

Prédiction spatiale et suivi temporel de la pollution atmosphérique

Cas d'étude : région parisienne, pollution par le NO₂*

J.P. Frangi, S. Jacquemoud, T. Minh, R. Fahrni, H. Lazar

Laboratoire Environnement et Développement
Université Paris 7 – Denis Diderot
C.P. 7071
2, place Jussieu
75251 Paris cedex 05

Introduction

La pollution de l'air est un fléau qui tend à s'accroître dans la plupart des grandes agglomérations des pays industrialisés. Les progrès de la connaissance aidant, il est clair que ce sujet particulièrement sensible suscite l'inquiétude fondée de l'opinion publique. La pollution a en effet un impact nocif sur la santé et le bien-être comme le montrent des études épidémiologiques récentes (ERPURS, 1994 ; de Kermikri, 1995). Ce terme vague regroupe en réalité plusieurs familles de polluants dont les sources et les effets sur l'environnement sont multiples. Les principales substances rejetées dans l'atmosphère sont des produits de combustion qui se répartissent en deux groupes : les gaz (90%) et les particules fines en suspension (10%). Les gaz essentiellement émis par les industries, les foyers domestiques ou les véhicules à moteur sont le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO, NO₂) et de carbone (CO, CO₂), et enfin l'ozone (O₃) qui résulte de processus photochimiques plus ou moins complexes. Les particules fines sont issues de combustion industrielle, des installations de chauffage et surtout des véhicules à moteur diesel. Nocivité de ces substances sur la santé publique, dégradation des monuments historiques par acidification des pluies, changements climatiques liés à l'accumulation de gaz à effet de serre, tous ces facteurs ont eu pour effet une prise de conscience des dangers liés à la pollution atmosphérique urbaine et le développement de travaux scientifiques visant à la caractériser. Ces travaux servent aussi de base à l'établissement de normes au niveau européen ou mondial (Payrissat et al., 1991).

De nombreuses grandes villes concernées par ces problèmes de pollution atmosphérique possèdent des réseaux de mesure plus ou moins denses. La plupart du temps, la pollution est caractérisée par des indices globaux calculés à partir des moyennes journalières de concentration pour chaque polluant. Bien qu'ils fournissent une vision globale de l'état de l'atmosphère, ces indices ne permettent pas de comprendre les mécanismes de formation et de propagation de ces gaz ; pour cela, il est nécessaire de connaître l'évolution spatio-temporelle des concentrations en polluants. En outre, la prévision dans le futur de la pollution impliquera le couplage de données de pollution avec d'autres informations spatiales telles que la topographie, la cartographie des champs de température, de pression ou de vent. Une étude récente menée sur quelques grandes villes européennes a montré qu'il était possible de mesurer et de cartographier la distribution du dioxyde d'azote (JRC, 1992 ; della Massa et al., 1994). Dans cette étude, un nombre important de capteurs était disponible. Malheureusement, la technique de mesure utilisant des tubes à diffusion est une méthode passive qui ne permet pas un suivi temporel de la pollution.

Notre travail a consisté à produire des images de synthèse illustrant des champs de pollution (isocontours de concentrations en différents polluants) sur fond géographique de la

papier soumis le 15 octobre 1995 et présenté les 15, 16, et 17 janvier 1996 aux journées scientifiques du CNRS consacrées aux "Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement".

région parisienne, à partir de données mesurées par les stations du réseau AIRPARIF. Une méthode d'interpolation prenant en compte la structure spatiale des variables étudiées, le krigeage, a été utilisée pour établir les cartes. En outre, les données étant fournies avec une fréquence horaire, il nous a été possible de suivre la pollution dans le temps. Les résultats présentent la situation du 12 juillet 1994 pour le dioxyde d'azote (NO₂).

