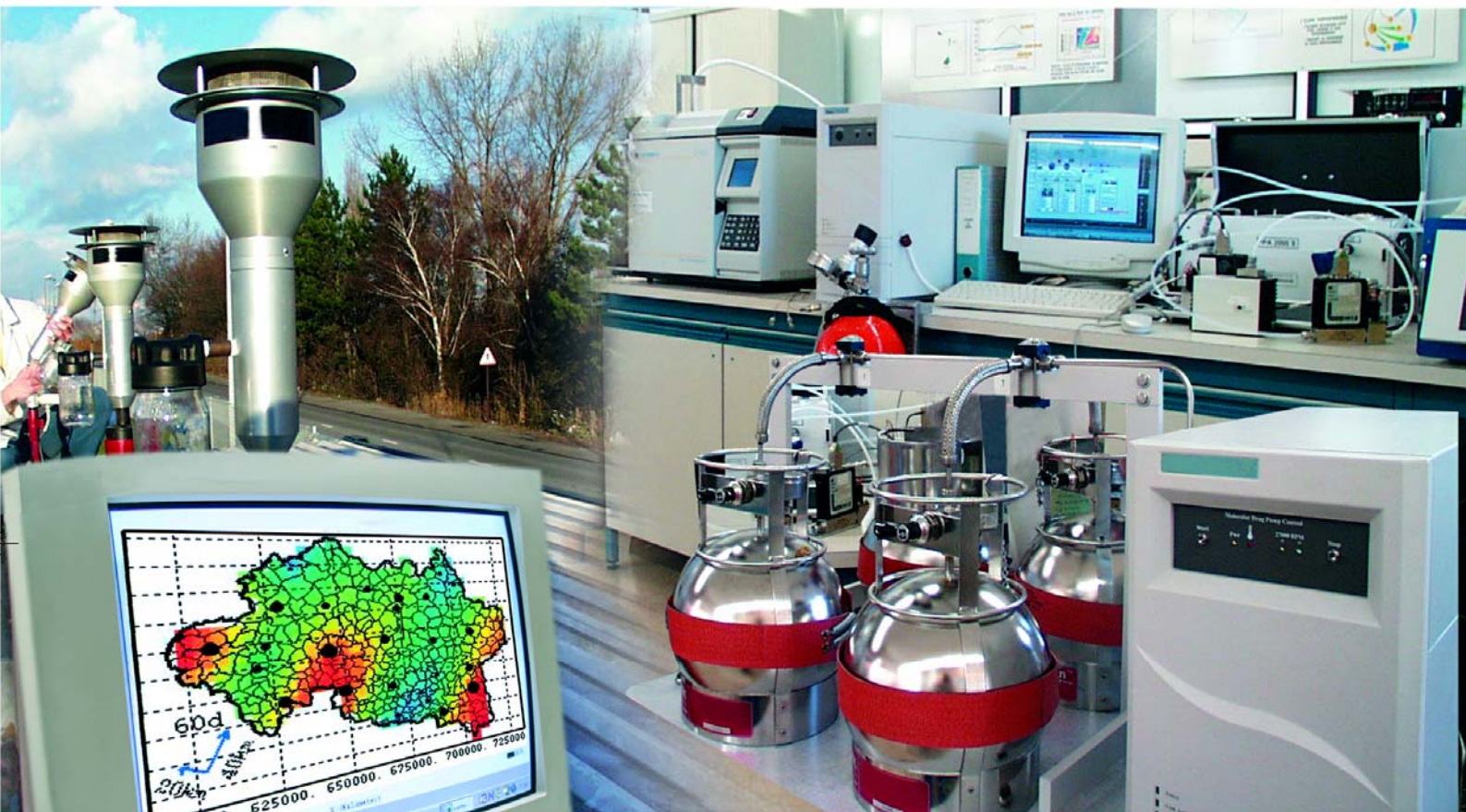




Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



Travaux relatifs à la plate-forme nationale de modélisation
PREV'AIR

**Cartographie locale du dioxyde d'azote à partir des
simulations PREV'AIR (2/2)**

Décembre 2007

Programme 2007

G. CARDENAS ET L. MALHERBE





PREAMBULE

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué de laboratoires de l'Ecole des Mines de Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches finalisées à la demande du Ministère chargé de l'environnement, sous la coordination technique de l'ADEME et en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux en matière de pollution atmosphérique supportés financièrement par la Direction des Préventions des Pollutions et des Risques du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique aux AASQA.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air ambiant, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.



