

Incertitudes dans l'évaluation des immissions de polluants en milieu urbain, analyse de sensibilité à partir du logiciel STREET

*Gilles Maignant**

L'étude proposée porte sur l'évaluation des concentrations moyennes annuelles de polluants au sein d'une rue, d'un carrefour ou d'une intersection à partir d'un logiciel intitulé STREET. Comme pour tous les phénomènes environnementaux, l'évaluation des concentrations de polluants en milieu urbain est entachée d'incertitudes scientifiques fortes. L'objectif est de souligner les difficultés de mise en œuvre des modèles d'estimation des immissions de polluants (charge polluante résultante après dispersion par le vent), difficultés engendrées par la qualité des données d'entrée mais aussi par le choix théorique des configurations spatiales d'artères. Ainsi, grâce à ce type de modélisation, il est possible d'évaluer les concentrations théoriques moyennes de polluants émis par le trafic en milieu urbain, en tout point de l'espace, même en l'absence de stations de mesures.

L'étude porte sur des données abstraites et permet ainsi d'évaluer l'influence de différents paramètres sur l'amplitude des concentrations. Elle renseigne sur la manière dont se dispersent les polluants et souligne les paramètres les plus influents. La méthode employée consiste à modéliser en trois dimensions la morphologie urbaine et à tester l'influence d'un paramètre, toutes choses égales par ailleurs. Cette méthodologie repose sur l'utilisation du logiciel STREET que nous décrivons brièvement maintenant.

Le logiciel STREET : un outil d'aide à la décision en matière de suivi de la pollution

La base scientifique de STREET repose sur un ensemble de simulations tridimensionnelles de morphologie urbaine (MISKAM) s'appuyant sur la résolution des équations de la mécanique des fluides (Navier-Stokes) et de situations météorologiques.

MISKAM est un modèle eulérien non hydrostatique de modélisation de la dispersion de polluants en milieu urbain ; ce qui signifie qu'il résout les

* UMR 6012 ESPACE, équipe de Nice, 98 bd Édouard-Herriot, BP 3209, 06204 Nice cedex, France

équations de la mécanique des fluides sur un espace découpé en mailles élémentaires et modélise remarquablement bien les phénomènes de turbulence. Il est utilisé pour la simulation des champs de vitesse du vent et de concentrations à l'échelle d'une rue ou d'un croisement. Les dimensions traitées avec MISCAM sont de l'ordre de quelques centaines de mètres. Pour STREET, les dimensions des catégories de rues et croisements simulés varient entre 280 à 320 m de longueur avec une hauteur maximale d'environ 100 m. Le gradient de température n'est pas pris en compte mais les résultats obtenus avec une simulation qui prend en compte le gradient vertical de la température et une simulation sans gradient a montré un effet inférieur à 5 % pour le résultat final de la concentration moyenne annuelle d'un polluant. La rugosité, qui sert à qualifier un état de surface, est définie à 0,1 m pour les bâtiments et à 0,5 m pour le sol.

Quatre-vingt-dix-huit configurations de rues représentant la plupart des types d'artères et de carrefours existant dans nos villes, ainsi que 30 situations météorologiques caractéristiques sont intégrées dans le modèle. À partir de ces situations constituant l'une des deux bases de données en amont de STREET, et de la deuxième base de données comprenant de nombreux facteurs d'émissions unitaires, tenant compte de la composition fine du trafic (Bourdeau, 1997), STREET combine les facteurs d'émissions d'une situation de circulation avec les concentrations unitaires de la base de données et restitue la concentration annuelle maximale pour les paramètres suivants : composés organiques volatils (COV), benzène, particules (PM10), dioxyde d'azote (NO₂), monoxyde de carbone (CO) et dioxyde de soufre (SO₂). (figure 1)

