

## Transports urbains et pollution de l'air à Beyrouth-Municipe (Liban) : Application du modèle STREET

Carine CHÉLALA (1), MAIGNANT G. (2), ZAAROUR R. (1),  
SALIBA N. (1), ABBOUD M.(4), FARAH W.(5). ADJIZIAN-GERARD J.(1,3)

1- Département de Géographie, F.L.S.H., Université Saint-Joseph, Beyrouth (Liban)

2- UMR Espace, 6012 CNRS, Université de Nice Sophia – Antipolis (France)

3- EDYTEM, UMR 5204 CNRS, Université de Savoie (France)

4- Département de Chimie, Faculté des Sciences, Université Saint-Joseph, Beyrouth (Liban)

5- Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Saint-Joseph, Beyrouth (Liban)

### Résumé

Un réseau de surveillance de la qualité de l'air, installé depuis 2004 dans Beyrouth-Municipe a montré de forts taux de pollution de fond en NO<sub>2</sub>. Le transport routier est fortement incriminé dans la dégradation de la qualité de l'air de la capitale libanaise. Pourtant, celui-ci n'est pas le seul facteur mis en cause. La pollution sur une artère dépend non seulement du trafic, mais aussi des conditions météorologiques et de la morphologie urbaine.

Grâce au modèle STREET (v.5.0), qui intègre de nombreux paramètres (comme les configurations spatiales d'artères modélisées, les flux routiers, les conditions météorologiques,...), il a été possible d'étudier l'impact du trafic routier et de la morphologie urbaine sur les concentrations de polluants au sein des rues.

Après avoir présenté la méthodologie de collecte des données nécessaires pour la modélisation sous STREET, celles-ci étant inexistantes, nous exposerons les premiers résultats de la modélisation dans Beyrouth-Municipe et l'importance du paramètre de la typologie des rues dans l'augmentation des polluants au sein de ce milieu.

Mots-clés : Beyrouth, indice de Landsberg, Liban, modèle STREET, pollution en NO<sub>2</sub>, transports routiers.

### Introduction

Le réseau de surveillance de la qualité de l'air mesurant les taux de NO<sub>2</sub> en pollution de fond dans Beyrouth-Municipe, a montré, en 2005, que cette ville est soumise, quasiment en continu, à de fortes concentrations de ce polluant. Bien que les transports routiers s'avèrent être la principale source de NO<sub>2</sub>, il ne faut pas négliger le rôle des autres facteurs comme le climat urbain, la topographie de la ville, sa forme et la morphologie des rues.

L'objectif principal de cette étude est d'estimer la pollution de proximité annuelle des axes routiers de Beyrouth-Municipe, à partir de données de pollution de fond, en tenant plus particulièrement compte de la morphologie urbaine c'est-à-dire de la forme des rues, de leurs orientations, des espacements entre les bâtiments. Pour ce faire, nous avons eu recours à une approche par modélisation grâce au modèle de rue STREET (v. 5.0).

## **Choix du modèle STREET**

STREET est un modèle de calcul des émissions à l'échelle de la rue et d'évaluation des immissions sur une base annuelle. Méthode simple et efficace pour estimer la pollution atmosphérique issue de la circulation routière, il sert à évaluer la charge polluante des axes routiers à partir d'une donnée en pollution de fond des zones environnantes<sup>1</sup>.

Cette modélisation requiert une connaissance fine des axes routiers, de leur configuration, de l'agencement des bâtiments, de l'orientation des rues, de la météorologie locale, des conditions de circulation (les flux routiers et leur composition moyenne, la vitesse moyenne des véhicules, etc.).

Ainsi, pour obtenir des résultats fiables, il est indispensable de disposer des données suivantes pour chaque rue étudiée :

- Configuration des voies selon la typologie proposée par STREET (qui propose 98 cas de figure) (exemple : rue bilatéralement bâtie, à 4 voies ou plus, bâtiments mitoyens, H/L=1/2).
- Paramètres géographiques : orientation, pente, largeur de la rue.
- Classification des zones environnantes selon la charge polluante de fond.
- Conditions météorologiques locales : vitesse et direction du vent en moyenne annuelle, pourcentage annuel du nombre de jours de pluie.
- Données spécifiques de circulation automobile et des flux de véhicules, des parts des poids-lourds/véhicules personnels, des taux d'encombrement.

