



OPUR : Observatoire des Polluants Urbains en Île de France

Thème de recherche : Apport de l'atmosphère

Action de recherche : 1.1 – Evaluation des apports atmosphériques
par modélisation

**MODELISATION DES FLUX DE DEPOTS
ATMOSPHERIQUES DE METAUX DANS DES BASSINS
VERSANTS EN MILIEUX URBAIN**

Fiche de Synthèse

Thèse de doctorat de Nicolas Chérin



La thèse de Nicolas Chérin a été réalisée dans le cadre du projet ANR INOGEV. Elle a permis un premier traitement des objectifs de l'action 1.1 :

- Quantifier par modélisation les flux de micropolluants provenant de l'atmosphère dans le bassin versant de Sucy-en Brie en Île de France.
- Identifier les catégories de sources (locales, régionales, nationales et trans-frontières) qui contribuent à ces dépôts.

1 MODELISATION DU DEPOT SEC EN MILIEU URBAIN

Historiquement, les dépôts atmosphériques ont été étudiés et modélisés pour évaluer l'impact sur les écosystèmes des dépôts acides, de l'eutrophisation ou encore l'impact sanitaire des polluants tels que le mercure ou les polluants organiques persistants (POP), qui s'accumulent dans la chaîne alimentaire.

Parmi les dépôts atmosphériques, on distingue les dépôts dits humides et ceux dits secs. Les dépôts humides comprennent plusieurs processus, et on distingue généralement les dépôts humides associés aux précipitations (pluie, neige, grêle) et les dépôts humides occultes associés à la sédimentation de gouttelettes de brouillards ou de nuage. Le dépôt humide ne dépend pas de la surface de dépôt et n'est donc pas particulier aux zones urbaines. Les dépôts secs englobent l'ensemble des dépôts par des processus qui ne dépendent pas des précipitations. Contrairement au dépôt humide, le dépôt sec dépend grandement du type et de la nature des surfaces de dépôt.

Les problèmes de pollution historique évoqués précédemment ont été abordés d'un point de vue atmosphérique plutôt à grande échelle spatiale (échelle continentale). Par conséquent, les modèles de dépôts secs atmosphériques n'ont pas été développés pour simuler les flux de dépôt dans les zones urbaines. En effet, le milieu urbain est caractérisé par une géométrie complexe, et des surfaces variées. Le dépôt de polluants atmosphériques contribue aussi à la contamination des eaux pluviales et se retrouve à l'exutoire. Il y a donc un besoin d'un modèle de dépôt sec prenant en compte la géométrie et les caractéristiques du milieu urbain. Le projet INOGEV a donné l'occasion de développer un tel modèle dont les principaux concepts sont présentés ci-dessous.

1.1 Généralités sur la modélisation du dépôt sec

Le transfert de polluants depuis l'atmosphère vers la surface est gouverné par un grand nombre de processus, qu'ils soient chimiques, physiques ou biologiques. Pour aborder ce problème, la notion de vitesse de dépôt a été introduite. Elle relie le flux de dépôt sec à la concentration du polluant à une certaine hauteur dite de référence

$$F(z_{ref}) = V_d(z_{ref}) * C(z_{ref})$$

Dans les modèles opérationnels de prévision de la qualité de l'air la vitesse de dépôt est donnée par une formulation dite « résistive » (par analogie à un circuit électrique). Une formulation cohérente pour les particules fait également apparaître la sédimentation :

$$V_d = V_s / (1 - \exp(- [R_a + R_s] V_s))$$

A La première étape du transfert est associée à une résistance aérodynamique (R_a). Cette résistance au transfert est élevée dans une atmosphère stable où la dispersion turbulente est faible ; elle est faible dans une atmosphère instable où la dispersion turbulente est importante et peut donc transporter de manière efficace les polluants vers la surface. Pour une particule, la deuxième étape, qui représente le transfert dans la couche de surface, dépend traditionnellement de la diffusion brownienne, de l'inertie, de l'interception (R_s). Les expérimentations mener dans le cadre du projet ont montré l'importance d'éventuelles charges électriques et surtout de la thermophorèse dans cette étape. Enfin pour les particules les plus massives la sédimentation (V_s) devient prépondérante. Le travail de modélisation s'est focalisé sur la résistance aérodynamique, car c'est la résistance au dépôt qui dépend des caractéristiques de l'écoulement et qui est donc grandement impactée par le milieu urbain.

L'approche développée ici permet de différencier les surfaces urbaines (route, toit, mur), ce qui n'est pas possible avec l'approche par rugosité habituellement employée pour les modèles à grande échelle. Cette distinction permet ensuite naturellement de traiter les diverses surfaces urbaines, et les divers matériaux qui les composent, avec des résistances spécifiques. Les expérimentations sur le dépôt sec menées dans le projet INOGEV ont montré l'importance de cette prise en compte différenciée pour une estimation des flux de dépôt sec.

