

Cartographie de la pollution de l'air : une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques. Application à la ville de Strasbourg

Anthony Ung, Thierry Ranchin, Lucien Wald, Christiane Weber, Jacky Hirsch, Gilles Perron, Joseph Kleinpeter

▶ **To cite this version:**

Anthony Ung, Thierry Ranchin, Lucien Wald, Christiane Weber, Jacky Hirsch, et al.. Cartographie de la pollution de l'air : une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques. Application à la ville de Strasbourg. 6ème Journées CASSINI 2002 du GDR CASSINI-SIGMA, Sep 2002, Brest, France. pp.315-336. hal-00465564

HAL Id: hal-00465564

https://minesparis-psl.hal.science/hal-00465564

Submitted on 19 Apr 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Cartographie de la pollution de l'air : une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques. Application à la ville de Strasbourg.

A. UNG[3], T. RANCHIN[3], L. WALD[3], C. WEBER[1], J. HIRSCH[1], G. PERRON[2] and J. KLEINPETER[2]

1 Laboratoire Image et Ville - Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
2. ASPA, Strasbourg, France.
3 Groupe Télédétection & Modélisation - Ecole des Mines de Paris, Sophia Antipolis, France

Résumé

La qualité de l'air dans les villes est devenue une préoccupation majeure en France, en Europe et dans le monde. Les villes concentrent la majorité des populations et des sources de pollution. Elles sont un objet d'étude privilégié pour l'évaluation des pollutions, de leur influence sur la santé et des solutions proposées pour la réduction des polluants. En France, toutes les villes de plus de 100 000 habitants doivent être équipées d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air. Les coûts d'installation, d'entretien et de gestion de ces réseaux sont importants et limitent le nombre de stations de mesures installées. A partir de ces quelques points de mesures, des cartes de concentration en polluants sont générées de manière routinière par des méthodes d'interpolation et d'extrapolation, comme les plaques minces ou les méthodes basées sur le krigeage. Les résultats dépendent grandement du nombre de mesures.

Basée sur une approche multi-sources, cet article présente une méthodologie pour la cartographie des concentrations de polluants. Cette méthodologie s'appuie sur la définition de pseudostations et de stations virtuelles de mesures à l'aide d'images satellitaires et d'une base de données géographiques. Les pseudostations sont des lieux de la ville présentant des caractéristiques spatiales, structurales, morphologiques et des signatures spectrales similaires aux emplacements des stations de mesures réelles. Les signatures spectrales similaires à celles des stations réelles sont recherchées dans une série d'images Landsat. Puis des indices morphologiques calculés à partir de la base de données géographiques BD TOPO® sont utilisés pour restreindre le nombre de pseudostations.

Ces pseudostations sont alors utilisées pour déterminer les stations virtuelles qui permettent d'affecter une concentration de polluants en ce point de la ville. La densification du nombre de points de mesures (réels et virtuels) permet de calculer une nouvelle cartographie des concentrations de polluants. Une illustration partielle de cette méthodologie est proposée pour la ville de Strasbourg. Une campagne de mesures utilisant des moyens de mesures mobiles en juin 2002 fournira les moyens de valider l'approche.

Introduction

L'étude de la qualité de l'air s'est largement diversifiée pour une meilleure connaissance du phénomène de pollution et de lutte contre la pollution atmosphérique (voir par exemple le programme PRIMEQUAL-PREDIT). La qualité de l'air est aujourd'hui un problème multidisciplinaire qui mobilise autant les spécialistes épidémiologiques, les spécialistes en modélisation des transports, en émission et transformation des polluants, les spécialistes en systèmes géographiques et en télédétection que les autorités locales et les industriels. L'application de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE, décembre 1996) a conduit à un développement de la surveillance de la qualité de l'air (MATE, 2001). La pollution atmosphérique est aujourd'hui sensiblement réduite par rapport aux situations qui prévalaient il y a quelques décennies (HCSP résumé, 2000). Cependant, du fait de la concentration des populations et des activités en ville, et à cause du flux croissant des échanges et de l'accroissement constant du parc et de la circulation automobile, elle constitue toujours un enjeu et une préoccupation particulièrement sensible (IPTS, 2000). En l'état actuel des connaissances, la question de santé public reste ouverte et des recherches sont nécessaires afin de renforcer les connaissances en matière d'exposition réelle de la population à la pollution atmosphérique. L'évaluation de cette exposition consiste à croiser les données de répartition géographique de la population et les données de pollution (AIRPARIF). Il est ainsi nécessaire d'améliorer nos connaissances théoriques des comportements spatialisés de déplacements mais aussi d'acquérir une estimation précise de la pollution atmosphérique dans l'espace et dans le temps. Plusieurs outils existent aujourd'hui qui permettent de dériver des informations sur la qualité de l'air autant dans l'espace que dans le temps. Ils rencontrent aujourd'hui des problèmes de validation et de limitation. La principale difficulté est l'insuffisance des stations de mesures. Les villes ne peuvent se permettre d'équiper tous les quartiers, les rues et les places d'un tel dispositif de surveillance de la qualité de l'air. Leur coût élevé limite le nombre de stations à une dizaine par ville. Or la variabilité de la distribution spatio-temporelle des concentrations des polluants est élevée et un suivi optimal requerrait des observations spatialement et temporellement denses.

Pour pallier à ce manque d'information, le présent article présente une méthodologie pour la cartographie des concentrations des polluants basée sur une approche multi-sources. Après une brève description des méthodes actuelles de cartographie de la pollution, nous présentons la zone d'étude et les données utilisées. Dans le paragraphe 3, nous présentons la démarche générale qui a été mise en œuvre. La méthodologie est découpée en trois étapes et s'appuie sur la définition de « carte d'identité », de « pseudostations » et de « stations virtuelles » à l'aide d'observation *in situ*, d'observations satellitaires et d'une base de données géographiques. La notion de carte d'identité d'un site est créée afin de faire une caractérisation aussi fine que possible de la ville. Les stations de mesures sont situées dans des lieux de la ville présentant des caractéristiques spatiales, structurales, morphologiques et des signatures spectrales qui leur sont propres. Des caractéristiques semblables sont recherchées dans la carte d'identité des sites de la ville à l'aide des données disponibles et définissent les pseudostations. Une loi d'estimation est ensuite nécessaire pour passer des pseudostations aux stations virtuelles avec une estimation de la concentration de polluants. Cette densification du nombre de points de mesures (réels et virtuels) permet de calculer une nouvelle cartographie des concentrations des polluants. Enfin le paragraphe 4 est une application à la ville de Strasbourg, illustrant partiellement chaque partie de la méthodologie. Cette méthodologie sera validée en juin 2002 par une campagne de mesures utilisant des moyens de mesures mobiles.

1 Les méthodes actuelles de cartographie de la pollution de l'air en milieu urbain

L'objectif de la cartographie de la qualité de l'air est d'accéder à une estimation des concentrations des polluants atmosphériques dans l'espace et dans le temps. Divers outils sont couramment utilisés par les agences de surveillance de la qualité de l'air (Maneux 2001). Il est par exemple possible de construire une carte de distribution spatiale et temporelle des polluants par modélisation de leur transport, de leur dépôt et/ou encore de leur transformation chimique dans l'atmosphère (Giambanis *et al.* 1998, Leuzzi *et al.* 1998, Sallès *et al.* 1996). Ces modèles se distinguent suivant les échelles spatiales et temporelles prises en compte mais aussi suivant les équations de transport utilisées. Une description plus détaillée de tous ces modèles peut être trouvée dans le rapport du European Topic Center on Air Quality, '*Ambient Air Quality*' (Moussiopoulos *et al*. 1996). A l'échelle locale, les simulations numériques tiennent compte de la morphologie locale mais la zone d'étude est limitée à celle d'une rue par les ressources de calcul nécessaires. A l'échelle urbaine, les modèles se distinguent suivant la résolution spatiale de travail, les paramètres d'entrées utilisés, l'initialisation du modèle, les conditions aux frontières, les techniques numériques utilisées. La qualité des résultats de chacun des modèles dépend de la qualité des paramètres d'entrées. Vingt et une institutions faisant appel à vingt-quatre modèles différents ont