## **Constitution d'une base de données**

Pour cette recherche, le problème de l'acquisition de l'information nécessaire s'est révélé difficile à surmonter, car il n'existe pas de base de données urbaine pour la ville de Beyrouth. En effet, celles-ci sont, soit inaccessibles (car elles appartiennent à des organismes étatiques), soit trop anciennes ou incomplètes. Par conséquent, une méthodologie de travail a été établie spécifiquement, afin de remettre à jour des données anciennes ou de créer de nouvelles informations.

La collecte des nouvelles données a consisté en :

- des manipulations SIG : création des données à partir de documents cartographiques. Le Modèle Numérique d'Altitude (MNA) a été obtenu à partir de la digitalisation des courbes de niveau et des points cotés d'une carte de Beyrouth-Municipe au 1/10.000<sup>e</sup>, datant de 1941. Calcul de la hauteur réelle du bâti à l'aide du MNA et de la hauteur à partir du niveau zéro calculé par la Direction des Affaires Géographiques libanaise. Extraction et caractérisation du réseau routier ...
- des campagnes de mesure et de terrain : comptages des flux routiers, statistiques concernant la composition des flux routiers, relevés pour combler le manque de données concernant la hauteur du bâti...
- des dépouillements de campagnes de comptage de flux automobiles datant de 1999 et 2005.

## **Caractéristiques urbaines de Beyrouth-Municipe**

Afin de caractériser la typologie des axes routiers, nous avons eu besoin de collecter des données concernant les caractéristiques urbaines de Beyrouth (bâti, réseau routier, météorologie...).

### ***Les données collectées :***

Le bâti : le bâti a été digitalisé à partir des plans au 1/5000<sup>e</sup> de Beyrouth-Municipe. La hauteur du bâti à partir du niveau de la mer a été obtenue grâce à des cartes élaborées par l'armée libanaise (seule habilitée à produire ce type de document cartographique). Grâce au MNA de la ville, il a été possible de calculer un MNE (Modèle Numérique d'Élévation). La hauteur des bâtiments à partir du niveau du sol est obtenue par la soustraction du MNE à partir du MNA.

---

<sup>1</sup> Manuel STREET(version 5.0), 2003.

Le réseau routier : il a été extrait à partir de la digitalisation des îlots. Nous avons pu calculer, par conséquent, la largeur moyenne, l'orientation et la pente de chaque tronçon.

Typologie des rues étudiées : nous avons élaboré deux classifications des tronçons modélisés. La première classification, établie à partir de l'indice de construction de Landsberg, concerne les rues bilatéralement bâties. L'indice de Landsberg se définit comme le rapport  $H / L$ , où  $H$  désigne la hauteur moyenne du bâti de chaque côté de la rue, et  $L$  la largeur de la rue. Cet indicateur permet de montrer l'écartement entre deux bâtiments situés de part et d'autre de l'artère. Si le rapport se révèle inférieur à 1, la rue est considérée comme large, si le rapport est supérieur à 1, la rue est étroite, et dite « rue canyon ». Cet indice, sans dimension, représente donc une valeur absolue, exploitable pour tout type de morphologie (MAIGNANT, 2005b).

La deuxième classification concerne les rues qui ne sont pas bilatéralement bâties, telles que les rues non bâties, les rues unilatéralement bâties ou bien les rues bilatéralement bâties, mais ne constituant pas de « rues canyons ».

Trafics routiers : la charge polluante d'une route dépend bien évidemment des flux routiers. Pour cette étude, il fallait disposer du Trafic Journalier Moyen (TJM) pour chaque axe étudié.

Le Conseil de Développement et de Reconstruction (CDR)<sup>2</sup> a effectué deux campagnes de comptage : en 1999, sur un grand nombre d'axes routiers de la ville et, en 2005, sur un nombre limité de voies. Pour disposer de séries complètes, nous avons calculé une équation de passage actualisant les données de 1999 à partir des données de 2005.

Nous avons également effectué des campagnes de comptages manuels sur certains axes importants, pour lesquelles nous ne disposons d'aucune donnée concernant les flux routiers et leur composition.