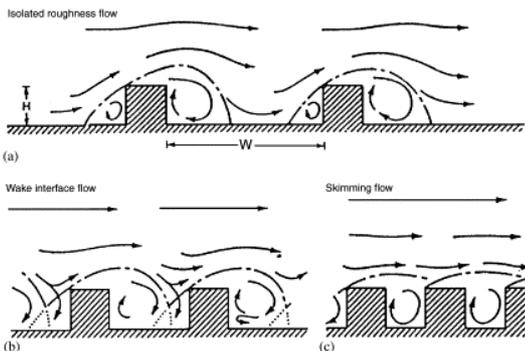
1.2 Paramétrisation de la turbulence en milieu urbain

Depuis quelques années, un certain nombre de modèles de canopée urbaine ont été développés afin de rendre compte de l'influence des éléments du bâti sur les forces de traînée, les flux de chaleur et le bilan radiatif. On peut considérer trois catégories de paramétrisations de la canopée urbaine :

- Les modèles empiriques
- Les modèles dérivés des modèles de couvert végétal
- Les modèles de canopée urbaine

Ces derniers modèles sont basés sur une géométrie relativement simple, mais appropriée pour représenter les principales caractéristiques dynamiques et thermiques du milieu urbain. Ces modèles ont jusqu'à présent été formulés afin de représenter les flux dynamiques et thermiques en milieu urbain (micrométéorologie urbaine) mais pas les processus de dépôts de polluants. Nous avons donc pris le parti de développer un modèle de type canopée urbaine, basé sur le concept de canyon urbain. L'objectif de ce modèle est de quantifier la résistance aérodynamique (R_a) à partir de profils vertical de vent dans la canopée et d'une longueur de mélange suivant la formulation globale habituellement utilisée.

Cette paramétrisation de la canopée urbaine est basée sur une rue infiniment longue, bordée par deux bâtiments se faisant face, qui seront traités séparément. Cette paramétrisation permet de prendre en compte les effets locaux des bâtiments par l'intermédiaire d'une longueur de mélange locale, et de paramètres clés, caractéristiques de la canopée urbaine (hauteur des bâtiments, largeur des rues, densité du bâti). A l'intérieur de la canopée urbaine, selon sa géométrie, trois régimes d'écoulement peuvent être distingués :



- Dans le cas de canyon très étroit, des tourbillons liés à la taille de la canopée sont générés (effet vortex), similaire à un écoulement dans une cavité. Ce type d'écoulement est appelé écoulement rasant.
- Si le canyon est suffisamment large, une seconde région que nous appellerons zone ventilée apparaît au sein de la canopée, dans la zone au vent. Ce type d'écoulement est appelé écoulement à rugosité isolé.
- Enfin, entre ces deux cas extrêmes, le bâtiment sous le vent va générer une zone ventilée dont l'extension n'atteint pas le sol. Ce type d'écoulement est appelé écoulement à interférence de sillage.

1.2.1 Longueur de mélange en milieu urbain

L'impact des bâtiments sur l'écoulement peut être prise en compte par l'introduction d'une longueur de mélange. En effet, les obstacles à l'écoulement vont générer des tourbillons, dont la taille est proportionnelle à la dimension de ces obstacles. On peut estimer la longueur de mélange résultante, si l'on se place dans les deux cas extrêmes suivants :

- Si la canopée est clairsemée, la turbulence générée par la canopée urbaine est faible. En ce cas, la longueur de mélange suit la loi de paroi développée dans la formulation classique de Prandtl et est simplement proportionnelle à la distance à la paroi.
- Si la canopée est très dense, les grands tourbillons au dessus de la canopée vont être bloqués par la canopée. Il a été notamment démontré que la turbulence dominant à l'intérieur d'une canopée végétale est principalement produite dans la couche de mélange créée par le haut de la canopée. La longueur de mélange induite par cette couche, est alors supposée constante avec l'altitude, et contrôlée par l'épaisseur de cette couche. Il est donc attendu qu'elle dépende de la hauteur des bâtiments.

Suivant la littérature, la longueur de mélange retenue pour notre modèle est obtenue par une moyenne harmonique entre ces deux comportements. L'argument étant que la longueur de mélange doit être contrainte par la plus petite des deux échelles de turbulence, propriété que satisfait la moyenne

harmonique. On a donc finalement une longueur de mélange fonction de paramètres morphologiques de la canopée urbaine (hauteur des bâtiments et densité du bâti).