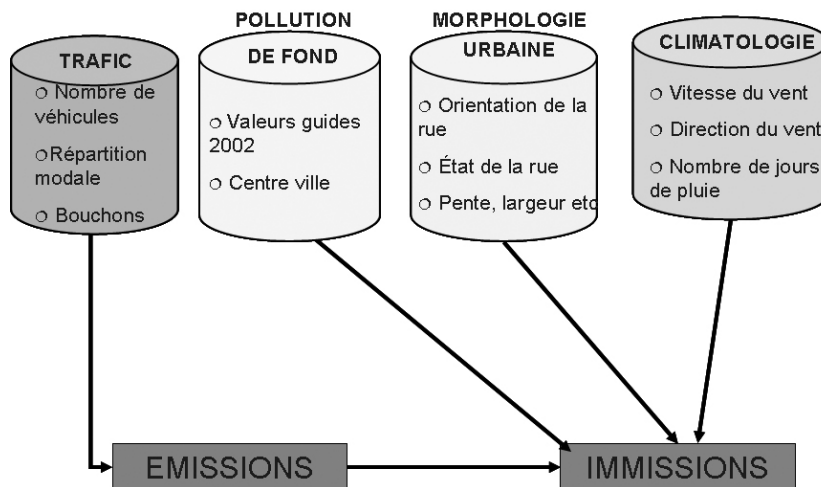
Analyse de sensibilité

Afin d'estimer l'influence de certains facteurs, deux classes de paramètres ont été établies : les paramètres fixes et les paramètres variables.

Les paramètres fixés pour l'étude sont les suivants : l'orientation, la pente et l'état de la rue (une rue en bon état est une rue dont la chaussée n'est pas déformée et ne possède pas de trous, ce paramètre agit essentiellement sur la remise en suspension des particules), la répartition modale du trafic (composition du parc routier), le pourcentage de bouchons, la pollution de fond (c'est-à-dire la pollution amenée par la proximité des autres rues qui ne résulte pas de la pollution produite sur l'axe) et la direction du vent (direction prise ni parallèlement, ni perpendiculairement à l'axe de la rue).

Les paramètres variables de l'étude sont le nombre de véhicules par jour, le nombre de jours de pluie défini comme jour où il est tombé au moins 0,1 l/m² de pluie sur 24 heures. (en % annuel), la vitesse du vent et la configuration de l'artère (morphologie urbaine). C'est donc l'influence de ces paramètres qui est testée.

Figure 1 : Principe de calcul des immissions de polluants, méthodologie STREET.



L'orientation de la rue a été choisie de manière arbitraire (140°), la pente est considérée comme nulle, une pente plus importante augmente les concentrations émises (surtout dans les phases de redémarrage des véhicules) et l'état de la rue est considéré comme bon. Le trafic (nombre de véhicules par jour) est variable mais la répartition modale du trafic est définie comme suit: 10 % de véhicules utilitaires légers (VUL), 5 % de poids lourds, 5 % de bus, 5 % de 2 roues, 75 % de voitures particulières et 20 % de bouchons (perturbations moyennes).

Nous avons choisi de travailler sur des données théoriques, afin de contourner le problème récurrent de la disponibilité des données et de leur exhaustivité. Ceci n'est toutefois pas contraignant dans le cas d'une analyse globale de sensibilité.

La référence prise pour la pollution de fond correspond à des valeurs moyennes annuelles (benzène: 4 μ g/m³, PM10: 20 μ g/m³, monoxyde de carbone: 500 μ g/m³, dioxyde de soufre: 10 μ g/m³, dioxyde d'azote en percentile 98: 90 μ g/m³), moyennes caractéristiques des centres-villes français (50 000 habitants et plus); la direction du vent a été prise comme étant Nord-Sud.

La circulation journalière (nombre de véhicules par jour) est variable de 10 000 à 20 000 véhicules. Les calculs de concentrations sont effectués pour un trafic égal à 10 000 véhicules, 11 000 véhicules etc. et ceci, jusqu'à 20 000 véhicules. Ainsi le calcul pour 11 000 véhicules correspond au calcul

effectué pour 10 000 véhicules dans le cas d'une incertitude de 10 % sur les données du comptage routier, le calcul réalisé pour 20 000 véhicules correspond à une incertitude de 100 % sur le trafic.

De même, toutes choses égales par ailleurs, le nombre de jours de pluie, calculé en pourcentage, varie de 10 à 100 %.