récemment participé au « Podbi-Exercice », un exercice de modélisation de la pollution atmosphérique. Les résultats montrent qu'il n'existe aujourd'hui aucune procédure standard pour ce type d'exercice et que les résultats diffèrent d'un facteur 4 suivant les modèles et les paramètres d'entrées utilisés (Lohmeyer *et al.* 2002).
Les autres méthodes pour estimer la distribution spatiale des polluants font appel à l'interpolation et/ou extrapolation des données *in situ* de pollution. Ici aussi, les modèles et méthodes d'interpolation et d'extrapolation sont variés. Certains travaux préconisent le krigeage (Frangi *et al.* 1996, Carletti *et al.* 2000), d'autres recommandent la méthode des plaques minces (Ionescu *et al.* 1996). Le principal problème dans ces méthodes concerne le manque de données de mesures fournies par les réseaux d'observation de la qualité de l'air. Les résultats sont dépendants du nombre et de la répartition spatiale des mesures, ainsi que de la méthode d'interpolation.
Quelques recherches ont été menées récemment pour cartographier la pollution atmosphérique par télédétection. Les données satellitaires sont utilisées afin d'extraire les paramètres nécessaires aux différents modèles de transport des polluants : réseau routier, occupation du sol, rugosité, etc. Par ailleurs, quelques auteurs (Basly 2000, Brivio *et al.* 1995, Finzi et Lechi 1991, McLellan 1973, Poli *et al.* 1994, Sifakis 1992, Sifakis *et al.* 1992, Sifakis 1995, Sifakis *et al.* 1998, Wald et Baleynaud 1999), suggèrent l'existence d'une relation qui pourrait lier les mesures de qualité de l'air fournies par les stations de mesure et les observations satellitaires. Dans le domaine de l'infrarouge thermique, des corrélations fortes ont été trouvées entre le canal thermique TM6 du satellite Landsat et les mesures de concentration des particules noires en suspension. Dans le domaine du spectre visible et proche infrarouge, Carnahan *et al.* (1984) ont recherché des rapports de canaux Landsat permettant une discrimination grossière des différentes concentrations de particules en suspension. Richards (1986) propose une méthode d'isolation des effets optiques de la pollution basée sur le principe de contamination des valeurs minimales radiométriques trouvées sur une image. Les résultats de Sifakis (2000) montrent que les trois premiers canaux Landsat (bleu, vert, rouge) dans le spectre du visible sont les plus sensibles à des variations radiométriques liées à la présence de pollution. Ces travaux concourrent à démontrer les potentialités de l'imagerie satellitaire, notamment des images Landsat Thematic Mapper (TM), pour la cartographie de la pollution atmosphérique.
Cette discussion montre qu'il n'existe pas aujourd'hui de procédure standard permettant de connaître la distribution des concentrations en polluants avec une résolution spatiale et une couverture temporelle suffisante en milieu urbain. Néanmoins, les informations obtenues par chacune de ces méthodes sont complémentaires et nécessaires à l'observation et la compréhension du phénomène de pollution :

- les mesures effectuées par les stations de mesures permettent une surveillance en temps réel de la pollution,
- les modèles numériques prennent en compte les conditions météorologiques et permettent une analyse et prédiction de la pollution atmosphérique à grande échelle spatiale,
- à petite échelle, les simulations numériques nous renseignent sur l'influence du bâti sur l'écoulement de l'air et sur les phénomènes de stockage des polluants.
- enfin une cartographie de la pollution atmosphérique à l'aide d'images satellitaires permet de spatialiser les informations nécessaires à la compréhension du phénomène.

La stratégie de fusion de ces différentes sources d'information présentée dans cet article utilise ces différentes informations afin de mettre à profit leur synergie et d'obtenir une meilleure cartographie de la pollution.

2 La ville d'étude et les données utilisées

La zone d'étude est la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS). Répartie sur un territoire de 306 km^2 (distance maximale du nord au sud : 28 km et d'est en ouest : 16 km) elle est séparée de l'Allemagne par le Rhin. Elle représente 45 % de la population du Bas-Rhin alors qu'elle ne couvre que 6 % de sa superficie. La ville de Strasbourg est à une altitude de 150 mètres (au pied de la cathédrale) et se situe à 48,33° latitude nord et 7,38° longitude ouest. Une description complète de la ville de Strasbourg (tourisme, économie, transport, patrimoine, tradition) peut être trouvée sur le site Internet de la mairie de Strasbourg : http://www.mairie-strasbourg.fr . Les données utilisées pour la cartographie de la pollution dans la CUS sont des observations de la qualité de l'air sur la ville de Strasbourg, des observations satellitaires et une base de données géographiques BD TOPO® de l'IGN.

2.1 Les observations de la qualité de l'air sur la ville de Strasbourg

L'association agréée de surveillance de la qualité de l'air à Strasbourg est l'ASPA (Association pour la Surveillance et l'étude de la Pollution atmosphérique en Alsace). Elle est en charge de trente-deux stations de

mesures réparties sur toute l'Alsace dont quatorze sur la zone d'étude de la CUS. Une présentation complète de l'association est présente sur le site : http://www.atmo-alsace.net. Ces stations de mesures sont situées soit dans des cabines aménagées par l'ASPA (2 m*3 m*4 m), soit dans des locaux où une surveillance du matériel est possible (école, hôpital). Les polluants effectivement mesurés sont le dioxyde de soufre (SO_2), le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (SO_2), le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO_2), l'ozone (O_3), et les particules en suspension (PM). Les procédures d'évaluation de la qualité de l'air évoluent au cours du temps et font aujourd'hui l'objet d'harmonisation (ADEME, 2000). Les recommandations actuelles de mesure de polluants suggèrent de mesurer des particules plus fines. Ainsi les stations de mesures de particules, qui mesuraient les concentrations en PM_{13} (c'est à dire la concentration en particules de taille supérieure à 13 µm), mesurent désormais les PM_{10}, voire même les $PM_{2.5}$. Les données disponibles sont des concentrations de ces différents polluants par quart horaire. A partir de ces mesures, il est possible de suivre en continu l'évolution des concentrations de polluants dans les lieux où sont localisées les stations de mesures.

2.2 Les observations satellitaires

Les données de télédétection utilisées pour notre étude sont principalement des images Thematic Mapper (TM) du satellite Landsat 5. Huit prises de vue ont été acquises les 31 mars 1998, 15 août 1998, 10 septembre 1999, 8 juin 2000, 1 avril 2001, 22 juillet 2001 et 14 août 2001. Chaque prise de vue est constituée de sept canaux correspondants à sept bandes spectrales allant du domaine visible du spectre électromagnétique à celui de l'infrarouge thermique. La résolution spatiale des canaux est de 30 m à l'exception du canal thermique TM6 qui a une résolution spatiale de 120 m. Nous disposons également d'une image SPOT panchromatique qui offre une résolution spatiale de 10 m. Cette image a été soigneusement recalée avec la base de données géographiques présentée ci-dessous. Chaque image Landsat a ensuite été recalée par rapport à cette image. Toutefois, seuls les modèles de déformation géométrique ont été calculés ; les images n'ont pas été re-projetées dans ce référentiel SPOT.