1.2.2 Profil de vent au sein de la canopée urbaine

La modélisation classique de la résistance aérodynamique implique un profil vertical de vitesse de vent horizontal de type logarithmique en « proximité » de la surface. Celui-ci ne peut cependant théoriquement pas s'appliquer à l'intérieur de la canopée, entre les « rugosités » (constituées à cette échelle par les bâtiments). Dernièrement des travaux en micrométéorologie urbaine ont montré qu'un profil vertical de vitesse de type exponentiel pouvait s'appliquer à l'intérieur de la canopée. Ce profil étant, comme la longueur de mélange, fonction des caractéristiques morphologiques de la canopée.

Cependant la condition d'adhérence au sol (la vitesse du vent s'annule au niveau du sol) n'est pas respectée avec un tel profil. Il s'avère que les données expérimentales des travaux de la littérature tendent à prouver que le profil vertical de vitesse de vent, en proche paroi, est de nouveau de type logarithmique. Afin de rendre compte de ce phénomène, une hauteur limite a été introduite. Elle définit la transition entre le profil exponentiel dans la canopée, et le profil logarithmique en très proche paroi. Ce profil logarithmique en très proche paroi résulte des rugosités locales (constituées à cette échelle par les irrégularités à la surface des matériaux).

1.2.3 Flux de dépôt sec

En accord avec le modèle de canopée urbaine choisi, le flux de dépôt sec doit tenir compte des différents chemins accessibles au dépôt. Les différentes possibilités prises en compte dans le modèle sont résumées par la figure ci-dessous.

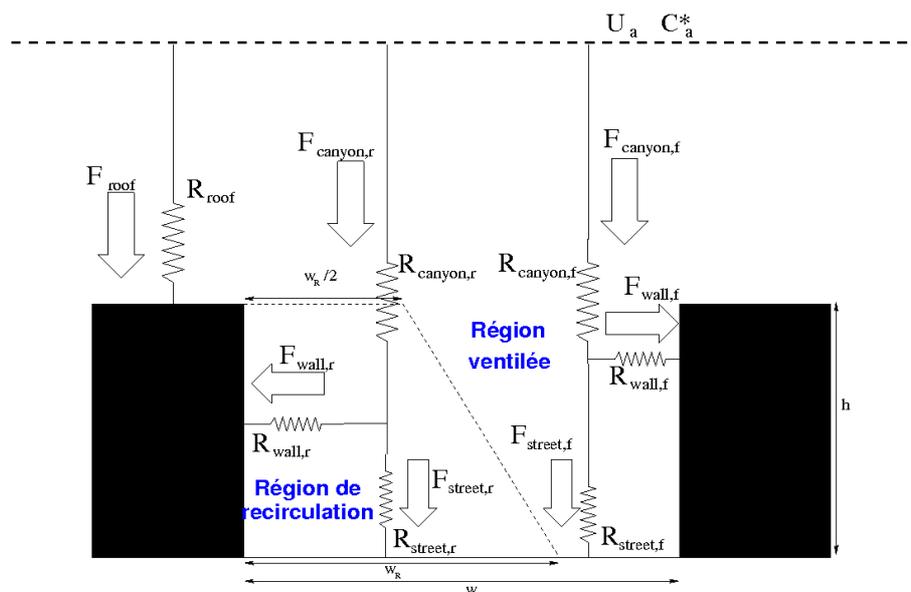


Illustration 1: Réseau de résistance au dépôt sec. C_a^* et U_a sont respectivement la concentration de polluant dans l'air au-dessus de la canopée et la vitesse du vent horizontal.

Afin de calculer le flux de polluants éliminés de l'atmosphère un bilan de masse entre l'atmosphère et les différents secteurs du canyon est effectué, en faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas d'accumulation. Chaque flux dans chaque compartiment du canyon peuvent être définis par un nouveau bilan de masse dans chaque région du canyon. Ces différents bilans permettent de calculer la vitesse de dépôt équivalente « vue » par l'atmosphère au dessus d'une canopée urbaine.

2 SIMULATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

2.1 Description des outils et des domaines de simulations

La modélisation de la dispersion dans l'atmosphère de certains polluants considérés dans le projet INOGEV a reposé sur l'utilisation de modèles déjà existants en plus du modèle de dépôt sec présenté précédemment. Le modèle eulérien de chimie-transport de la plate-forme Polyphemus (<http://cerea.enpc.fr/polyphemus/>) a été employé pour simuler la dispersion du plomb (Pb) et du cadmium (Cd).