Dans le cadre de cet article, l'impact de la configuration morphologique de l'artère (bâti, gabarit) est estimé à travers trois exemples d'artères, pris parmi les quatre-vingt-dix-huit configurations possibles : S2DS, S2GS et S2NE. Les définitions de ces configurations sont les suivantes :

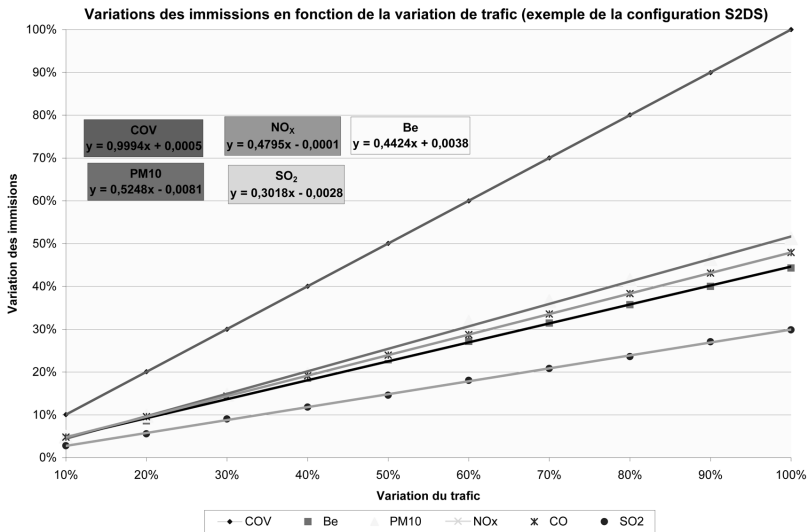
- S2DS : rue à deux voies, bâtiments hauts et immeubles à étages alignés à courtes distances, gabarit de la rue (H/L) égal à 1, c'est-à-dire une rue canyon propice à l'accumulation de polluants.
- S2GS : rue à deux voies, bâtiments mitoyens, gabarit de la rue (H/L) égal à 1.
- S2NE : rue à deux voies, bâtiments alignés unilatéralement à moyennes distances et pare-bruits, distance rue-bâtiment égale à 10 mètres.

Analyse de sensibilité I : influence du trafic sur les scores d'immissions

Quelles que soient la catégorie d'artères et la vitesse du vent, plus le trafic est important, plus les émissions sont importantes, de même pour les immissions (toutes choses égales par ailleurs). Rappelons que le terme immissions désigne la charge polluante résultante sur une artère après dispersion. Mais une incertitude réelle (ou estimée) sur les données de trafic entraîne des incertitudes propagées différentes sur les concentrations de polluants.

Les pentes des droites de régression permettent de déterminer l'incertitude relative aux taux d'immissions en fonction de l'incertitude sur les données de trafic. Ainsi une augmentation de n % du trafic total engendre une augmentation de n % des concentrations de composés organiques volatils, de $n/2$ % des concentrations de benzène, de particules PM10, d'oxydes d'azote et de monoxyde de carbone et de $n/3$ % des concentrations d'oxydes de soufre (SO₃). Ceci signifie que l'on est capable de connaître la marge d'erreur sur les concentrations de polluants connaissant la marge d'erreur sur le trafic. Ceci est très intéressant d'un point de vue décisionnel, car même si l'on ne connaît pas avec précision le trafic, on peut estimer les concentrations de polluants et vérifier si elles respectent les normes préconisées pour la santé ; si ce n'est pas le cas, on peut reproduire la même méthodologie en affinant les calculs notamment par la mise en place d'une campagne de mesures portant sur le trafic, ceci afin de déceler si les dépassements proviennent d'un problème réel, ou bien s'ils sont le résultat d'un calcul trop "grossier".

Figure 2: Incertitudes propagées sur les immissions de polluants en fonction de l'incertitude sur le trafic.



Analyse de sensibilité 2: incertitude sur le nombre de jours de pluie et impact sur les concentrations

Le nombre annuel de jours de pluie est le nombre de jours pour lesquels il est tombé au moins 0.1l/m² sur 24 heures consécutives. Les calculs montrent que l'influence du nombre de jours de pluie sur les concentrations de polluants est nulle excepté pour les particules PM10 (particules de taille inférieure à 10 μ m). En effet, la remise en suspension des particules par abrasion est fortement conditionnée par le nombre de jours de pluie et par l'état de la rue (tableau 1). Un mauvais état de chaussée amplifie les phénomènes d'abrasion. La formule pour le calcul des PM10 par abrasion est la suivante :

$$PM10_{abr} = a * 0.18 * b^{0.52} * \text{poids moyen}^{2.14} * \frac{1}{0.85} * (1 - n_{\text{jours de pluie}})$$

Tableau 1 : Paramètres pour le calcul de l'abrasion en fonction de l'état de la rue.