2.3 La base de données géographiques BD TOPO® de l'IGN

Une caractéristique évidente de la ville réside dans l'architecture même des bâtiments : les bâtiments en centre ville possèdent une toiture, et les maisons présentes sont essentiellement des maisons à colombages et aux toits pentus. La ville de Strasbourg présente une configuration de bâti plus resserrée dans le centre ville (la petite France). Les études de simulations numériques montrent que l'architecture des bâtiments et leurs configurations influencent l'écoulement des vents et *a fortiori* la pollution locale. A titre d'exemple, la place de la Cathédrale est célèbre pour les courants d'air tourbillonnaires. Notre étude intègre une base de données géographiques BD TOPO® de l'IGN (Michel 2000, Veillet et Leconte 1995). Cette base, géoréférencée en Lambert I, contient une description de l'occupation du sol et de sa morphologie (réseaux routiers et ferrés, bâti, végétation, hydrographie, relief, limites administratives, etc.). De plus amples informations peuvent être trouvées sur le serveur éducatif dédié à l'information géographique : http://pse.ensg.ign.fr/

3 Une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques

Une fois émis par une source, l'évolution d'un polluant dans l'atmosphère dépend du vent, de la stabilité de l'atmosphère, du rayonnement solaire, et de la topographie et morphologie du milieu influençant l'écoulement de l'air. La nature et le niveau de pollution ne sont, par exemple, pas les mêmes dans un parc ou en ville. Il est nécessaire de prendre non seulement en considération les mesures de polluants mais aussi toutes les informations renseignant sur la surface terrestre et l'atmosphère. La surveillance de la qualité de l'air doit être couplée avec une description du milieu urbain et la perception de la morphologie urbaine (Basly *et al.* 1997, 1999, 2000). Une telle approche est déjà amorcée dans les travaux précédents couplant observations satellitaires et observations par les stations de mesures (Wald et Baleynaud 1999, Basly et Wald 2000, Basly 2000, Ung *et al.* 2001). Elle vise à augmenter et spatialiser le nombre de données utilisées pour la cartographie des polluants. Nous savons que la présence des polluants modifie la composition de l'atmosphère et par la même ses propriétés optiques (McLellan 1973, Wald et Baleynaud 1999). Basly (2000), en admettant que la présence de particules noires en suspension soit la principale cause de modification de la valeur numérique des pixels dans la bande thermique par diffusion et absorption, détermine une relation linéaire liant le contenu en particules à la mesure satellitaire. Appliquée à une image entière, cette relation a permis d'établir une première cartographie de la distribution spatiale des polluants pour la date étudiée. Les structures apparaissant dans l'image finale sont identiques à celles

de l'image source, et ne reflètent certainement pas la situation réelle d'un épisode de pollution. Le domaine de validité de cette loi est donc restreint. La difficulté est de cerner ce domaine de validité et d'isoler les sites pour lesquels les comptes numériques sont réellement corrélés aux mesures de pollution.

Nous proposons une approche multi-sources qui cherche à identifier les sites pour lesquels les variations de luminance sont essentiellement dues à la présence de polluants, en dehors des variations optiques de l'atmosphère à méso-échelle (environ 100 km). La méthodologie présentée ci-dessous s'articule autour des notions de «carte d'identité », de «pseudostation » et de «station virtuelle » qui seront définies ultérieurement. Elle est découpée en trois étapes : 1) caractérisation de la ville et construction des cartes d'identité, 2) localisation des pseudostations à l'aide des cartes d'identité, et 3) construction des stations virtuelles à l'aide des images satellitaires.

Etape 1: caractérisation de la ville et construction des cartes d'identité

Cette première étape a pour objectif de se doter de moyens pour la compréhension et l'évaluation de l'environnement urbain en tant que facteurs agissant sur la pollution atmosphérique. L'espace urbain est un milieu complexe constitué à proportions variables d'espaces construits, de voies de communication, de sols nus, d'espaces résidentiels, industriels, herbacés et boisés, etc. La pollution atmosphérique n'est évidemment pas la même dans chacun de ces espaces (Derbez 2001). Des études ont montré l'hétérogénéité de la pollution atmosphérique. La position des bâtiments et l'orientation des rues par rapport au vent influencent la dispersion des polluants (Lamoureux *et al.* 2000). Des concentrations en polluants très différentes peuvent être observées sur des rues voisines (Scaperdad et Colville 1999, Croxford et Penn 1998, Croxford *et al.* 1996). C'est pourquoi il est nécessaire de faire une caractérisation aussi fine que possible de la zone étudiée. Les informations nécessaires peuvent être obtenues par des méthodes d'analyse et traitement des données, d'images et de la morphologie urbaine. Ces informations peuvent être de sources diverses, quantitatives ou qualitatives et définissent la carte d'identité d'un élément de la ville. Cette dernière intègre des variables en relation avec :

- la position géographique du lieu considéré,
- le type d'occupation du sol,
- la proximité par rapport aux sources d'émissions, notamment le trafic automobile,
- la morphologie des bâtiments entourant la zone,
- les conditions climatiques et météorologiques du lieu considéré.

Chaque élément de la ville, ainsi que les stations de mesures, est identifié par une carte d'identité. Il est alors possible d'étudier les relations qui pourraient exister entre ces variables et la pollution aux niveaux des stations de mesures.

Etape 2: localisation des pseudostations à l'aide des cartes d'identité

L'implantation des stations de mesures est réalisée en fonction des objectifs de surveillance, de leur environnement immédiat, des densités de population et des sources d'émissions de polluants. En raison du coût d'une station de mesures, les associations en charge de la qualité de l'air ne disposent pas plus de trois stations de mesures en ville et par classe de stations. Cependant l'urbanisation croissante des villes et le gigantisme de la surface des grandes villes laissent présager l'existence de sites similaires aux stations de mesures. On se propose de densifier virtuellement le réseau en détectant des lieux de la ville où une station de mesures aurait pu être implantée, station similaire à l'une de celles déjà implantées. Il est fait l'hypothèse qu'il sera possible de modéliser la concentration des polluants en ces lieux à partir d'images satellitaires et des relations établies entre ces images et les stations de mesures.

La localisation de ces lieux doit prendre en compte les conditions d'implantations des stations, les objectifs de surveillance, l'environnement immédiat, les densités de population et les sources d'émissions de polluants. Nous définissons les pseudostations comme étant des lieux de la ville présentant des attributs similaires aux stations de mesures, la notion de similitude étant définie à l'aide des cartes d'identité. L'identification de ces pseudostations relève alors d'une classification multi-variée des données. A une station de mesures est alors associée une classe de pseudostations (fig. 1).

Etape 3: construction des stations virtuelles à l'aide d'images satellitaires

Nous appelons « stations virtuelles » le sous-ensemble des pseudostations sur lesquelles une estimation de la pollution est possible à l'aide des images satellitaires et des observations de concentrations de polluants. L'estimation de la pollution à partir des images satellitaires nécessite l'établissement d'une loi reliant les mesures satellitaires à la transmittance de l'atmosphère puis aux concentrations des polluants. En première approximation, la réflectance mesurée au niveau du satellite s'écrit :

$$\rho_{sat} = \rho_{atm} + \rho_{surf} * \tau_{atm} \quad \text{avec}$$

ρ_{atm} la réflectance de l'atmosphère
ρ_{suf} la réflectance de la surface terrestre.
τ_{atm} la transmittance de l'atmosphère

En principe, il est nécessaire de séparer la contribution de la surface du sol de la contribution de l'atmosphère et d'isoler la transmittance de l'atmosphère. En réalité, cette séparation est difficile à réaliser. Dans certains cas, les propriétés optiques de l'atmosphère peuvent être évaluées et leurs effets modélisés (Tanré *et al*. 1990, Roujean *et al.* 1992). On peut ainsi estimer puis éliminer les influences de l'atmosphère sur la réflectance réfléchie à méso- ou subméso-échelle (de 10 à 100 km). Le principe retenu dans notre approche, est que la différence de réflectance d'une pseudostation par rapport à la réflectance de la station de la même classe reflète, d'une manière ou d'une autre, une variation d'épaisseur optique et donc de concentration de polluants par rapport à cette station. Les difficultés dans cette étape consistent à éliminer les effets purement atmosphériques, généralement sans connaissance externe, puis à estimer un modèle convertissant des variations de réflectance en concentration. Le travail dans cette étape est peu avancé dans son expression générale. Il est vraisemblable que le principe ne pourra s'appliquer réellement qu'à un sous-ensemble des pseudostations, d'où cette notion de station virtuelle. Le faible nombre de mesures conduisant à l'utilisation de plusieurs images acquises à des instants différents, voire par des capteurs différents, en tant que mesure palliative, induit une difficulté supplémentaire. En effet, tous les termes de l'équation précédente dépendent du temps et de la longueur d'onde (et bien sûr, de l'espace).

