

## 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  $813 \text{ kg.an}^{-1}$  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. This 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 – is based 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) with respect 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 calculation 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 namely 813 kg.an<sup>-1</sup> 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 work. 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. In order to apply this method to any contaminant, different tracks were drawn to define an optimized approach to produce of runoff rates for different typical situations.

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