Route	Bon état	Mauvais état
a	0.8	2
b	0.2	0.4

Les concentrations de PM10 calculées proviennent de deux types : les PM10 produits par abrasion et les PM10 produits par échappement. Pour les PM10 produits par abrasion, trois paramètres interviennent dans le calcul : l'état de la route, le poids du véhicule et le nombre de jours de pluie.

Le rapport des concentrations de PM10 produites par abrasion pour une rue en mauvais état sur les concentrations de PM10 produites par abrasion pour une rue en bon état, pour un véhicule donné, est constant et vaut environ 3,6. Ce qui signifie qu'un mauvais état de la rue amplifie de manière considérable les concentrations en PM10.

Une augmentation de n % du nombre de jours de pluie entraîne une baisse de $n/10$ % des concentrations de particules, à condition d'avoir une morphologie de rue bilatérale (bâtiments disposés des deux côtés de la rue). La pluie est donc favorable à la diminution de la pollution par les PM10 (lessivage).

Analyse de sensibilité 3 : incertitude sur la vitesse du vent et impact sur les concentrations

Si l'on se place dans le cadre d'une morphologie "fermée", c'est-à-dire pour une artère dont les bâtiments sont alignés bilatéralement (par exemple configuration d'artères S2DS), une augmentation de n % de la vitesse du vent entraîne une baisse des concentrations de polluants allant de $n/4$ % à $n/2$ % environ, suivant les polluants concernés (tableau 2).

En morphologie urbaine "ouverte" (alignement unilatéral de bâtiments, par exemple morphologie S2NE), l'impact de la vitesse du vent sur les concentrations de polluants est négligeable à l'exception des composés organiques volatils.

Tableau 2 : Répercussion d'une augmentation de la vitesse du vent sur les concentrations de polluants.

Augmentation de la vitesse du vent (S2DS)	[COV]	[Be]	[PM10]	[NO _x]	[CO]	[SO ₂]
+25%	-19%	-10%	-11%	-10%	-10%	-6%
+50%	-34%	-17%	-20%	-18%	-18%	-12%
+75%	-40%	-21%	-24%	-21%	-21%	-18%
+100%	-49%	-24%	-28%	-26%	-26%	-22%

Globalement, le taux des immissions varie approximativement de manière linéaire avec la vitesse du vent à un endroit donné. Plus la vitesse du vent est forte, plus les concentrations de polluants dans l'air ambiant baissent et ceci pour des émissions constantes ; ce qui signifie que, toutes choses égales par ailleurs, les vents polluants sont les vents faibles. Bien

entendu l'impact du vent sur les concentrations de polluants est plus important dans le cadre d'un bâti disposé de part et d'autre de l'artère que dans le cadre d'un alignement unilatéral (effet de couloir, effet Venturi ou de canalisation).

Analyse de sensibilité 4: influence de la morphologie urbaine sur les scores d'immissions

La charge polluante résultante sur une artère, dépend bien évidemment du trafic, des conditions météorologiques mais aussi de la morphologie urbaine.

Dans toutes les configurations à deux voies étudiées, le rapport H : L intervient, ce rapport est appelé indice de construction de Landsberg (Chémery *et al.*, 1987) où H désigne la hauteur du bâti et L la largeur de la rue, il informe sur la morphologie des artères. Les anglo-saxons utilisent le même indice mais inversé W/H où W (width) est la largeur et H (height) la hauteur. Dans ce cas, une rue canyon est une rue pour laquelle le rapport H/L est strictement supérieur à 1. Cet indicateur permet de souligner l'écartement entre deux bâtiments situés de part et d'autre de l'artère. Si le rapport est inférieur à 1, la rue est dite large, si le rapport est supérieur à 1, la rue est étroite, et dite "rue canyon". Cet indice est sans dimension, il représente donc une valeur absolue, exploitable pour tout type de morphologie.