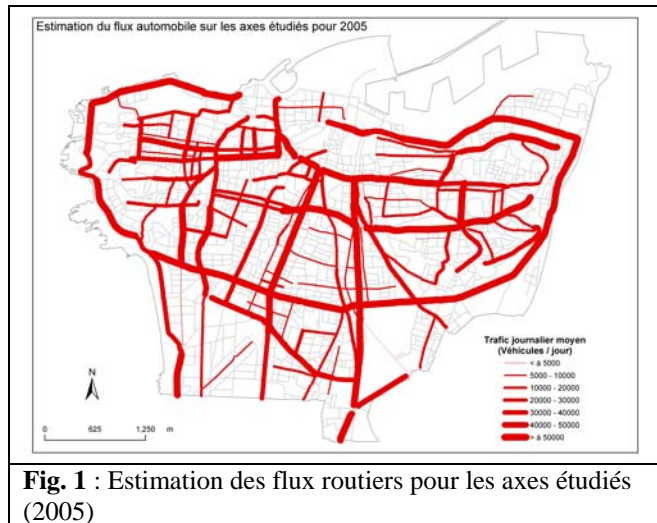
Paramètres météorologiques : les conditions météorologiques sont un facteur important qui affecte la dispersion des polluants. Or, il n'existe pas de données fines de vent pour la ville de Beyrouth, celle-ci n'étant pas équipée d'un réseau de mesures météorologiques. L'unique source de données est celle du Service Météorologique National de l'Aéroport de Beyrouth, situé à 8 km au Sud de la ville de Beyrouth. Les seules données du vent utilisées dans cette étude datent de 2004.

#### ***Les résultats obtenus :***

Les résultats obtenus à travers les analyses de la base de données produites montrent que les entrées de la ville constituent des axes routiers à TJM très élevés, dépassant les 50.000 véhicules/jour. Mais plusieurs autres axes intérieurs montrent des TJM dépassant plusieurs milliers de véhicules/jour (Fig. 1).

---

<sup>2</sup> Le CDR est un organisme étatique qui a été créé pour la reconstruction du Liban. Il a notamment en charge l'entretien du réseau routier principal et la réalisation de nouveaux projets routiers.



En moyenne, sur toutes les voies concernées, la voiture particulière représente le moyen de transport le plus utilisé (soit 59 % des véhicules). Le reste du parc automobile est constitué par des véhicules utilitaires légers (14 %), des transports en commun (13 %), des deux-roues (10 %) et des poids lourds (4 %).

La sur-utilisation de la voiture particulière est due, en particulier, à l'absence de transports en commun efficaces à Beyrouth.

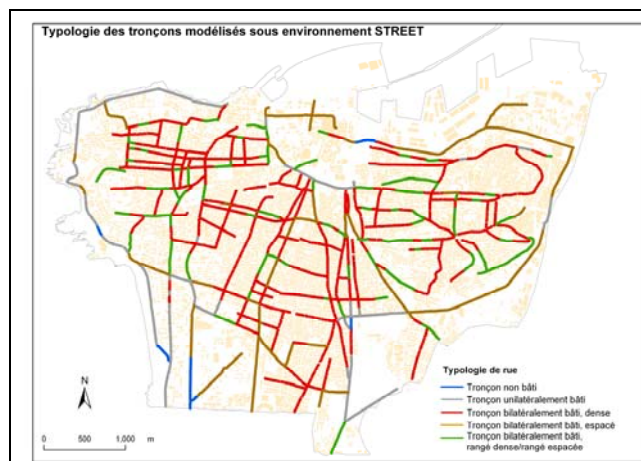
Le tissu bâti de Beyrouth-Municipe est dense et constitué de bâtiments très élevés, avec 20 % des immeubles qui ont plus de 10 étages ( $H > 35$  m).

Aussi, les routes de la capitale sont étroites, avec 75 % des axes routiers étudiés ayant une largeur inférieure à 10 m. L'orientation des routes joue un rôle important dans la dispersion des polluants à Beyrouth-Municipe, puisque 24 % des tronçons ont une direction Est et 14 % Sud-Est. Cette orientation ne correspond pas à la direction des vents dominants de Beyrouth (Sud-Ouest). Par conséquent, les polluants doivent être moins dispersés sur ces axes.

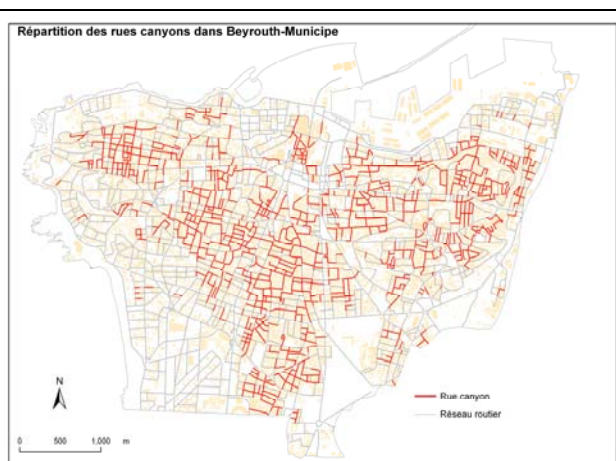
Par ailleurs, plus de 16 % des routes ont une pente moyenne supérieure à 5 %. Or, plus la pente est forte, plus les facteurs d'émission des véhicules sont élevés.