4 Application à la ville de Strasbourg

Etape 1 : caractérisation de la ville et construction des cartes d'identité

La caractérisation de la ville et la construction des cartes d'identités sont effectuées à l'aide de trois sources de données : les stations de mesures, la base de données géographiques et les images satellitaires. L'exploitation combinée de ces données nécessite un référentiel géographique commun à toutes les données. Ce référentiel peut être soit un référentiel cartographique, soit directement une image de référence. Nous avons choisi pour notre étude la BD TOPO® de l'IGN. Un positionnement des stations sur la BD TOPO® est effectué en relatif sur le terrain. Selon l'appréciation de l'opérateur, l'erreur effectuée est approximativement de 5 mètres. Ce positionnement permet de croiser les données de pollution avec les données de la BD TOPO® et permet de dériver un ensemble d'informations renseignant sur la morphologique du site (Chaignaud 2001, Durrenberger 2001, Schnell 2000) :

- pourcentage de bâti dans un secteur de rayon défini (fig. 2a)
- distance par rapport au premier bâtiment dans une direction fixée (fig. 2b)
- secteur de visibilité dans une direction fixée (fig. 2c)
- surface ou volume de visibilité en 2 ou 3 dimensions avec un rayon défini (fig. 2d)
- indice de circularité de la surface : indice de Miller (fig. 2e)
- indice d'étalement de la surface : indice de Morton (fig. 2f)
- indice de compacité de la surface : indice de Gravélius (fig. 2g)

L'ensemble de ces informations est intégré dans la carte d'identité et constitue une première caractérisation des stations de mesures et de la ville.

Quelques résultats sont présentés (tab. 1) pour les stations de mesures de l'ASPA et permettent par exemple de tirer les conclusions suivantes sur les stations de mesures. Les stations STG Ampère, Rhin, et Reichstett étant situées sur le toit d'un bâtiment répertorié dans la base géographique, présentent des indices morphologiques en 2D nuls. La station STG Hoerdt est localisée à l'extérieur de la zone couverte par la base géographique, le calcul des indices n'est donc pas possible. Pour les sept autres stations, les aires de visibilité sont comprises entre 7000 et 22400 m^2 environ. Le maximum est atteint pour la station STG Ouest qui présente effectivement une

ouverture plus grande à l'écoulement d'air, en accord avec la réalité du terrain. Quant au minimum, il est atteint pour la station STG Nord. La station est effectivement située dans une configuration rectangulaire de bâti identique à STG Centre et Est, mais la proximité de l'ensemble des bâtiments à la station STG Nord explique ce minimum. La station STG Clémenceau présente la deuxième plus grande aire de visibilité. Sa localisation sur la place Clémenceau, donc à proximité des grands axes routiers, offre une configuration de bâti qui n'est plus rectangulaire mais ouverte vers les grands axes routiers.

Station	X en Lambert I	Y en Lambert I	Aire de visibilité (en m2)	Périmètre (m)	Indice Miller	Indice de Gravélius
STG Ouest	995 820	1 115 065	226761	2505	0.46	1.48
STG Ampère	1 001 825	1 110 152	0	0	0	0
STG Illkirch	996 595	1 106 311	11761	1518	0.07	3.93
STG Rhin	1 002 615	1 111 482	0	0	0	0
STG Centre	998 748	1 112 359	15620	1270	0.13	2.86
STG Nord	1 001 167	1 115 582	7853	1478	0.05	4.68
STG Hoerdt	1 000 388	1 125 313	non	non	non	non
STG Reichstett	998 600	1 119 394	0	0	0	0
STG Clemenceau	998 634	1 113 180	34513	2482	0.07	3.77
STG Centre 2	998 755	1 111 469	18213	1631	0.09	3.42
STG Est	1 000 365	1 111 063	10674	1506	0.06	4.10

Tab. 1: les résultats sur le positionnement et les indices morphologiques

Ajoutées à ces indices morphologiques, des données satellitaires viennent compléter les paramètres de la carte d'identité. Un prétraitement des images Landsat est effectué pour les rendre superposable avec la base de données géographiques et les données des stations de mesures. Un recalage géométrique de chacune des images Landsat est effectué avec le canal panchromatique (résolution 10 m) d'une image SPOT à l'aide d'un modèle polynomial d'ordre 1. Cette image SPOT est elle-même recalée avec la BD TOPO®. Les résultats concernant les erreurs montrent que le recalage présente une erreur quadratique de 0.6 pixels en colonne, de 0.6 pixels en ligne et de 1 pixel en circulaire. L'image de travail ayant une résolution spatiale de 30 m, l'erreur est alors de 30 m et sera prise en compte dans la suite de notre étude. Nous disposons d'une loi permettant d'associer à un pixel de l'image SPOT, tous les pixels des images Landsat au pixel près. Ce recalage des images Landsat avec la base de données géographiques permet de localiser précisément les pixels qui sont associés aux stations de mesures : les pixels « pères ».

La carte d'identité d'une station de mesures contient alors :

- la position de la station dans la BD TOPO® ;
- les données relatives aux polluants mesurés (concentration de polluants min, max, pic, …) ;
- le pourcentage de bâti dans un secteur de rayon défini ;
- la distance par rapport au premier bâtiment dans une direction fixée ;
- le secteur de visibilité dans une direction fixée ;
- la surface ou le volume de visibilité en 2 ou 3 dimensions avec un rayon défini ;
- l'indice de circularité de la surface de visibilité : indice de Miller ;
- l'indice d'étalement de la surface : indice de Morton ;
- l'indice de compacité de la surface : indice de Gravélius ;
- les contenus numériques dans les sept bandes spectrales pour toutes les dates de prise de vue Landsat,
- les indices dérivés des données satellitaires.

Notons que le calcul des indices morphologiques s'effectue à l'aide du logiciel ESRI / ArcView et que le temps d'exécution nécessaire ne nous a pas permis de disposer d'une carte complète de ces indices sur la CUS lors de cette application. De même, l'exploitation du cadastre d'émission et des statistiques d'observations de la pollution n'a pas pu être terminée à temps.

Il en résulte que, pour cette application, nous nous limitons uniquement aux données satellitaires provenant des huit prises de vue Landsat. Les données relatives à la morphologie de la ville et à la pollution n'étant pas prises en compte, la carte d'identité utilisée ici n'est pas complète et contient uniquement la signature spectrale des stations de mesures.

Par manque d'expérience, nous avons décidé d'exploiter toutes les images disponibles simultanément. D'autres essais ont été effectués, par exemple, seulement avec les dates d'une même saison, ou avec les images des différentes saisons pour une même année. Ces essais n'ont pas abouti à des résultats plus prometteurs et ne sont pas plus justifiés scientifiquement. Il demeure que l'influence du choix des dates et du nombre d'images restera à évaluer.

Etape 2 : localisation des pseudostations à l'aide des cartes d'identité

La localisation des pixels ayant une même signature spectrale est effectuée station de mesures par station de mesures sur l'ensemble des images. Une analyse en composante principale est effectuée sur toutes les bandes spectrales pour l'ensemble des images. Les données sont projetées sur les trois axes principaux, dont la somme des variances représente 99 % de la variance totale. La classification des pixels semblables aux pixels pères prend en compte la dynamique du signal projeté. Un pixel est classé comme étant semblable à un pixel père si ses trois composantes sont similaires à celles du pixel-père, prises une à une. Une erreur de 20 % de la dynamique de chacune des trois composantes est permise. Ainsi, pour une date de prise de vue donnée et à partir de onze stations de mesures (onze pixels pères), nous obtenons onze classes de pixels semblables dont la population varie suivant la classe. La position de ces pixels est ensuite projetée dans la géométrie de la base topographique. La figure 3 est l'union de tous les pixels localisés pour les huit dates.