L'indice de construction de Landsberg est indispensable à la compréhension des phénomènes de pollution. En effet, deux artères de même largeur, de hauteurs de bâti différentes et supportant le même trafic ne produisent pas la même charge polluante. Dans les villes françaises, le rapport H/L est souvent proche de 1 mais certaines rues ne sont pas symétriques dans le sens où les constructions de part et d'autre de la rue peuvent ne pas avoir la même hauteur. De plus, il peut exister des portions d'artères sans bâtiments d'un côté (alignement unilatéral). C'est surtout dans les quartiers anciens que l'on trouve des artères de type canyon, car non conçues initialement pour l'automobile. Ces différentes considérations font qu'une étude sur la pollution urbaine ne peut pas être appréhendée par des modèles bidimensionnels.

En ce qui concerne les composés organiques volatils, le benzène, les PM10, le monoxyde de carbone et le dioxyde de soufre, on constate que les configurations qui produisent les plus fortes concentrations sont S2DS et S2GS. Or ces configurations correspondent à des morphologies urbaines possédant des indices de construction de Landsberg égaux à 1, c'est-à-dire des rues canyons favorables à l'accumulation de polluants. La configuration la plus néfaste est la S2GS. Le passage de la configuration S2DS à la configu-

ration S2GS fait augmenter les concentrations en COV de 52.5 %, de benzène de 22.9 %, de PM10 de 26.8 %, d'oxydes d'azote de 25.2 %, de monoxyde de carbone de 25.2 % et de dioxyde de soufre de 15.3 %. Essayons de voir ce qui différencie ces deux configurations. La configuration S2DS correspond à une rue à deux voies, dont les bâtiments sont hauts (immeubles à étages), espacés à courtes distances et dont l'indice de construction de Landsberg est de 1. La configuration S2GS est une rue à deux voies, dont les bâtiments sont mitoyens et l'indice de construction de Landsberg égal à 1.

Dans les deux configurations, l'indice de construction de Landsberg est le même, pourtant les niveaux de polluants varient dans des proportions importantes. Un autre élément intervient donc, il s'agit de l'écartement entre bâtiments qui permet à la pollution de coloniser un espace plus grand et faire ainsi baisser les taux (facteur de porosité). Plus la ville est poreuse, plus les espaces colonisables ou pas par les flux de polluants sont importants et plus les concentrations ont des chances de baisser. Ainsi, la densification des villes, notamment par le remplissage des dents creuses (espaces interstitiels entre bâtiments) peut asphyxier la ville même en l'absence d'augmentation des émissions unitaires (hausse de trafic, par exemple).


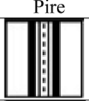
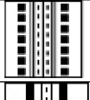
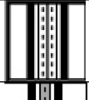








Afin d'étudier l'impact de la morphologie urbaine sur les concentrations des polluants au sein des rues, nous avons calculé pour l'ensemble des quatre-vingt-dix-huit configurations spatiales d'artères, le rapport $[C_{\max}]/[C_{\min}]$ correspondant à la concentration maximale pour un type d'artère (rue à deux voies, à quatre voies etc.) sur la concentration minimale pour ce même type d'artères (tableau 3). Exception faite pour les composés organiques volatils, l'amplitude $[C_{\max}]/[C_{\min}]$ est plus importante pour les rues, les croisements et les intersections à deux voies que pour celles à quatre voies. Ce qui signifie que l'impact de la morphologie urbaine est davantage prépondérant pour les artères à deux voies que pour celles à quatre voies. En effet, pour une zone dont la hauteur de bâti est fixée au préalable, l'indice de construction de Landsberg est davantage influent pour les rues à deux voies. Plus l'artère est étroite, plus les immissions sont dépendantes de la morphologie et du trafic, plus elle est large, plus les immissions sont fonction de la météorologie (vitesse et direction du vent).

Tableau 3 : Facteur de gain maximal de concentrations de polluants par type d'artères pour les sept polluants étudiés (entre la pire et la meilleure configuration).