Ce modèle résout l'équation de transport qui traduit la conservation de la masse des polluants dans l'écoulement atmosphérique. Cette équation décrit l'évolution des concentrations atmosphériques sous l'influence de divers phénomènes agissant simultanément. Les émissions, naturelles ou anthropiques, introduisent des polluants dans une masse d'air. Le transport et la diffusion de ces polluants sont imputables horizontalement à l'advection moyenne par l'écoulement atmosphérique, verticalement à la turbulence d'origine convective et mécanique. Certains polluants peuvent être dégradés, notamment par photolyse ou oxydation et changer de phase au cours de leur transport. Le retrait des polluants de l'atmosphère peut se faire par dépôt sec ou humide. Le modèle de dépôt sec en milieu urbain présenté précédemment a été incorporé au modèle Polyphemus pour l'évaluation des apports atmosphériques.

Afin de pouvoir évaluer les contributions continentale, nationale et régionale aux apports atmosphériques, différents domaines imbriqués ont été considérés pour la réalisation des simulations. Les domaines les plus grands fournissant des conditions aux limites pour les domaines inclus.

Domaine	Résolution
Europe	60km x 60km
France	15km x 15km
Pays de Loire	5km x 5km
Île de France	3km x 3km
Rhône-Alpes	5km x 5km
Nantes	1km x 1km
Paris	1km x 1km
Lyon	1km x 1km

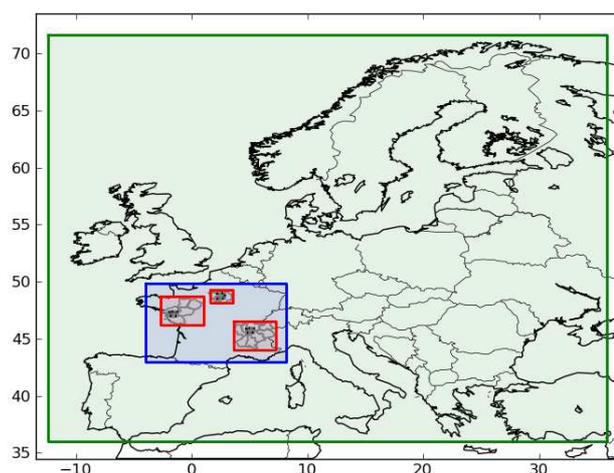


Illustration 2: Domaines de simulation utilisés pour la dispersion atmosphérique.

Un travail spécifique réalisé pour l'élaboration d'un cadastre d'émissions dans le cadre d'INOGEV est décrit au paragraphe suivant. Les données météorologiques nécessaires aux simulations de dispersion atmosphérique ont été produites par des simulations réalisées avec le modèle à méso-échelle WRF (<http://www.wrf-model.org>). Des domaines imbriqués ont été également utilisés pour ces simulations afin de générer les champs météorologiques à des résolutions correspondantes à celles utilisées pour la dispersion.

2.2 Élaboration d'un cadastre des émissions atmosphériques à fine résolution.

Un inventaire d'émissions recense les rejets atmosphériques pour une zone géographique, une période donnée, une ou plusieurs substances et une ou plusieurs activités émettrices. Le terme de cadastre d'émissions est utilisé pour parler d'un inventaire d'émissions distribué spatialement. En plus de l'inventaire d'émissions, il est donc nécessaire de localiser les sources de rejet, généralement sur un maillage régulier de l'espace. La taille des cellules du maillage détermine alors la résolution spatiale du

cadastre. En plus de la spatialisation, les flux de rejets doivent être distribués temporellement pour permettre une modélisation dynamique de la dispersion dans l'atmosphère. Des cadastres à fine résolution sont développés ou en cours de développement en France (cadastres régionaux développés par les AASQA¹, inventaire national spatialisé, ...). Ces données n'ont pu être utilisées dans le cadre du projet INOGEV comme initialement prévu. Des cadastres d'émissions à résolution kilométrique ont été élaborés pour alimenter les simulations pour les trois régions urbaines étudiées : Nantes, Paris et Lyon. La méthodologie appliquée est décrite ci-dessous.

2.2.1 Distribution spatiale des émissions atmosphériques

Pour construire des cadastres à résolution kilométrique une méthode de redistribution de cadastre à échelle continentale a été développée. A l'échelle continentale le programme EMEP (European and Monitoring Evaluation Programme) produit annuellement dans le cadre de la convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CPATLD) des cadastres de polluants atmosphériques à une résolution horizontale de l'ordre de 50km. Ces données sont librement accessibles et issues du traitement des données transmises par les pays membres de la convention (dont la France).