Mesures de pollution et interpolation spatiale

Dès les années 60, la région parisienne s'est dotée d'un réseau de surveillance de la pollution géré par AIRPARIF. Actuellement, cette structure est composée de trois réseaux distincts : un réseau de mesure de la pollution de fond situé loin des sources de pollution (55 stations), un réseau de mesure de la pollution situé à proximité immédiate du trafic automobile (9 stations), et enfin un réseau de mesure de la pollution dans les zones très fréquentées par le public (7 stations). Ce dispositif comprenant au total 71 stations de mesure n'est cependant pas homogène dans la répartition spatiale des capteurs, le type de polluant mesuré, et la fréquence d'acquisition des mesures. Par exemple, certains capteurs ne mesurent pas l'ozone, d'autres mesurent tous les polluants mais seulement une partie de la journée... La distinction entre mesures de fond et mesures de proximité limite aussi le nombre de capteurs réellement disponibles pour l'établissement de cartes spatio-temporelles. Considérons les stations 4P75 (quai des Celestins, 4^e) et 6P75 (rue de Dantzig, 15^e) mesurant la pollution de proximité, et la station 4F75 (tour Saint Jacques, 4^e) mesurant la pollution de fond : la **Figure 1** montre que les courbes d'évolution de la concentration en NO₂ en fonction du temps présentent des variations similaires jusque vers 12 heures. Ensuite, la station 4P75 enregistre une forte production de dioxyde d'azote ignorée par les deux autres. Aux alentours de 21 heures, la station de fond 4F75 mesure à nouveau un pic d'émission important identique à celui de la station de proximité 4P75 située pourtant dans le même arrondissement et non mesuré par l'autre station de proximité 6P75. Cet exemple illustre bien les difficultés rencontrées pour caractériser un phénomène très variable dans le temps et l'espace. S'ajoutent à ces problèmes le manque d'information concernant l'emplacement des capteurs (représentativité de la mesure) et les erreurs inhérentes à cette mesure. Bien que le nombre de capteurs opérationnels soit faible pour passer du ponctuel au spatial avec une bonne précision, il nous a paru intéressant de mettre en oeuvre une méthode d'interpolation spatiale sur les données existantes.

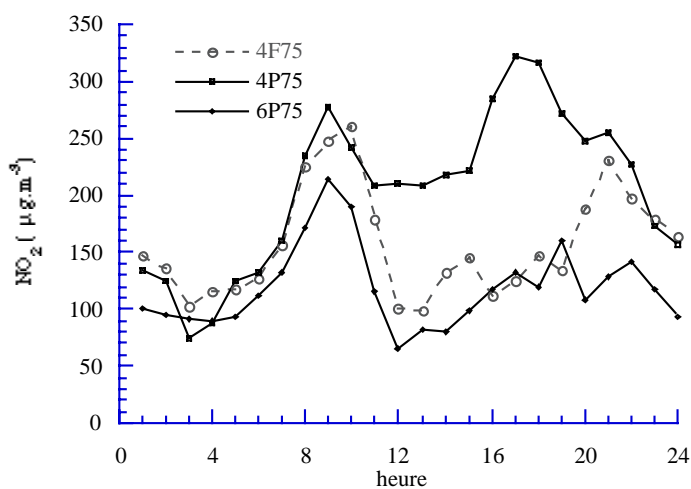


Figure 1 : Evolution temporelle de la teneur en NO₂ mesurée par deux stations de proximité (4P75 et 6P75) et une station de fond (4F75).

Parmi les méthodes d'interpolation spatiale classiquement utilisées (inverse des distances, minimum de courbure, triangulation, etc.), le krigeage a été retenu compte tenu des caractéristiques géométriques du problème (Cressie, 1991 ; Isaaks et Srivastava, 1989). Cette

méthode d'estimation basée sur la théorie des variables régionalisées a été proposée par Matheron (1962) pour qualifier un phénomène se déployant dans l'espace et y manifestant une certaine structure. La précision des estimations dépend de plusieurs facteurs dont le nombre et la qualité des mesures disponibles, la position des mesures dans la zone étudiée, la distance entre les points de mesure, et enfin la continuité spatiale des variables interpolées. Ces facteurs seront discutés plus tard. Nous avons donc appliqué la méthode du krigeage sur les concentrations en dioxyde d'azote mesurées le 12 juillet 1994 par 26 stations de fond et de proximité. Pour les raisons citées précédemment, les stations exploitables sont peu nombreuses mais bien réparties spatialement. La concentration en NO₂ a donc été estimée aux noeuds d'intersection d'une grille régulière constituée de 73 × 139 lignes et couvrant la région parisienne. Le couplage de ces données avec un modèle numérique de terrain établi à partir d'une carte IGN au 1/25000 permet aussi de restituer le relief en liaison avec les données de pollution.

Résultats

Les cartes d'isoconcentration en NO₂ établies heure par heure au cours de la journée du 12 juillet 1994 ont d'abord fait l'objet d'une analyse visuelle. En attendant la mise au point d'un système expert permettant une interprétation automatique, elles en disent long sur le lien entre circulation automobile et pollution : de 2 à 4 heures, le dioxyde d'azote est presque absent avec des concentrations très faibles ; de 5 à 6 heures, le NO₂ apparaît au sud de Paris autour des portes d'Italie et de Choisy, au nord autour de la porte de la Chapelle, respectivement à la bouche des autoroutes A6 et A1 ; de 7 à 10 heures, le NO₂ diffuse sur l'ensemble de la capitale avec des pics de concentration pouvant dépasser 300 µg m⁻³ le long du périphérique et sur les grands axes de circulation automobile. Le taux de pollution diminue alors fortement jusqu'à 17 heures où on enregistre à nouveau de fortes teneurs en NO₂ liées aux premiers retours vers la banlieue (**Figure 2a**). Cette activité décroît alors régulièrement après 21 heures malgré la persistance de quelques foyers diffus dans le centre et l'ouest de Paris. Les mêmes cartes établies avec les stations de fond uniquement sont très différentes. De façon générale, les points noirs correspondant à des pics d'émission du NO₂ sont gommés comme le montre la **Figure 2b**.