Travaux relatifs à la plate-forme nationale de modélisation PREV'AIR : Cartographie locale du dioxyde d'azote à partir des simulations PREV'AIR

Laboratoire Central de Surveillance
de la Qualité de l'Air

Modélisation et Traitements Numériques

Programme financé par la
Direction des Préventions des Pollutions et des Risques (DPPR)

2007

G CARDENAS, L. MALHERBE

Ce document comporte 33 pages (hors couverture)

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	G. CARDENAS, L. MALHERBE	J-Y. CHATELIER L. ROUIL	M. RAMEL
Qualité	Ingénieurs Direction des Risques Chroniques	Responsable Unité 2IEN Responsable Unité MECO Direction des Risques Chroniques	Responsable LCSQA/INERIS Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. RÉSUMÉ.....	6
REMERCIEMENTS.....	8
2. INTRODUCTION	9
3. CARTOGRAPHIE LOCALE DU DIOXYDE D'AZOTE À PARTIR DES SIMULATIONS PREV'AIR	9
3.1 Présentation du modèle.....	9
3.2 Adaptation de la methode de cartographie journaliere automatique de NO ₂	11
3.2.1 Corrélations « tubes – stations »	11
3.2.2 Calcul journalier de la variable Delta	13
3.2.3 Cartographie journalière	13
3.2.4 Evaluation préliminaire de la methode.....	17
4. APPLICATION À LA RÉGION CENTRE.....	18
4.1 Estimation des campagnes par tubes	18
4.2 Estimation journalière	19
4.2.1 Estimation des campagnes par tubes avec CHIMERE.....	19
4.2.1.1 Modèle CHIMERE et variable delta	19
4.2.1.2 Estimation de la variable delta	19
4.2.1.3 Estimation du NO ₂	21
4.2.2 Application de la methode de cartographie journaliere automatique de NO ₂	23
4.2.2.1 Corrélation tubes - stations	23
4.2.2.2 Cartographie Journalière	23
4.3 Evaluation du modele	25
4.3.1 Comparaison avec les estimations réalisées à partir de tubes à diffusion	25
4.3.2 Analyse de l'ecart aux stations fixes : moyennes journalieres mesurées - estimations par le modele propose	27
5. BILAN ; VOIES D'AMÉLIORATION.....	31
6. RÉFÉRENCES	33

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : NO ₂ – Résultats des estimations par le modèle de résidus avec comme dérive la densité d'émissions en février 2005.....	18
Figure 2 : CHIMERE - moyenne Février 2005.....	19
Figure 3 : Variable Delta - Corrélation avec la densité d'émission en février 2005.....	20
Figure 4 : Variable Delta – Modèle de variogramme des résidus en février 2005	20
Figure 5 : Variable Delta – Résultats de l'estimation par le modèle des résidus en février 2005	21
Figure 6 : NO ₂ - Résultats de l'estimation en prenant en compte le modèle CHIMERE en février 2005.....	22
Figure 7 : NO ₂ - Comparaison des résultats des deux méthodes d'estimation en février 2005	22
Figure 8 : NO ₂ (CHIMERE + Delta) – Résultats pour la journée du 15 mars 2005 (saison hivernale).....	24
Figure 9 : NO ₂ (CHIMERE + Delta) – Résultats pour la journée du 5 juin 2005 (saison estivale)	24
Figure 10 : Validation : Comparaison avec les estimations réalisées à partir de tubes à diffusion pour le mois de février 2005.....	26
Figure 11 : Validation aux SF - Carte des statistiques de l'erreur en moyenne sur l'année 2005.....	28
Figure 12 : Validation aux SF - Carte des statistiques de l'erreur relative, en moyenne sur l'année 2005	30