L'approche appliquée pour affiner la résolution du cadastre vise à redistribuer les émissions à l'aide de clés de répartition ou de désagregation. Ces clés de répartition peuvent être des données techniques (superficie, occupation des sols...) et/ou socio-économiques (population, consommation énergétique...). Le choix de ces clefs repose en partie sur les nomenclatures utilisées dans les inventaires d'émissions. Les sources d'émissions peuvent être classées de différentes manières par exemple selon leur caractéristiques physiques :

- On parle de « source ponctuelle », généralement pour de gros émetteurs stationnaires (un incinérateur par exemple). Ces émissions sont concentrées en un seul « point » dont on connaît précisément la position. Il est alors aisé de localiser la maille correspondante et d'y attribuer les émissions générées par cette source.
- Les « sources linéiques » correspondent à la représentation typique des routes, des voies ferrées, etc... En pratique un réseau n'est pas intégralement explicité. Les tronçons les plus émetteurs sont localisés distinctement et les moins émetteurs sont « fondus » dans les sources dites « diffuses » (voir ci-dessous).
- Les « sources surfaciques » représentent les sources ayant une extension horizontale importante (comme les cultures agricoles). C'est aussi la catégorie par défaut pour les émissions « diffuses » pour lesquelles la localisation n'est pas cruciale (sources de faible intensité) ou simplement relativement homogène dans l'espace.

ou par secteur d'activité à l'origine des rejets. La nomenclature utilisée par les pays membres pour rapporter leurs émissions atmosphériques dans le cadre d'EMEP est la nomenclature GNFR établie pour les besoins des missions de la CPATLD. Cette nomenclature distribue les activités émettrices en 21 classes.

Les « Grandes Sources Ponctuelles » (GSP) font de plus l'objet d'une déclaration séparée en plus de leur prise en compte dans le cadastre global européen. Pour la spatialisation, le cas particulier des GSP peut donc être traité directement, leurs coordonnées géographiques étant référencées. Ces sources sont donc retirées du cadastre européen et affectées aux cellules correspondantes des cadastres kilométriques le cas échéant.

Pour les sources restantes du cadastre européen différentes clefs de répartition ont été employées. Le tableau ci-dessous résume les données utilisées pour chaque secteur d'activité de la nomenclature GNFR.

Secteur GNFR	Clefs de répartition
--------------	----------------------

1 Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air - Ensemble d'associations instituées dans le cadre de la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de L'Énergie.

A_PublicPower	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c121 : « Zones industrielles et commerciales »
B_IndustrialComb (Industrial combustion plants)	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c121 : « Zones industrielles et commerciales »
C_SmallComb (Small combustion plants)	données INSEE densité de population
D_IndProcess (Industrial processes)	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c121 : « Zones industrielles et commerciales »
E_Fugitive (Fugitive emissions)	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c123 : « Zones portuaires »
F_Solvents	données INSEE densité de population
G_RoadRail	données ADéLie du Sétra et données DIRIF trafic journalier moyen annualisé (TMJA)
H_Shipping	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c123 : « Zones portuaires »
I_OffRoadMob (Off road mobility)	données INSEE densité de population
J_AviLTO (Civil aviation - Domestic LTO)	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c124 : « Aéroports »
K_CivilAviCruise (Civil aviation - domestic cruise)	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c124 : « Aéroports »
L_OtherWasteDisp (Other waste displacement)	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c132 : « Décharges »
M_WasteWater Waste water	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c132 : « Décharges »
N_WasteIncin Waste Incineration	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c132 : « Décharges »
O_AgriLivestock Agricultural livestock	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c132 : « Territoires agricoles »
P_AgriOther Agricultural (Other emissions)	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c132 : « Territoires agricoles »
Q_AgriWastes Agricultural wastes	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c132 : « Territoires agricoles »
R_Other	données INSEE densité de population
T_IntAviCruise International aviation (Cruise)	Corine land cover map (CLC) 2006 clc06_c124 : « Aéroports »

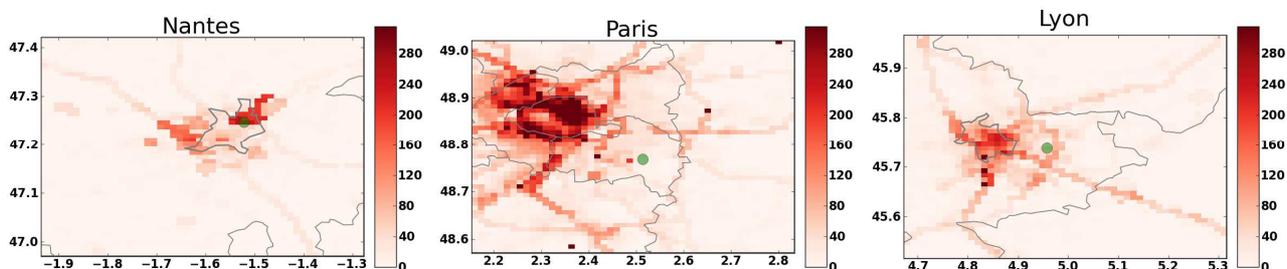


Illustration 3: Cadastre d'émissions atmosphériques de Cd (en g/km²/an) élaboré à partir de la méthodologie présentée ci-dessus. Les points verts marquent l'emplacement des bassins versants considérés dans le projet INOGEV.