En ce qui concerne l'aspect morphologique des rues, on constate qu'à Beyrouth-Municipe, plus de 60 % des routes sont bilatéralement bâties, alors que 10 % sont, soit non bâties, soit unilatéralement bâties. Presque 30 % sont bilatéralement bâties avec des immeubles espacés (Fig. 2). Aussi, plus de 38 % des sections de rues bâties constituent des « rues canyons » (Fig. 3).

Notons que les rues bilatéralement bâties denses se révèlent les plus aptes à la stagnation des polluants. En effet, les résultats des tests de sensibilité effectués au cours de cette étude montrent qu'à mêmes conditions (en maintenant tous les paramètres constants), mais en variant les flux routiers, les rues bilatéralement bâties entraînent approximativement 4,7 % d'augmentation des concentrations de  $\text{NO}_2$  par rapport aux autres typologies de rues.



**Fig. 2 :** Typologie des rues modélisées sous STREET



**Fig. 3 :** La répartition des rues canyons dans Beyrouth-Municipe

### Validation de la modélisation sous STREET

Le modèle STREET a été déjà validé par plusieurs organismes de surveillance de la qualité de l'air en France, notamment par AIRPARIF (2005) et l'ASPA (2003).

Toutefois, ce modèle n'a jamais été appliqué dans une ville de la Méditerranée orientale. Aussi, nous avons testé les résultats de la modélisation pour la ville de Beyrouth, par la validation des calculs faits à partir des données des deux seuls sites de mesure de la pollution de proximité suivants : le site «Municipalité de Beyrouth» et le site « place Sassine » (Fig. 4).

Taux du NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Valeur expérimentale 2005	Résultat du calcul STREET 2005	% d'erreur	Valeur expérimentale 2006	Résultat du calcul STREET 2006	% d'erreur
Municipalité de Beyrouth	86	77	12	88	79	12
Place Sassine	83	86	4	90	83	8

**Fig. 4 :** Validation des résultats de la modélisation sous STREET pour deux stations de mesure.

Pour les données de 2005 et 2006, le pourcentage d'erreur obtenu varie entre 4 et 12 %. Celle-ci s'avère inférieure à l'erreur de mesure qui serait de l'ordre de 20 %. L'erreur de mesure est liée à l'utilisation d'échantillonneurs passifs et aux caractéristiques de leur implantation, ainsi qu'à celles de la position des tubes dans l'abri, à la hauteur du mât, à l'orientation des tubes, au type du support et à l'analyse en laboratoire (ADJIZIAN-GERARD J. *et al*, à paraître).

### Niveau annuel de NO<sub>2</sub> par rue modélisée sous STREET

Les résultats obtenus montrent que presque la totalité des routes étudiées de la ville (99 %) dépasse les 55 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub>, avec plus de 30 % des routes qui ont une concentration annuelle de plus de 75 µg/m<sup>3</sup> (Fig. 5a), ce qui est largement supérieur à la valeur limite moyenne annuelle européenne (50 µg/m<sup>3</sup> pour 2005) (Directive européenne, n°1999/30/CE du 22/04/1999).



**Fig. 5 :** (a) Concentration du NO<sub>2</sub> annuel et (b) Nombre de jour de dépassement du niveau de NO<sub>2</sub> par rue modélisée sous STREET pour Beyrouth-Municipe (2005)

Mais le trafic urbain ne doit pas être le seul à être incriminé. En effet, pour un même flux, deux axes de typologie différente présentent des taux de pollution différents. En moyenne, à Beyrouth, les routes bilatéralement bâties - bâtiments denses, présentent une charge polluante de 10 µg/m<sup>3</sup> plus élevée qu'une rue non bâtie ou bien unilatéralement bâtie. Les rues bilatéralement bâties - bâtiments non denses présentent une charge polluante moyenne de 8 µg/m<sup>3</sup>, supérieure aux rues non bâties ou unilatéralement bâties.