1. RESUME

Cette étude s'inscrit dans les travaux du LCSQA liés à la plate-forme PREV'Air. L'objectif est d'examiner si la précision des simulations journalières de dioxyde d'azote issues du modèle CHIMERE peut être améliorée en exploitant le maximum de données disponibles, à savoir les données de campagnes d'échantillonnage conduites à l'échelle régionale, les observations des stations fixes et éventuellement des données auxiliaires. Plus précisément, il s'agit d'évaluer la faisabilité d'une approche qui combine la méthodologie de cartographie automatique du NO₂ développée par le LCSQA à l'échelle urbaine et la technique d'analyse, actuellement opérationnelle dans PREV'Air pour l'ozone et les PM₁₀.

La démarche étudiée a été développée sur des données de la région Centre. Elle consiste à :

- établir sur les périodes de campagne un modèle géostatistique de correction de CHIMERE ; ce modèle a comme données d'entrée les différences aux points d'échantillonnage entre les données de tubes et les valeurs simulées par CHIMERE, ainsi que des variables auxiliaires ;
- reconstituer les concentrations journalières de NO₂ aux sites d'échantillonnage passif, par corrélation avec des stations fixes ;
- appliquer le modèle de correction de CHIMERE au pas journalier, en remplaçant les données de tubes par les concentrations reconstituées et en complétant ces données par les observations des stations fixes.

Les premiers tests effectués sur la région Centre sont assez prometteurs. Une validation croisée sur les stations fixes fournit dans l'ensemble des résultats satisfaisants. De plus, les simulations journalières corrigées selon cette procédure ont été comparées, en moyenne sur les périodes d'échantillonnage, aux cartographies obtenues par krigeage à partir des données expérimentales. Ces deux séries d'estimations sont en bon accord. Il sera intéressant d'approfondir cette évaluation en utilisant les nouvelles données recueillies par LIG'Air en 2007. Les tests commencés sur la région Alsace seront également poursuivis.

La principale limite de la méthodologie réside cependant dans deux approximations:

- l'une sur le plan temporel : les concentrations journalières aux sites d'échantillonnage (considérés comme « stations virtuelles ») sont reconstituées selon une simple régression, issue de données mensuelles ou bihebdomadaires, et dont on ne peut démontrer la représentativité dans toutes les situations ;
- l'autre sur le plan spatial : les moyennes par maille de CHIMERE sont migrées aux points d'échantillonnage (une interpolation aurait pu être également réalisée).

Pour que ces approximations restent acceptables et s'assurer au jour le jour que les conditions d'application sont réunies, des précautions et vérifications s'imposent, contrainte qui ne s'accorde pas nécessairement avec une

automatisation de la méthode, dans l'optique de l'élaboration de cartographies journalières.

C'est pourquoi, selon la suggestion du Centre de géosciences de l'Ecole des Mines de Paris, il est envisagé d'explorer une autre approche fondée sur le cokrigeage. Cette approche ne requiert plus de reconstitution journalière des concentrations à partir des données d'échantillonnage mais elle utilise ces dernières comme variable auxiliaire pour l'élaboration des cartes analysées. Elle ne résoudra pas nécessairement la question de l'automatisation de la méthode au pas journalier. L'idée est plutôt de disposer de cartographies mensuelles, saisonnières et annuelles plus précises.

Enfin, étant donné les particularités de chaque région étudiée, une réflexion s'impose sur le moyen d'étendre la méthodologie de correction, quelle qu'elle soit, à un plus grand domaine.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les associations LIG'AIR et ASPA et le Centre de Géosciences - Géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris pour leur collaboration.