Parmi ces pixels de signature spectrale identique à la station STG Centre 2, certains sont des pseudostations, d'autres sont des artéfacts dus à l'utilisation d'une carte d'identité non complète. En effet, la signature spectrale enregistrée au niveau du capteur est un mélange de toutes les signatures spectrales des objets présents (véhicule, arbre, …) dans la scène. Ces objets ont une signature spectrale variable dans le temps et indépendante les unes des autres. Afin d'éliminer les artéfacts et de déterminer les pixels qui sont réellement des pseudostations, une intersection multidate des pixels est effectuée en tenant compte de l'erreur due aux recalages des images. Les résultats de l'intersection sont des pixels présentant une signature spectrale stable dans le temps et identique aux pixels pères.

L'exemple pour la station STG Centre 2 est illustré dans les figures suivantes. La figure 4a) est une superposition sur la BD TOPO® de tous les pixels de signature spectrale identique à la station STG Centre 2. La station STG Centre 2 est située au centre de l'image (point rouge) et les différences de couleurs uniformes correspondent aux huit différentes dates. La figure 4b) est aussi une superposition des pixels mais à un autre lieu de la ville. Les intersections des pixels sont représentées dans les figures 4c) et 4d) et correspondent respectivement à une station de mesures et une pseudostation localisée et stable dans le temps.

Nous obtenons ainsi vingt-huit pseudostations, ce qui est peu par rapport aux nombres de pixels de signature spectrale identique aux pixels pères, mais largement supérieur aux onze stations de mesures. Cette proposition de pseudostations sera testée durant la campagne de juin 2002. Une visite de chacun de ces sites sera effectuée. L'environnement géographique sera comparé à celui de la station de mesures correspondante (pixel-père) afin de valider la similarité. Un traitement sera à nouveau effectué en prenant en compte les critères morphologiques ainsi que le cadastre d'émission et les statistiques de pollution. Les différences entre les deux propositions de carte de pseudostations seront analysées. Par ailleurs, des camions mobiles de mesures positionnés à ces sites mesureront de manière continue les concentrations des polluants en juin 2002. On pourra ainsi analyser de manière comparative les mesures des camions et des stations fixes et valider l'approche.

Etape 3 : construction des stations virtuelles à l'aide d'images satellitaires

Cette partie est une illustration de construction des stations virtuelles à l'aide d'images satellitaires appliquée à la ville de Strasbourg et pour une date donnée. Il ne s'agit pas d'une démonstration, qui ne pourra être effectuée qu'une fois l'approche des pseudostations validée. La figure 5 montre une carte de concentration en PM_{10} pour la date du 31 mars 1998. Elle est obtenue par interpolation à l'aide de la méthode des « plaques minces » (Duchon 1976, Le Méhauté 1986) des trois données de concentration en PM_{10} fournies par le réseau local de mesures (points noirs). La zone couverte par la carte est de 25,8*33,6 km^2 avec une résolution spatiale de 30*30 m^2. Pour une meilleure visualisation des sites pollués, le canal TM4 Landsat est incrusté en fond d'image, révélant la structure des rues, les autoroutes et le Rhin. A cause du faible nombre de points de mesures disponibles, la carte de pollution obtenue est uniforme et ne représente certainement pas la réalité de la situation de pollution pour la date étudiée.

La figure 6 est une carte de pollution pour la même date obtenue avec la notion de pseudostations. Trois cent une pseudostation sont localisées ici en utilisant uniquement les signatures spectrales des pixels pour la date étudiée. En supposant que la loi qui relie les comptes numériques TM6 aux concentrations de PM_{10} est linéaire, les stations virtuelles sont ensuite construites à partir des pseudostations en estimant les niveaux de concentrations en PM_{10}. Elles sont distribuées dans tout l'espace. En comparaison avec la figure 5, la carte obtenue par interpolation des données estimées offre une représentation plus réaliste de la distribution des polluants en ville. Cependant, ce réalisme n'est pas exactitude. Notre regard repère des structures liées à celles de la ville, mais il est prématuré de prétendre que la carte est exacte. En effectuant une opération similaire sur la

ville de Nantes, Basly (2000) a trouvé une erreur relative d'estimation de la concentration de l'ordre de 100 %. Cette erreur représente une amélioration très importante par rapport aux techniques actuellement employées mais reste extrêmement élevée.

L'analyse des images satellitaires acquises en juin 2002 permettra de confronter les comptes numériques observés sur les pseudostations aux mesures des stations et des camions. On pourra tout d'abord démontrer l'existence d'une relation puis tenter de modéliser cette relation de manière suffisamment simple pour envisager une exploitation routinière de la méthodologie.

5 Conclusions et perspectives

La stratégie mise en place pour une cartographie des champs de polluants est complexe et découle des travaux publiés antérieurement. Elle se compose de trois étapes dont les principes ont été exprimés mais dont les états d'avancement et de réalisation diffèrent. Pour le moment, aucune d'entre elles n'a été validée.

La première étape, intitulée 'caractérisation de la ville et construction des cartes d'identité' a permis effectivement d'intégrer les paramètres pertinents (indice de visibilité, hauteur du bâti …) pour la cartographie des polluants et ceci à travers la définition de carte d'identité d'un site de la ville. Cette carte d'identité est construite à l'aide de traitements multivariés de bases de données. Les comptes numériques associés aux pixels de l'image contenant une station de mesures sont extraits. Des indicateurs morphologiques sont construits pour compléter la carte d'identité. La carte d'identité contient ainsi des paramètres qui sont en relation avec la pollution, les propriétés spectrales ou la nature du sol et les propriétés morphologiques du site. D'autres bases de données, tel que le cadastre des émissions, seront intégrées afin d'adapter la méthodologie pour une meilleure caractérisation de la ville.

Nous avons défini les pseudostations comme étant des sites présentant des attributs semblables aux sites contenant les stations de mesures. La deuxième étape est une étape de classification des cartes d'identité en vue de localiser ces pseudostations en intégrant des contraintes de stabilité dans le temps. Une première classification de ces cartes d'identité est effectuée pour l'application sur la ville de Strasbourg à l'aide uniquement de données satellitaires. Elle a fourni vingt-huit pseudostations localisées sur la CUS. Des camions laboratoires seront envoyés sur place lors de la campagne de juin 2002 dans l'optique de mesurer les concentrations en polluants afin de mieux appréhender la réalité de ces stations. D'autres méthodes de classification moins contraignantes feront l'objet de nos prochaines études : elles pourraient fournir une plus grande densité de pseudostations. Les avantages et les inconvénients de différentes méthodes de classification seront discutés.

La troisième étape concerne les relations existants entre les données satellitaires utilisées et les concentrations en polluants. L'identification de ces relations permet de construire des stations virtuelles à partir des pseudostations. Une première estimation de la concentration en particules est présentée ici en appliquant la même méthode que Basly (2000). Cependant à travers divers calculs de corrélation et de modélisation des voiles de polluants dans l'atmosphère, de plus amples études sont nécessaires pour mettre en évidence et modéliser les relations entre les taux de polluants mesurés au sol et les mesures de luminances effectuées par les satellites.

En définitive, l'approche développée est un couplage synergique de toutes les sources d'information aboutissant à la création des stations virtuelles. L'intégration de ces points supplémentaires dans les méthodes existantes de surveillance de la pollution permettra une cartographie plus fine des champs de concentration des polluants.

Bibliographie

ADEME et EDM, 2000. Classification et critères d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air, recommandation du groupe de travail « caractérisation des sites », 70 pages.

Basly L., 2000. Télédétection pour la qualité de l'air en milieu urbain. Thèse de doctorat, sciences de technologies de l'information et de la communication, Université de Nice Sophia Antipolis, France. 182 p.

Basly L., Wald L., 2000. Remote sensing and air quality in urban area. In Proceedings of TeleGeo'2000, the 2nd international workshop on telegeoprocessing, Sophia Antipolis, France, May 10-12, 2000, pp. 213-219.