Rapport $[C_{\max}]/[C_{\min}]$	COV	Benzène	Σ PM10	NO _x	NO ₂ 98	NO ₂ moy	NO ₂ 50	CO	SO ₂
Rue à 2 voies	4,4	1,7	1,9	1,8	1,3	1,4	1,5	1,8	1,4
Rue à 4 voies	8,9	1,5	1,6	1,6	1,2	1,3	1,4	1,6	1,3
Croisement à 2 voies	3,1	1,4	1,4	1,4	1,1	1,2	1,2	1,4	1,2
Croisement à 4 voies	2,3	1,2	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1
Intersection à 2 voies	3,2	1,4	1,6	1,5	1,1	1,2	1,3	1,5	1,3
Intersection à 4 voies	2,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1

Hormis les composés organiques volatils pour lesquels le gain entre la meilleure et la pire configurations est conséquent, le gain est proche de 1.5 pour l'ensemble des polluants. Pour un type d'artères défini (par exemple une rue à deux voies), il est possible de choisir une configuration urbaine qui fait baisser les concentrations. Mais il est aussi possible d'agir autrement, en modifiant le type d'artères. Ceci est particulièrement intéressant pour la construction de villes nouvelles ou pour les opérations de réhabilitation de certains quartiers. En conclusion, les configurations les plus optimales et les moins optimales sont consignées dans le tableau 4; la partie ombrée, présente sur certaines configurations, n'a aucun lien avec la morphologie urbaine, elle informe simplement quel est l'axe principal de circulation.

Tableau 4 : Configurations (rues, croisements, intersections) optimales ou pas, la partie ombrée précise quel est l'axe principal de circulation.

Configurations	Meilleure	Pire
Rue à 2 voies		
Rue à 4 voies		
Croisement à 2 voies		
Croisement à 4 voies		
Intersection à 2 voies		
Intersection à 4 voies		

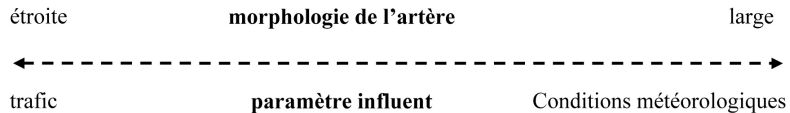
Que ce soit pour les rues, les croisements ou intersections, le remplissage des dents creuses de la morphologie urbaine est néfaste à la dispersion de polluants. Concernant les rues, la meilleure configuration correspond à une rue dont les bâtiments sont espacés et éloignés de l'axe de la rue d'au moins dix mètres et pour laquelle l'indice de construction de Landsberg est faible.

Conclusion

L'étude menée dans cet article apporte des informations très utiles en matière d'aménagement et constitue un véritable outil d'aide à la décision. En effet, l'étude théorique a permis de déceler les paramètres les plus

importants (figure 3) en matière de diffusion de polluants en fonction du gabarit de l'artère (paramètre de trafic pour les rues étroites, paramètres météorologiques pour les rues larges).

Figure 3 : Paramètres influents en fonction de la morphologie urbaine



Autrement dit, il faut être prudent lorsque l'on bouche les dents creuses de la morphologie urbaine, particulièrement si la rue est étroite car l'on crée alors de nouvelles zones propices à l'accumulation de polluants. Plus la rue est large, plus les conditions météorologiques jouent un rôle régulateur.

De plus, l'analyse morphologique effectuée sur quatre-vingt-dix-huit configurations a permis de produire des configurations optimales permettant de minimiser l'impact des émissions de polluants automobiles, toutes choses égales par ailleurs. Rappelons qu'une configuration optimale n'est pas une configuration sans pollution mais une configuration pour laquelle l'impact de cette nuisance environnementale est moindre. Les différents éléments mis en relation dans cet article apportent des informations en matière d'impact de la forme urbaine sur la répartition spatiale des polluants et permettent à l'aménageur de concevoir des villes minimisant les immissions de polluants sur ses axes, participant ainsi à un processus de durabilité urbaine.

Bibliographie

BOURDEAU B., 1997, *L'évolution du parc automobile français entre 1970 et 2010*, Thèse en Ingénierie de l'environnement, Université de Savoie, 12 décembre 1997, 513 p.

CHÉMERY L., DUCHENE-MARULLAZ P., 1987, *Atlas climatique de la construction*, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Paris, coll. Qualité construction, 182 p.