2. INTRODUCTION

L'objectif général est d'évaluer la possibilité d'améliorer les estimations journalières du dioxyde d'azote du modèle CHIMERE à l'aide de données issues de mesures réalisées à l'échelle régionale par échantillonnage passif. Cette étude méthodologique, planifiée sur deux ans (2007-2008), s'appuie, dans sa mise au point, sur des données de campagnes par tubes conduites dans la région Centre.

Le principal inconvénient pour l'intégration des informations fournies respectivement par les tubes à diffusion et le modèle CHIMERE réside dans le fait que ces données s'appliquent à des périodes de temps différentes.

Dans cette étude, les sorties du modèle CHIMERE représentent des moyennes journalières, tandis que les mesures par tubes à diffusion représentent, des moyennes bihebdomadaires, ou dans le cas de la région Centre, des moyennes mensuelles.

Outre la question du support temporel, il faut prendre aussi en compte celle qui concerne la dimension spatiale : un support ponctuel pour les sites de mesure (tubes) et une maille bidimensionnelle d'environ 10 Km de côté pour les sorties CHIMERE.

Ce travail exploratoire a pour objet d'examiner si la méthode de cartographie automatique de NO₂ mise au point à l'échelle urbaine lors de travaux précédents (LCSQA, 2004, 2005 et 2006) peut contribuer à l'amélioration de la cartographie journalière de NO₂ à partir de PREV'Air. En exploitant les relations entre sites d'échantillonnage et sites fixes d'une part, puis entre variables de concentration et variables auxiliaires d'autre part, un modèle est développé afin de corriger les simulations journalières de NO₂ issues de PREV'Air. Il est testé préalablement sur la région Centre. Des tests sur la région Alsace sont en cours.

L'étude se scinde en trois parties :

- La première décrit les principes du modèle développé.
- La seconde correspond à l'application pratique dans le cas de la région Centre.
- La troisième partie montre les limites de la méthode et propose des voies d'amélioration.

3. CARTOGRAPHIE LOCALE DU DIOXYDE D'AZOTE A PARTIR DES SIMULATIONS PREV'AIR

3.1 PRESENTATION DU MODELE

Afin de corriger les simulations journalières des concentrations de dioxyde d'azote produites par CHIMERE, le modèle suivant est proposé :

$$NO_2^{Jour} = Chimere^{Jour} + Delta^{Jour}$$

La variable inconnue Delta doit être estimée de façon automatique tous les jours sur tout le domaine d'étude, le modèle devient donc (par cohérence avec l'approche de discrétisation de CHIMERE) :

$$\left(NO_2^{Jour} \right)_{maille}^* = \left(Chimere^{Jour} \right)_{maille} + \left(Delta^{Jour} \right)_{maille}^*$$

Au niveau de tubes à diffusion, le modèle s'écrit :

$$\begin{aligned} \left(NO_2^{Jour} \right)_{tubes} &= \left(Chimere^{Jour} \right)_{tubes} + \left(Delta^{Jour} \right)_{tubes} \\ \Rightarrow \\ \left(Delta^{Jour} \right)_{tubes} &= \left(NO_2^{Jour} \right)_{tubes} - \left(Chimere^{Jour} \right)_{tubes} \end{aligned}$$

Il faut donc calculer la variable Delta aux tubes et ensuite réaliser une estimation par une méthode géostatistique de façon à pouvoir disposer de cette variable sur la maille d'estimation.

Pour estimer la variable Delta, il est conseillé d'exploiter les informations auxiliaires disponibles comme la densité de population, les émissions, etc. Dans ce cas, les méthodes géostatistiques à utiliser sont le krigeage des résidus, le krigeage en dérive externe ou le cokrigeage [Rouïl et Malherbe, 2003 ; Malherbe et Cárdenas, 2005].

Ensuite, il suffit de rajouter cette estimation à la simulation journalière des concentrations de dioxyde d'azote pour obtenir une version corrigée de CHIMERE.