Basly L., Cauneau F., Ranchin T., Wald L., 2000. SAR imagery in urban area. In: Proceedings of the 19th Symposium of EARSeL : Remote Sensing in the 21st Century, Casanova J-L. ed., Valladolid, Spain, 31 May - 2 June 1999, pp. 563-568.

Basly L., Baleynaud J.M., Wald L.,1999. Satellite data for the air pollution mapping. In : Proceedings of the 18th EARSeL Symposium on Operational Remote Sensing for Sustainable Development, Enschede, Netherlands, 11-14 May 1998, pp. 133-139.

Basly L., Cauneau F., Ranchin T., Wald L.,1997. ERS SAR imagery for urban climate studies. In : European Space Agency ed., Proceedings of the 3rd ERS Symposium ESA-SP414 : Space at the service of our Environment, Florence, Italy, 17-21 March 1997, pp. 233-236 (1997).

Brivio P.A., Genovese G., Massari S., Mileo N., Saura G., Zilioli E., 1995. Atmospheric pollution and satellite remotely sensed surface temperature in metropolitan areas. In: Proceedings of EARSeL symposium : Advances in Remote Sensing : pollution monitoring and geographical information system, Paris, pp. 40-46.

Carletti R., Picci M., Romano D., 2000. Kriging and bilinear methods for estimating spatial pattern of atmospheric pollutants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 63, pp. 341-359.

Carnahan W.H., Mausel P.W., Zhou G.P., 1984. Evaluation of atmospheric particulate concentrations derived from analysis of ratio thematic mapper data. 10th Int. Symposium Machine Processing of Remotely Sensed data, pp. 235-243.

Chaignaud G., 2001. Qualité de l'air en milieu urbain: extraction d'indicateurs morphologiques. Stage de Maîtrise de Sciences et Techniques Valorisation des Ressources Naturelles, groupe T&M, Ecole des Mines de Paris, 29 p.

Croxford B., Penn A., 1998. Sitting consideration for urban pollution monitors. *Atmospheric Environment*, 32, 6, 1049-1057.

Croxford B., Penn A., Hillier B, 1996. Spatial distribution of urban pollution: civilizing urban traffic. *The Science of the Total Environment*, 189/190, 3-9.

Derbez Mickaël, Mosqueron L., Nedellec V., 2001. Quelles sont les expositions humaines à la pollution atmosphérique ? Rapport de Synthèse de PRIMEQUAL-PREDIT 1995-2000, La Documentation Francaise, Paris, 62 p.

Duchon J., 1976. Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la réflexion des plaques minces, RAIRO Analyse numérique, 10.

Durrenberger M., 2001. Indicateurs morphologiques et pollution de l'air dans la CUS. Mémoire de DEA Systèmes Spatiaux et Environnements de l'université Louis Pasteur. 89 p.

Etude AIRPARIF. L'exposition potentielle des franciliens à la pollution atmosphérique http://www.airparif.asso.fr/effets/population.htm

Finzi G., Lechi G.M., 1991. Landsat images of urban air pollution in stable meteorological conditions. *Il Nuovo Cimento*, 14C, pp. 433-443.

Frangi J.P., Jacquemoud S., Puybonnieux-Texier V., Lazard H., 1996. Suivi spatio-temporel de la concentration en NO_x en île de France. *C.R. Acad. Sci. Paris 323*, série II a, pp. 373-379.

Giambanis A., Anagnostopoulos J., Bergeles G., 1998. Numerical simulation of pollutant dispersion and photochemical kinetics over complex terrain. *Applied Mathematical Modelling* Vol. 22, 313-329.

HCSP (Haut Comité de la Santé Publique), 2000. Politiques publiques, pollution atmosphérique et santé: poursuivre la réduction des risques". http://www.sante.gouv.fr/htm/actu/pollution/sommaire.htm

Ionescu A., Mayer E., Colda I., 1996. Méthodes mathématiques pour estimer le champ de concentration d'une polluant gazeux à partir des valeurs mesurées aux points dispersés. *Pollution Atmosphérique*, janvier-mars 1966, pp. 78-89.

IPTS, 2000. Report n°47, qualité de l'air dans les villes européennes: la question des transports urbains, septembre 2000. http://www.jrc.es/pages/f-report.fr.html

Lamoureux D., Menozzi S., Rolina G., 2000. Etude de l'effet du vent sur la diffusion d'un polluant. Projet de mécanique des fluides numériques. Ecole des Mines de Paris.

Le Méhauté, A., 1986. Spline technique for differentiation in R^n, CAT Report, Center for Approximation Theory, Department of Mathematics of Texas A&M University, Texas USA, 114, 19 p.

Leuzzi G., Monti P., 1998. Particle trajectory simulation of dispersion around a building. *Atmospheric Environment* Vol. 32, No. 2, 203-214.

Lohmeyer A., Mueller W.J., Baechlin W., 2002. A comparison of street canyon concentration predictions by different modellers: final results now available from the Podbi-exercise. *Atmospheric Environment*, 36, pp. 157-158.

Maneux E., 2001. Quelles sont les techniques pour surveiller la qualité de l'air ? Document de synthèse de Primequal-Predit 1995-2000, La Documentation Française, Paris.

MATE, 2001.Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Dossier de presse: Le point sur les actions menées par le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement en matière de reconquête de la qualité de l'air. Fiche n°7: les associations agrées de surveillance de la qualité de l'air.

McLellan A., 1973. Remote sensing of atmospheric turbidity variations by satellite. *Journal of Spacecrafts and Rockets*, 10, 11, pp. 743-747.

Michel F., 2000. Le territoire vu du ciel. *Pierre d'angle*, 28, 01/12/2000, pp. 12- 19.

Moussiopoulos N., Berge E., Bohler T., de Leeuw F., Gronskei K.E., Mylona S., Tombrou M., 1996. Ambient air quality, pollutant dispersion and transport models. Report of the European Topic Centre on Air Quality. 94 p.

Poli U., Pignatoro F. Rocchi V. and Bracco L., 1994. Study of the heat island over the city of Rome from Landsat-TM satellite in relation with urban air pollution. In: R. Vaughan ed., Proceedings of 13th EARSeL Symposium, Remote sensing – From research to operational applications in the new Europe, Dundee, Scotland, UK, Springer Hungarica, pp. 413-422.

Programme PRIMEQUAL-PREDIT mobilisant près de 200 équipes de recherche appartenant à des disciplines scientifiques différentes. http://www.environnement.gouv.fr/actua/cominfos/dosdir/DIRPPR/air/pollu_recherche.htm

Richards J.A., 1986. *Remote sensing digital image analysis: an introduction*, Ed. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, 281 p.

Roujean J.L., Le Roy M.J., Deschamps P.Y., 1992. A bi-directional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. *J.Geophys.res.,* 97, 20455-20468

Sallès J., Janischewski J., Jaecker-Voirol A., Martin B., 1996. Mobile source emission inventory model: application to Paris area. *Atmospheric Environment*, 30, 12, 1965-1975.

Scaperdas A., Colvile R.N., 1999. Assessing the representativeness of monitoring data from an urban intersection site in central London. *Atmospheric Environment*, 33, 661-674.

Schnell L., 2000. Mise en place et evaluation d'une base de données sur l'emprise de la Communauté Urbaine de Strasbourg, rapport de stage, laboratoire Louis Pasteur, université Louis Pasteur, 77 p.

Sifakis I.S., 1992. Potentialités de l'imagerie à haute résolution spatiale pour le suivi de la repartition de pollutions atmosphériques dans la basse troposphère. Etude du cas d'Athènes. Thèse de doctorat, Chimie de la Pollution Atmosphérique & Physique de l'Environnement, université Paris 7 Denis Diderot, Paris. 292 p.

