

# Résumé

Ce travail de thèse a visé le développement d'un outil d'évaluation des flux métalliques annuels émis par les matériaux de couvertures à l'échelle d'un bassin versant, dans le contexte architectural et météorologique de l'Île-de-France. La méthodologie mise en place pour tendre vers ce but repose sur (1) l'évaluation des émissions annuelles de métaux par différents matériaux métalliques de couverture classiquement utilisés dans la région grâce à une approche expérimentale sur bancs d'essais, (2) l'établissement d'un cadre méthodologique pour la modélisation des flux métalliques émis à l'échelle annuelle par les toitures d'un bassin versant qui se base d'une part sur la modélisation des émissions métalliques par les matériaux à différentes échelles spatiales et temporelles (en fonction de la pluviométrie, de la géométrie du toit...) à partir des données obtenues sur les bancs d'essais, et d'autre part sur la quantification des surfaces métalliques des toitures d'un bassin versant.

La première partie du travail a donc consisté à développer et à exploiter, sur deux sites différents, des bancs d'essais expérimentaux d'1/2 m<sup>2</sup>, testant 12 matériaux métalliques issus de 5 familles (zinc, cuivre, plomb acier, aluminium), sous différentes mises en œuvre (panneaux, gouttières, crochets de fixation). 13 espèces métalliques ont été quantifiées dans les eaux de ruissellement collectées ce qui a permis (1) d'acquérir une importante base de données de taux de ruissellement annuels par les différents matériaux, mettant en évidence que les taux de ruissellement annuels obtenus peuvent être assez importants, de l'ordre de plusieurs grammes par m<sup>2</sup> et par an pour les éléments constitutifs des matériaux, (2) de hiérarchiser ces matériaux en fonction de leur potentiel polluant, à travers la définition d'un indice de contamination métallique se basant sur les émissions de Cd, Cu, Ni, Pb et Zn et permettant de tenir compte des différences de toxicité des métaux.

Une modélisation des émissions métalliques par les matériaux à différentes échelles de temps a été réalisée, conduisant à la conclusion que la hauteur de pluie, ainsi que la durée d'exposition sont des paramètres fondamentaux. Il est apparu que la hauteur de pluie seule est suffisante pour modéliser les émissions métalliques par les matériaux à des échelles de temps longues mais ne suffit pas à modéliser ces émissions sur quelques semaines. Un modèle plus complexe, basé sur une hypothèse d'accumulation / dissolution de produits de corrosion à la surface des matériaux donne des résultats satisfaisant à ces échelles de temps plus courtes.

L'extrapolation spatiale des résultats de ruissellement obtenus sur les bancs d'essais s'est basé sur d'autres expérimentations, d'abord sur bancs d'essais conduisant à la conclusion que la longueur d'écoulement n'a pas d'influence sur la masse de métal entraînée dans le ruissellement, qui peut être calculée à partir de la hauteur de pluie, de la surface projetée et de l'inclinaison du panneau (qui s'avère négligeable quand elle est inférieure à 50°); puis à l'échelle de toits réels pour une étape de validation.

Dans la seconde partie de ce travail, la quantification des surfaces de rampants à l'échelle d'un bassin versant a été effectuée grâce à un outil de classification d'image basé sur l'analyse de la radiométrie des matériaux à partir d'une photo aérienne. Les résultats obtenus sont encourageants, avec environ 75 à 80% des toits qui bien classés à l'issue de la classification. Les principales erreurs reposent sur des confusions de l'outil entre des matériaux de radiométries voisines (ardoise / zinc par exemple, qui peuvent être proches en fonction du degré d'ensoleillement). Un travail exploratoire a été mené pour la prise en compte des éléments singuliers – généralement en métal – des toitures, à partir de l'utilisation des documents techniques unifiés. L'évaluation des surfaces métalliques concernées s'est avérée délicate à mettre en œuvre de façon automatique du fait de la petite dimension de ces éléments, non visibles sur une photo aérienne.

**Mots clés :** toitures métalliques, eaux de ruissellement, zinc, plomb, cuivre, aluminium, aciers, taux de ruissellement, modélisation, classification d'image.



# Abstract

This thesis aimed to develop a tool for the evaluation of annual metallic flows emitted from roofing materials at the scale of a watershed in the architectural and meteorological context of Paris conurbation. The methodology used in this work is based on (1) the assessment of annual metallic emissions from different metallic materials typically used for roofing in the region considered through an experimental test bed, (2) the establishment of a methodological framework for modelling the metallic flow emitted from the roofs of catchment area, which is based both on the modelling of metal emissions from the materials at different spatial and temporal scales (depending on rainfall, geometry of the roof ...) from data obtained on the test bed, and on the quantification of metallic surface areas of roofs in the catchment area.

The first part of the work has been based on the exploitation of experimental test beds of 1 / 2 m<sup>2</sup>, testing 12 metallic materials from 5 families (zinc, copper, lead, steel, aluminium) in various implemented (panels, gutters, fixing brackets, exposed on two different sites. 13 metallic species were quantified in the collected runoff which allowed (1) to acquire a large database of annual runoff rates by different materials, highlighting that the annual runoff rates obtained can be fairly important, with an order of magnitude of several grams per square meter per year for the constitutive elements of materials, (2) to classify these materials according to their polluting potential, through the definition of an index of metal contamination taking into consideration the emissions of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn and the differences in toxicity of metals.

A modelling of metal emissions from the materials at different time scales has been conducted, leading to the conclusion that the rainfall quantity and the duration of exposure are fundamental parameters. It appeared that the rainfall value is sufficient to model metallic emission from materials for long time scales but not enough to model these emissions on a few weeks period. A more complex model, based on an assumption of accumulation / dissolution of corrosion products on the surface of the material gives satisfactory results for these time-scales periods.

The spatial extrapolation of results obtained on the test bed scale was based on other experiments, first on test beds, leading to the conclusion that the length of flow has no influence on the mass of metal entrained in the runoff, which can be calculated from the rainfall quantity, the projected area and inclination of the panel (which is negligible when it is below 50 °), and then at the real roof scale for a validation step.

In the second part of this work, quantification of surface areas of roofs at the scale of the catchment was conducted using a classification tool image analysis based on the radiometry of materials. The results are encouraging, with about 75 to 80% of roofs ranked on the basis of classification. The main errors are due to confusions between materials presenting nearby radiometry (slate / zinc, for example, which can be close depending on the amount of sunshine). Exploratory work was conducted for the consideration of singular elements - usually realized in metal -, from the use of unified technical documents. The evaluation of metal surfaces concerned has proved difficult to implement in an automatic way because of the small size of these elements, not visible on an aerial photo.

**Keywords:** metal roofing, runoff, zinc, lead, copper, aluminium, steel, runoff rate, modelling, image classification.

---