement pluviaux (cf. Tableau 5). 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 mg.m⁻².an⁻¹) par rapport à celui mesuré dans un site avec 3,3% des toitures en zinc (39,8 mg.m⁻².an⁻¹). De plus, dans notre étude 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 mg.m⁻².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.

CONCLUSIONS

Ce travail de thèse a permis de développer une méthode générale d'évaluation des flux de contaminants issus des ruissellements des matériaux de toiture à l'échelle urbaine. 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 (des outils relevant des sciences de l'ingénieur et des sciences sociales) 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.

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.

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. 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.

VALORISATION

Manuscrit de thèse

Sellami-Kaaniche E., 2014, 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. Thèse de Doctorat de l'université de Paris-Est, spécialité « Sciences et Techniques de l'environnement » soutenue le 25 juin 2014. Directeur de thèse : G. Chebbo ; encadrant principal : Bernard de Gouvello.

Publications dans des revues à comité de lecture

Sellami-Kaaniche E., de Gouvello B., Gromaire M.-C. and Chebbo G., 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) 21:5284–5296.

Conférences

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. *8th International conference on sustainable techniques and strategies in urban water management*, June 23rd – 27th 2013, Lyon: GRAIE, 10 p.

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*, Graz (Autriche)

Sellami-Kaaniche E., de Gouvello B., Gromaire M-Ch. et Chebbo G., 2013, Influence des matériaux de toiture sur la qualité physico-chimique de l'eau de pluie récupérée au niveau du bâtiment : Proposition d'une approche intégrée. Colloque de l'ASEES « Utilisation des eaux usées traitées et des eaux pluviales », 10-11 avril 2013, Paris

CONTACTS

Emna Sellami-Kaaniche : emnasellamim@gmail.com
Bernard de Gouvello : bernard.degouvello@leesu.enpc.fr
Marie-Christine Gromaire : gromaire@leesu.enpc.fr
Ghassan Chebbo : chebbo@leesu.enpc.fr;