### Nombre de jours de dépassement de la valeur limite de NO<sub>2</sub>

STREET permet de calculer le nombre de jours de dépassement de la valeur limite pour la moyenne journalière de NO<sub>2</sub>. Les résultats pour Beyrouth-Municipe se révèlent très inquiétants. Tous les axes modélisés présentent plus de 30 jours de dépassement de la valeur limite journalière (200 µg/m<sup>3</sup>) par an et 15 % des axes connaissent un dépassement de la valeur limite durant toute l'année (Fig. 5b).

Cette cartographie du nombre de jours de dépassement de la valeur limite de NO<sub>2</sub>, basée sur STREET, constitue une première approche pour l'élaboration d'une carte de risque épidémiologique pour la population beyrouthine. En effet, si cette information était croisée avec la densité de population permanente ou temporaire, on pourrait évaluer le nombre de personnes soumises à des pics de pollution en NO<sub>2</sub> et pour quelle durée.

### Conclusion

La situation de la qualité de l'air s'avère alarmante à Beyrouth-Municipe. Bien que le trafic routier contribue à aggraver cette situation, il n'est le seul responsable des forts taux de pollution de l'air dans cette ville. La morphologie urbaine de la ville est un facteur ayant un poids important sur la stagnation des polluants. En effet, dans Beyrouth-Municipe, les routes bilatéralement bâties montrent en moyenne 10 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub> de plus que les routes non bâties.

Que ce soit pour les rues, les croisements ou intersections, le remplissage des dents creuses du tissu urbain doit être néfaste à la dispersion de polluants. Aussi, il apparaît que la meilleure configuration pour la dispersion correspondrait à une rue dont les bâtiments soient espacés et éloignés de l'axe médian de la rue d'au moins dix mètres et pour laquelle l'indice de Landsberg soit faible.

Ainsi, cette étude a permis de mettre en évidence les paramètres les plus importants en matière de diffusion de polluants en fonction du gabarit de l'artère. Nous disposons donc d'informations très utiles en matière d'aménagement urbain, le modèle constituant alors un véritable outil d'aide à la décision. « Car, il faut être prudent lorsque l'on comble 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. » (MAIGNANT, 2005).

*Nous remercions M. Kunz (KTT-IMA), pour avoir mis à disposition de l'équipe le logiciel STREET, ainsi que M. Gérard, pour sa relecture soignée du texte.*

### **Références**

- ADJIZIAN-GERARD J., ABBOUD M., BADARO-SALIBA N., CHELALA C., FARAH W., RIZK T., AFIF C. (à paraître): Incertitudes liées aux mesures du NO<sub>2</sub> par échantillonneurs passifs dans Beyrouth-Municipale (Liban). Actes du Colloque international « Incertitudes et environnement : mesures, modèles et gestion », 23-25 novembre 2005, Arles, France, publications de la SEH.
- AIRPARIF (2005), Evaluation de la qualité de l'air en simulation de proximité des axes routiers en Ile-de-France, concentrations moyennes pour l'année 2004, Rapport AIRPARIF, décembre 2005, 63 pages.
- ASPA (2003), Evaluation du logiciel d'estimation de la pollution de proximité automobile STREET 4, rapport d'étude de l'ASPA, juin 2003, 23 pages.
- CHELALA C., ADJIZIAN-GERARD J., ABBOUD M., FARAH W., RIZK T., (2006), Transports routiers et pollution de l'air dans Beyrouth Municipale (Liban), in Actes du Colloque 2e conférence Environnement et Transport, incluant le 15e colloque Transports et pollution de l'air, juin 2006 (Reims, France), pp. 219-224.
- MAIGNANT G., 2007, « Dispersion de polluants et morphologie urbaine », L'Espace Géographique, n°2, 16 p.
- MAIGNANT G., 2005a, « Compacité et forme urbaine, une analyse environnementale dans la perspective d'un développement urbain durable », Actes du colloque « Développement urbain durable, gestion des ressources et gouvernance », Lausanne, 21-23 septembre, 17 p.
- MAIGNANT G., 2005b, « Incertitudes dans l'évaluation des immissions de polluants en milieu urbain, analyse de sensibilité à partir du logiciel STREET », Actes du Colloque international « Incertitudes et environnement : mesures, modèles et gestion », Arles, France, 23-25 novembre, publications de la SEH, 9 p à paraître.
- STREET 5.0 pour Windows 95/98/NT/2000/XP, KTT, Targeting, TUV Umwelt service, version 20/11/03.