2.2.2 Distribution temporelle des émissions atmosphériques

Les inventaires sont généralement réalisés sur une base annuelle, et ne font pas apparaître des facteurs potentiellement importants comme les saisons. Il existe cependant des profils temporels moyens qui permettent de répartir les émissions dans le temps (Cf. horaire de trafic, modulation horaire fournie par les industriels...). Parmi les profils temporels types que l'on peut rencontrer, on trouve:

- Les activités peu ou pas dépendantes de la période de l'année : on regroupe ici tous les types d'activités dont le fonctionnement est continu ou quasi continu tout au long de l'année. Il est notamment possible de nuancer le profil en tenant compte des arrêts possibles de l'activité (pour maintenance par exemple).
- Les activités à cycles saisonniers réguliers : on recense ici l'ensemble des activités saisonnières ou phénomènes naturels dépendant des saisons (émissions biotiques comme la fabrication du vin).
- Les activités dépendant de paramètres connus : on réunit sous cette appellation l'ensemble des activités qui dépendent de paramètres tels la consommation d'énergie ou d'eau chaude, qui dépendent des conditions climatiques.
- Les activités à fluctuation « aléatoires » : on retrouve ici toutes les autres activités pour lesquelles on observe de fortes variations non modélisables, comme les arrêts imprévus d'usines pour travaux.

On nuance aussi au besoin l'intensité de l'activité pour tenir compte des différents cycles temporels (cycle nuit/jour, semaine/week-end, etc ...). A partir de profils d'activités théoriques, il est possible de distribuer temporellement les émissions annuelles, en ayant recours pour cela à des clés de distribution. En l'occurrence, trois clés de distribution temporelle ont été combinées afin d'avoir en sortie un cadastre horaire à partir de l'inventaire annuel:

- clés de distribution des émissions réparties par mois.
- clés de distribution des émissions en fonction du jour de la semaine.
- clés de distribution des émissions réparties en fonction de l'heure d'émission.

2.3 Résultats des simulations de dispersion atmosphérique

Sur la base des données présentées dans les paragraphes précédent des simulations ont été réalisées pour les trois régions urbaines entourant les bassins versants du projet INOGEV. Ces simulations ont été réalisées pour le Pb et le Cd d'octobre 2011 à avril 2012.

2.3.1 Résultats pour les dépôts secs

Les résultats obtenus avec les simulations ne sont pas directement comparables aux mesures de la campagne d'observation réalisée sur le site du bassin versant du Pin Sec à Nantes du fait de la non correspondance des périodes de simulation et d'observation. Cependant, les ordres de grandeurs obtenus avec la simulation pour le Pb et le Cd apparaissent cohérents avec ceux rapportés par les observations.

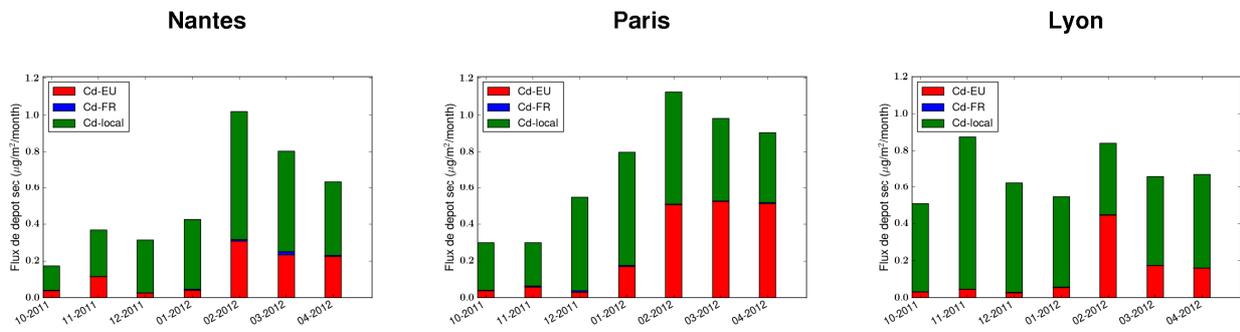


Illustration 4: Flux de dépôt sec de Cd (en $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{mois}$) et contributions des émissions locales (vert), nationales (bleu) et européennes (rouge).