Cette méthode présente, par construction, deux difficultés : la première est l'absence des mesures journalières de dioxyde d'azote aux tubes à diffusion et la seconde est le fait que les sorties CHIMERE ne sont pas connues sur un support ponctuel mais sur une maille d'environ 10 Km de côté.

Afin de pouvoir mettre en application ce modèle, il est proposé de reconstituer les données journalières de NO₂ aux sites d'échantillonnage en adaptant la méthode de cartographie journalière automatique de NO₂ développée par le LCSQA en 2005 et 2006.

En ce qui concerne le changement de support spatial du modèle CHIMERE, on se contente, dans un premier temps, d'affecter au tube la valeur de la maille dans laquelle ce dernier est implanté (migration de la maille vers le point).

Les parties suivantes présentent l'évaluation de cette approche.

3.2 ADAPTATION DE LA METHODE DE CARTOGRAPHIE JOURNALIERE AUTOMATIQUE DE NO₂

La méthode de cartographie automatique de NO₂ repose sur l'existence d'un historique annuel ou pluriannuel de campagnes par échantillonneurs passifs et sur la présence de plusieurs stations fixes mesurant le dioxyde d'azote sur le domaine d'étude.

3.2.1 CORRELATIONS « TUBES – STATIONS »

Les données aux tubes à diffusion sont reconstituées grâce à des corrélations temporelles établies entre les campagnes de mesures par tubes à diffusion et les stations fixes disponibles.

Pour trouver ces corrélations, il faut disposer sur la zone d'étude et pour les mêmes périodes, d'une part, d'au moins six campagnes de mesures par tubes à diffusion (trois par saison : été/hiver) et d'autre part, d'au moins deux stations de mesure de typologies différentes.

Une station fixe est ensuite attachée à chaque site d'échantillonnage passif si les deux conditions suivantes sont respectées :

- Le coefficient de corrélation tube/capteur doit être supérieur ou égal à 0.8.
- Toute la gamme de concentrations doit être représentée dans la corrélation tube/capteur, pour cela, l'étendue (MAX-MIN) du capteur est divisée en trois intervalles égaux, puis on vérifie l'existence d'au moins deux couples (mesure du tube/mesure du capteur) dans chaque intervalle.

Pour chaque paire *site d'échantillonnage / station fixe* sélectionnée, une régression linéaire est réalisée. Après contrôle du modèle obtenu, les paramètres statistiques de ce dernier (pente et ordonnée à l'origine) sont appliqués directement aux mesures journalières de la station fixe afin d'estimer les concentrations journalières au point d'échantillonnage (

Chaque site d'échantillonnage passif devient donc une « *station virtuelle* » et la station attachée devient « *la station de référence* » de cette dernière.

$$NO_2^{TP} = (\alpha_{CT} * NO_2^{SF}) + \beta_{CT} \quad \text{où : } NO_2^{SF} = \text{Moyenne période campagnes par tubes}$$

⇒

$$NO_2^{SV} = (\alpha_{CT} * NO_2^{SFref}) + \beta_{CT} \quad \text{où : } NO_2^{SFref} = \text{Moyenne mesures journalières}$$

CT : Corrélacion temporelle entre le tube passif et la station fixe

SV : Station virtuelle

SFref : Station fixe de référence

Dans cette méthode, on transmet directement, pour la reconstitution des données journalières, les paramètres statistiques définis sur une période de temps plus longue, celle des campagnes par tubes à diffusion, soit deux semaines ou plus (il n'y a pas d'ajustement du fait du passage de 14 jours à une journée).

C'est une hypothèse forte qui avait été évaluée lors de la validation de la méthode de cartographie automatique mise au point par le LCSQA, en 2006. L'analyse de ce changement de support temporel avait permis de conclure que ces relations pouvaient s'appliquer avec succès la plupart du temps, sauf lorsque des conditions météorologiques précises se présentaient : période estivale avec hautes températures et faibles niveaux de concentration en NO₂.