Sifakis N., Bildgen P., Gilg J.P., 1992. Utilisation du canal 6 (thermique) de Thematic Mapper pour la localisation de nuages de pollution atmosphérique. Application à la région d'Athènes (Grèce). *Pollution atmosphérique*, 34, pp. 96-107 (1992).

Sifakis N., 1995. La télédétection des voiles de pollution atmosphérique et de la dégradation de l'environnement dans la région d'Athènes. *Photo-Interprétation*, 4, pp. 220-225.

Sifakis N., Soulakellis N.A., Paronis D.K., 1998. Quantitative mapping of air pollution density using Earth Observations : a New Processing Method and Application to an Urban Area. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 17, pp. 3289-3300.

Tanré D., Deroo C., Duhaut P., Herman M., Morcette J.J., Perbos J., Deschamps P.Y.,1990. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, 11, pp. 659-668.

Ung A., Wald L., Ranchin T, Weber C., Hirsch J., Perron G., Kleinpeter J., 2001. Air pollution mapping over a city – virtual stations and morphological indicators. Proceedings of 10th Int. Symposium "Transport and Air Pollution", Colorado (CD-Rom), USA.

Veillet I., Leconte G., 1995. Evaluer la qualité de la BD Topo : l'approche de l'IGN, *Bulletin de la S.F.P.T.*, n.137 (1995-1), pp.119-123.

Wald L. and Baleynaud J.M., 1999. Observing air quality over the city of Nantes by means of Landsat thermal infrared data. International Journal of Remote Sensing, 20, 5, pp. 947-959.

Liste des illustrations

Fig. 1 : Localisation des pseudostations par classification des cartes d'identité.

Fig. 2 : Indicateurs et indices renseignant sur la morphologie du site

Fig. 3 : union de tous les pixels de signature spectrale identique à la station STG Centre 2 pour les huit dates de prise de vue Landsat 5

Fig. 4 : intersection multidate des pixels de signature spectrale identique à la station STG Centre 2

Fig. 5 : Extraits de cartes de concentration en PM_{10} dans la CUS obtenues par interpolation sans pseudostations

Fig. 6 : Extraits de cartes de concentration en PM_{10} dans la CUS obtenues par interpolation avec pseudostations

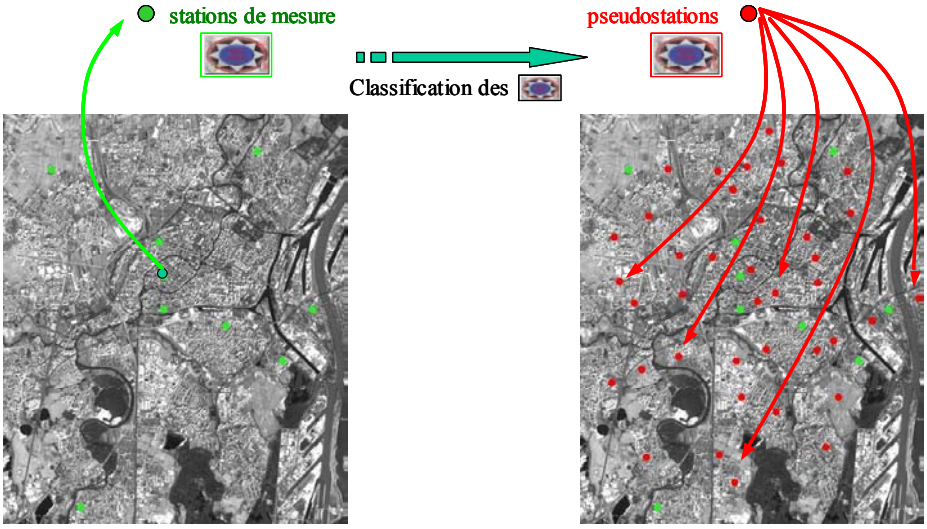


Fig. 1 : Localisation des pseudostations par classification des cartes d'identité.