Étant donné le grand nombre de données utilisées pour réaliser ces simulations les sources d'incertitudes sont potentiellement nombreuses. Cependant le comportement relativement simple, sans chimie, des métaux simulés lors de leur transport atmosphérique et les expériences de simulation antérieures au projet INOGEV incitent à attribuer la principale source d'incertitude dans le cas présent au cadastre d'émissions. Notamment le cadastre utilisé pour ces simulations n'inclut pas les émissions naturelles. Or les analyses réalisées au microscope à balayage électronique sur certains échantillons de la campagne d'observation ont mis en évidence une contribution potentiellement importante de ces émissions. D'autre part le cadastre des émissions anthropiques peut-être affiné. Une comparaison aux autres cadastres à fine résolution en cours de réalisation pourrait fournir une estimation des incertitudes sur ce point.

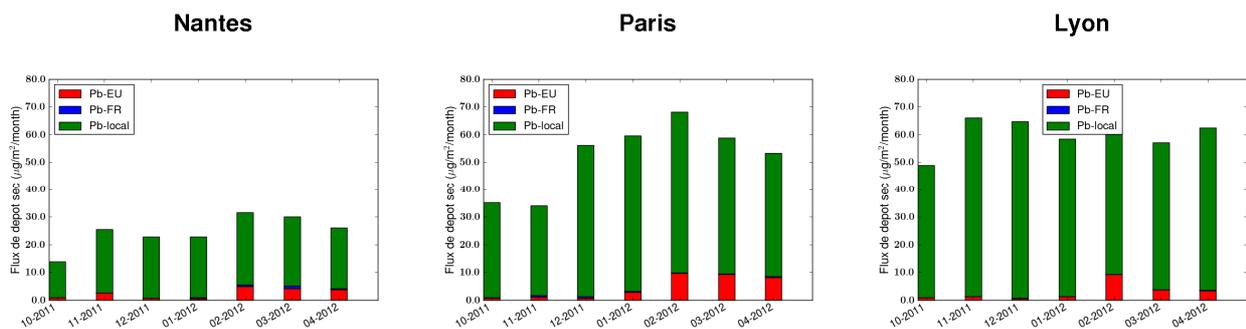


Illustration 5: Flux de dépôt sec de Pb (en $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{mois}$) et contributions des émissions locales (vert), nationales (bleu) et européennes (rouge).

Les flux de dépôt sec sont plus importants pour les bassins versants de Paris et Lyon que pour celui de Nantes malgré la proximité immédiate de ce dernier avec une zone d'émissions relativement plus importantes. Ceci illustre l'effet de propagation et de dispersion du transport atmosphérique sur les concentrations des polluants.

Le comportement linéaire des concentrations simulées vis à vis des différents forçages de la modélisation et notamment des émissions permet de suivre distinctement les contributions des différentes zones géographiques. Les résultats montrent des comportements contrastés pour le Cd et le Pb. Les flux de dépôt sec pour le Pb sont dominés par les émissions locales pour les trois bassins versants. La contribution des émissions nationales reste toujours très faible. Celle des émissions du reste de l'Europe peut atteindre certains mois près de 20% du dépôt sec. Dans le cas du Cd la contribution des émissions européennes se révèle dominante certains mois pour les bassins versant de Sucy-en-Brie (Paris) et Chassieu (Lyon). Elle n'apparaît jamais dominante pour le bassin du Pin Sec (Nantes) mais peut dépasser 30% du dépôt sec.

2.3.2 Résultats pour les dépôts humides

Comme pour les flux de dépôt sec, les résultats obtenus avec les simulations ne sont pas directement comparables aux mesures de la campagne d'observation réalisée sur le site du bassin versant du Pin Sec à

Nantes. Ici également les ordres de grandeurs obtenus avec la simulation pour le Pb et le Cd apparaissent cohérents avec ceux rapportés par les observations. Toutefois le modèle semble sous-estimer les observations. Comme précédemment une des principales sources d'incertitude dans les données du modèle réside dans le cadastre d'émissions utilisé. Ici s'ajoute les incertitudes sur les précipitations issues des simulations réalisées avec le modèle WRF. Le champs de précipitation, forçage principal du modèle de dépôt humide employé pour les simulations, est en effet une des variables météorologiques les plus difficiles à modéliser.