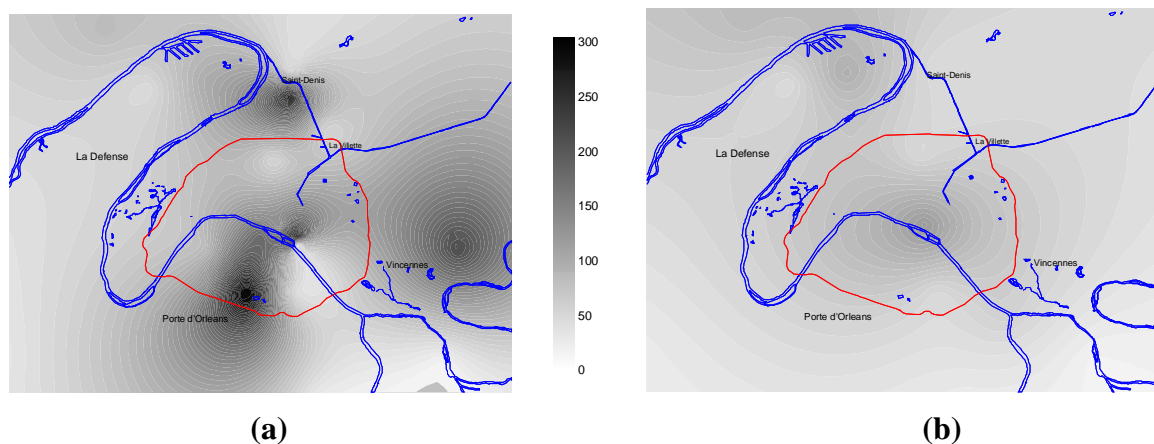


Figure 2 : Distribution spatiale de la concentration en NO₂ calculée en utilisant (a) toutes les stations, (b) les stations de fond seulement. Ces cartes ont été établies le 12 juillet 1994 à 17 heures.

Il est clair que ces cartes sont difficilement interprétables car elles ne tiennent pas compte des sources d'émission intense de la pollution. En résumé, le suivi spatio-temporel de la concentration en dioxyde d'azote sur Paris, bien que très descriptif, est riche d'enseignements : il montre d'abord un scénario conforme à la réalité ; il montre en outre que

la méthode employée permet d'appréhender la pollution en temps réel dans des endroits non encore équipés de station de mesure.

Une véritable validation de la méthode passe cependant par des tests quantitatifs. Nous avons créé une série de grilles d'interpolation pour lesquelles, à chaque fois, une station différente est ôtée de l'ensemble. Nous avons ensuite estimé la concentration en NO₂ en chacun de ces points, et l'avons comparée avec la valeur effectivement mesurée par le capteur de pollution. Le faible écart moyen calculé entre ces deux valeurs montre que la méthode du krigeage permet de retrouver la concentration de n'importe quelle station avec une précision raisonnable dans la plupart des cas (**Figure 3**). On remarquera cependant une dispersion plus importante pour les fortes concentrations à priori essentiellement enregistrées par les stations de proximité. En supposant que la mesure du NO₂ est fiable, cela confirme que ces capteurs de pollution situés à des endroits très localisés mesurent des variations importantes de concentration.