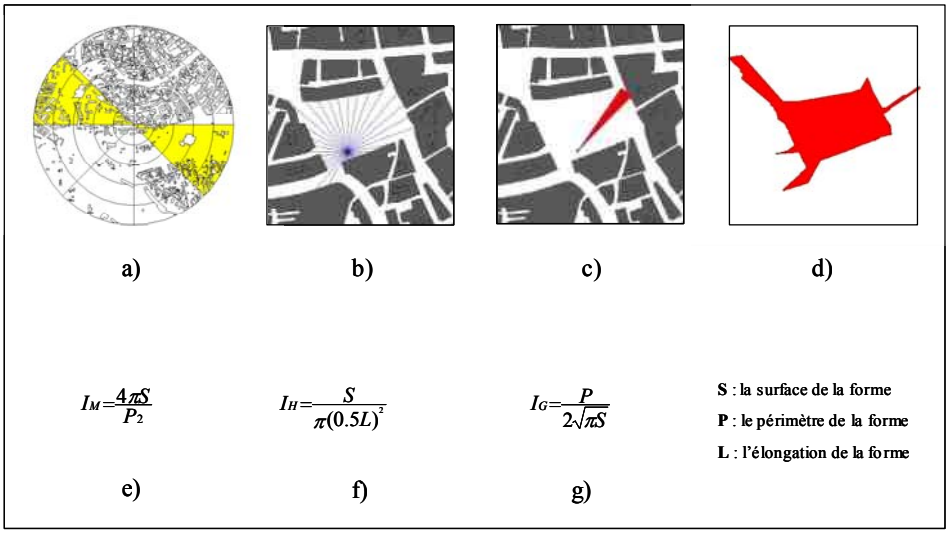


Fig. 2 : Indicateurs et indices renseignant sur la morphologie du site

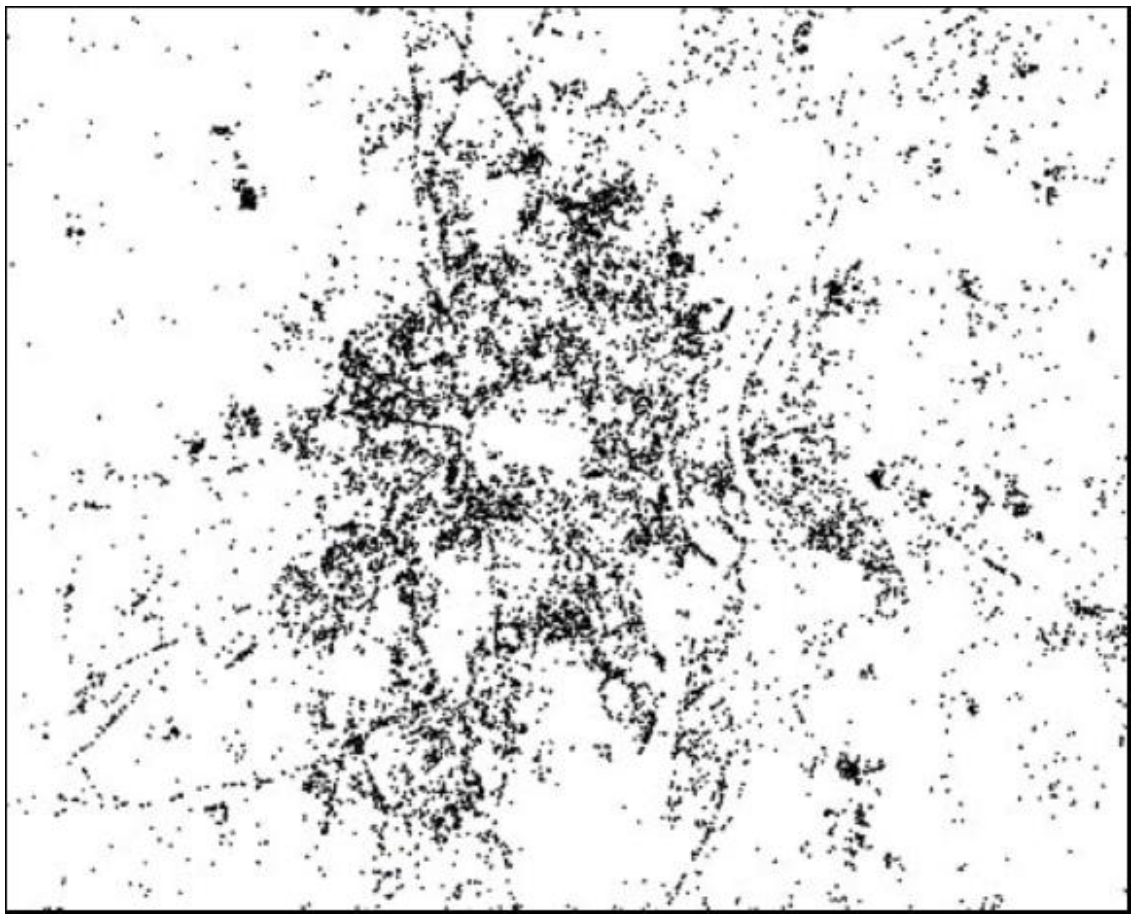
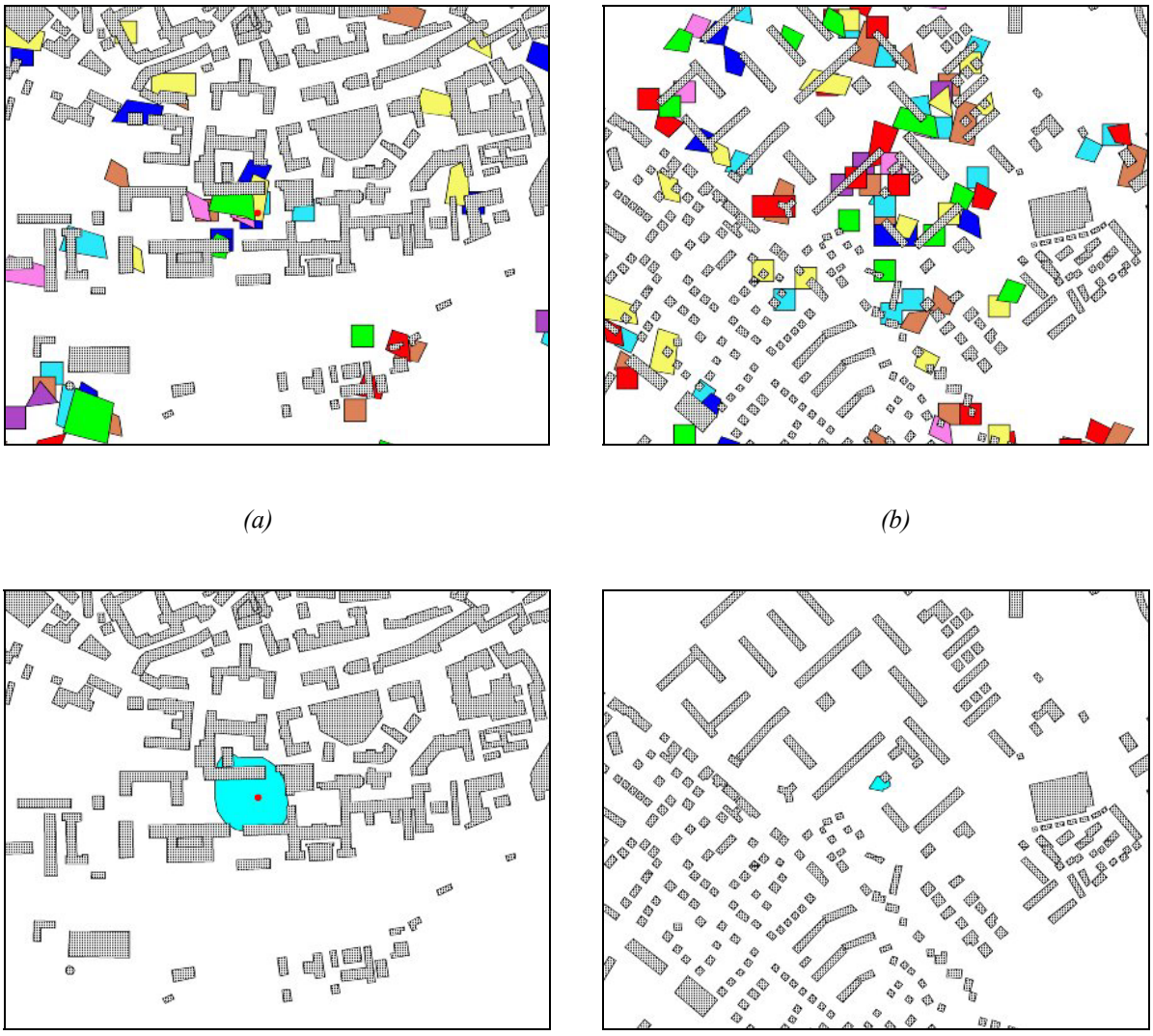


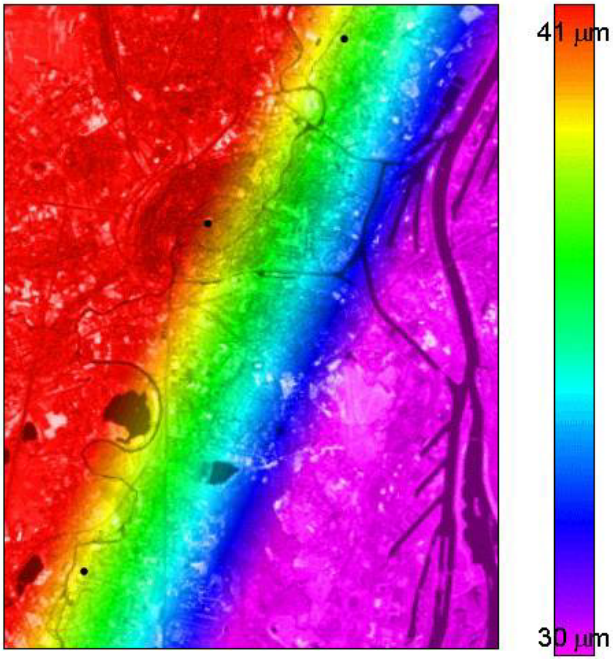
Fig. 3 : union de tous les pixels de signature spectrale identique à la station STG Centre 2 pour les huit dates de prise de vue Landsat 5



(a) *(b)*

(c) *(d)*

Fig. 4 : intersection multidate des pixels de signature spectrale identique à la station STG Centre 2



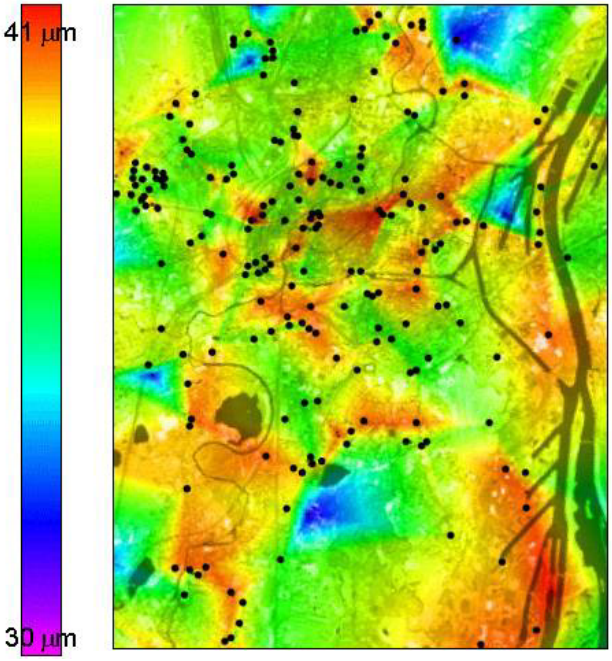


Fig. 5 : Extraits de cartes de concentration en PM_{10} dans la CUS obtenues par interpolation sans pseudostations

Fig. 6 : Extraits de cartes de concentration en PM_{10} dans la CUS obtenues par interpolation avec pseudostations