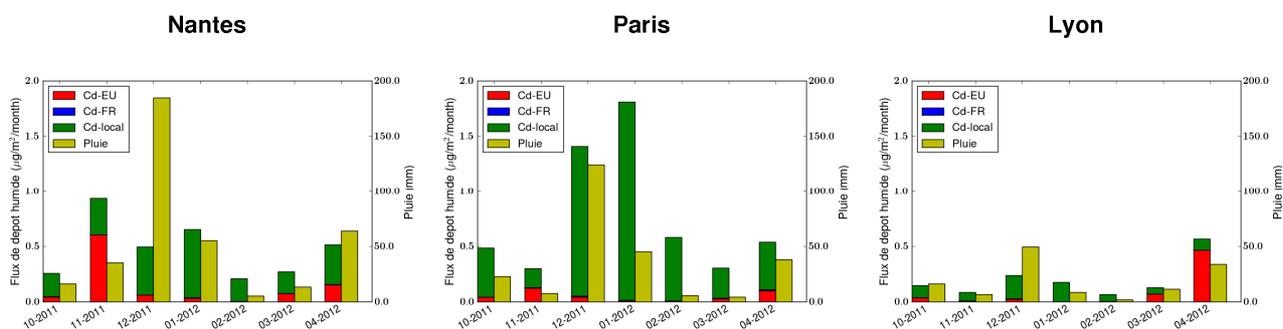


Illustration 6: Flux de dépôt humide de Cd (en $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{mois}$), contributions des émissions locales (vert), nationales (bleu) et européennes (rouge) et cumul des précipitations (en mm).

Les flux de dépôt humide simulés sont d'un ordre de grandeur comparable aux flux de dépôt sec, mais plus fortement variables d'un mois à l'autre. Il n'y a pas de corrélation entre le cumul de précipitation et l'intensité du flux de dépôt. Ceci peut traduire un effet de saturation en cas de fortes précipitations, les concentrations atmosphériques étant totalement rabattues au-delà d'un certain seuil de précipitations.

Contrairement à la situation vue pour le dépôt sec, la répartition des contributions locales, nationales et européennes est semblable pour le Cd et le Pb. La contribution nationale reste minime dans tous les cas simulés. La contribution européenne domine certains mois pour les bassins versants du Pin Sec et de Chassieu mais pas pour celui de Sucy en Brie. Contrairement encore à la situation du dépôt sec, les dépôts humides à Lyon sont pour le Cd inférieurs à ceux de Nantes. Pour le Cd et le Pb les flux simulés pour le bassin de Sucy-en-Brie sont assez nettement supérieurs à ceux des deux autres bassins versants.

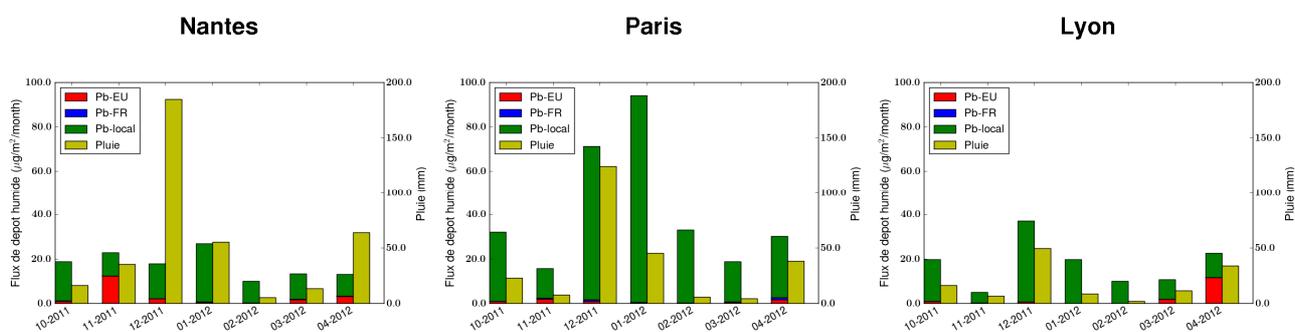


Illustration 7: Flux de dépôt humide de Pb (en $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{mois}$), contributions des émissions locales (vert), nationales (bleu) et européennes (rouge) et cumul des précipitations (en mm).

3 PERSPECTIVES DE LA MODELISATION

Le projet INOGEV a été l'occasion de développer et mettre en oeuvre des outils de modélisation permettant de représenter la dispersion atmosphérique et le dépôt de polluants en milieu urbain. Les simulations réalisées ont permis d'évaluer les apports atmosphériques à la contamination des surfaces des trois bassins versants considérés dans le projet. Les résultats de ces simulations apparaissent satisfaisants mais peuvent être améliorés et complétés. Les pistes d'amélioration identifiées sont :

- L'utilisation d'un cadastre d'émissions naturelles.
- L'évaluation du cadastre anthropique réalisé pour INOGEV par comparaison à d'autres cadastres à fine résolution (cadastre AIRPARIF, inventaire national spatialisé).
- La réalisation d'une analyse de sensibilité des résultats de simulation aux différentes formulations du modèle, notamment celles utilisées pour les processus de dépôts.
- L'utilisation d'un traitement dédié, « sous-maille » des sources locales d'amplitude importante pour chaque bassin versant.