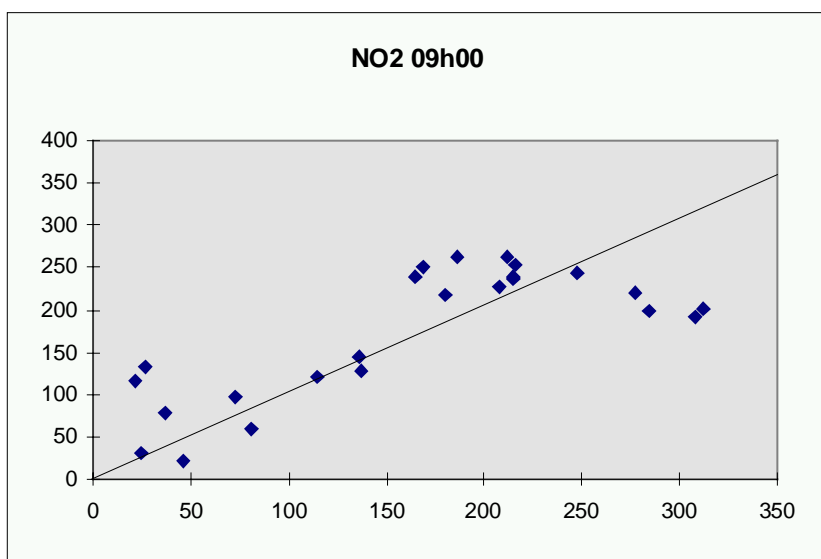


Figure 3 : Comparaison entre les valeurs mesurées de concentration en NO₂ (abscisse) et les valeurs estimées par interpolation spatiale (ordonnée) le 12 juillet 1994 à 9 heures.

Discussion – Conclusion

Bien que préliminaire, cette étude a montré la pertinence de l'utilisation de la prédiction spatiale pour appréhender la pollution atmosphérique dans des endroits faiblement ou non équipés de stations de mesure. Compte tenu du nombre et de la qualité des données dont nous disposons, les résultats obtenus nous semblent prometteurs. La représentation spatiale de la pollution sera d'autant plus performante que la densité et la qualité du réseau de mesure seront accrues : cela signifie des capteurs opérationnels vingt-quatre heures sur vingt-quatre, des capteurs judicieusement positionnés, des séries temporelles complètes, etc. En tant que méthode d'analyse prenant en compte la structure spatiale des phénomènes, le krigeage permettra aussi de dresser dans le futur des cartes de la distribution spatiale des erreurs d'estimation. Ces cartes sont d'ores et déjà un outil de travail pratique pour comprendre l'évolution et la répartition des zones polluées. Après test de la méthode sur un grand nombre de données, les images produites serviront à renforcer le réseau de mesures existant si nécessaire, à déterminer l'emplacement optimal d'une station supplémentaire, ou même à modifier la localisation de certaines stations actuellement redondantes. Pour valider la méthode, il serait utile d'effectuer des mesures de pollution sur des parcours entre stations ; le manque de portabilité des capteurs actuels rend l'expérience difficile mais on peut imaginer utiliser, dans un futur proche, des capteurs électrochimiques certes moins précis mais mobiles.

Il est évident que d'autres paramètres devront être pris en compte pour une meilleure compréhension de l'évolution de la pollution et, à plus long terme, une véritable prévision. Il sera nécessaire de croiser tout un ensemble d'informations (variables météorologiques, modèle numérique de terrain, connaissance des sources, etc.) qui actuellement ne sont pas toujours disponibles avec la même précision que les concentrations en polluants. Malgré quelques réserves, le type de visualisation proposé dans ce papier est avant tout un outil de travail pour mieux comprendre la pollution ; il présente en outre l'intérêt de sensibiliser la population dans la mesure où chacun de nous participe à la pollution et pourrait réfléchir à sa propre contribution pour la réduire.

Remerciements : nous remercions AIRPARIF pour la fourniture des données du 12 juillet 1994. T. Minh a bénéficié d'une bourse de recherche financée par l'AUPELF / UREF.

Références

Cressie, N.A.C. (1991), *Statistics for spatial data*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 900 pages.

de Kermikri, I. (1995), L'air des villes rend bien malade, *La Recherche*, 26:884-888.

ERPURS (1994), Impact de la pollution atmosphérique urbaine sur la santé en Ile-de-France 1987-1992, *Evaluation*, novembre 1994, 4 pages.

Isaaks, E.H., Srivastava, R.M. (1989), *Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 561 pages.

JRC (1992), Improving urban air pollution monitoring, in *JRC Scientific Achievements*, Commission of the European Communities, Directorate-General of the Joint Research Centre, CD-NA-14782-EN-C, 43-47.

della Massa, J.P., Gerboles, M., Payrissat, M. (1994), *Etude de la distribution du dioxyde d'azote dans l'agglomération toulousaine par la méthode des échantillons passifs*, Commission Européenne, Luxembourg : Office des Publications Officielles Communautés Européennes, CL-NA-15567-FR-C, 76 pages.

Matheron, G. (1962), *Traité de géostatistique appliquée, Tome 1*, Mémoires du BRGM N° 24, Editions du BRGM.

Payrissat, M., Sandroni, S., Hecq, P. (1991), Le programme européen d'harmonisation sur : la révision de la méthode de référence pour la mesure des poussières, la conception des réseaux de surveillance, et orientations, *Pollution Atmosphérique*, Juillet-Septembre 1991, 404-417.