Parallèlement au travail réalisé en 2007, le Centre de géosciences /géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris a examiné d'un point de vue théorique dans quelles conditions le modèle de station virtuelle pouvait rigoureusement s'appliquer (Fouquet, 2008).

- Ce modèle pose le problème de la variance : la dispersion des jours dans les quinzaines n'est pas prise en compte.

On peut montrer que la régression linéaire établie sur des données bihebdomadaires reste valide pour les concentrations journalières dans le cas où les variables NO₂^{TP} et NO₂^{SF} vérifient un modèle à résidu :

$$NO_2^{TP} = \alpha NO_2^{SF} + R, \quad R \text{ étant une fonction aléatoire non temporellement corrélée à } NO_2^{SF},$$

ou dans le cas plus particulier où ces deux variables sont intrinsèquement corrélées, c'est-à-dire que leurs variogrammes simples et croisés sont proportionnels.

D'autre part, et d'une façon générale, la représentativité de la moyenne dans le modèle de station virtuelle peut être discutée.

En effet, soient X et Y deux variables aléatoires, de moyennes respectives m_X et m_Y, d'écart-types respectifs σ_X et σ_Y, et de coefficient de corrélation r. X et Y sont ici les concentrations bihebdomadaires mesurées respectivement par analyseur automatique et par échantillonnage passif durant les campagnes. La régression linéaire de Y sur X s'écrit :

$$Y^* - m_Y = r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} (X - m_X) \quad (1) \Leftrightarrow Y^* = \left(m_Y - r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} m_X \right) + r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} X$$

Cette formule montre le rôle joué par les *moyennes* des variables. Les jours où les vraies moyennes journalières au site virtuel ou à la station fixe de référence s'écartent très nettement des moyennes m_X et m_Y sur la période de calage (par exemple du fait conditions météorologiques exceptionnelles ou de situations d'émission particulières), la donnée journalière reconstituée peut être biaisée.

Un modèle de station virtuelle nécessite donc de prendre certaines précautions, aussi bien dans sa conception, notamment dans le choix du couple station virtuelle/station de référence, que dans sa mise en œuvre journalière.

Un critère pourrait être proposé : à la station de référence, un écart trop important (à définir) entre la concentration journalière mesurée et la moyenne sur la période de calage indique que la relation de régression risque d'être inadaptée.

3.2.2 CALCUL JOURNALIER DE LA VARIABLE DELTA

En reprenant la méthodologie de cartographie automatique, le modèle pour le calcul de la variable Delta aux stations virtuelles s'écrit :

$$\begin{aligned} \left(\text{Delta}^{Jour} \right)_{tubes} &= \left(\text{NO}_2^{Jour} \right)_{tubes} - \left(\text{Chimere}^{Jour} \right)_{tubes} \\ \Rightarrow \\ \left(\text{Delta}^{Jour} \right)_{SV} &= \left(\text{NO}_2^{Jour} \right)_{SV} - \left(\text{Chimere migré}^{Jour} \right)_{SV} \end{aligned}$$

$$\text{avec : } \left(\text{NO}_2^{Jour} \right)_{SV} = \left[\alpha_{CT} * \left(\text{NO}_2^{SFréf} \right)^{Jour} \right] + \beta_{CT}$$

Pour un jour donné, la méthode peut se résumer ainsi :

En un site d'échantillonnage passif, on reconstitue d'abord la concentration journalière à l'aide de la station fixe qui lui est rattachée et du modèle de corrélation temporelle correspondant.

Puis on estime la valeur journalière de CHIMERE en ce point. Dans cette étude exploratoire, on se contente d'affecter au site d'échantillonnage la donnée de la maille CHIMERE qui contient ce site (en termes géostatistiques, on migre CHIMERE du centre de maille vers le site).

Enfin, on calcule la variable Delta en appliquant l'expression présentée ci-dessus.

3.2.3 CARTOGRAPHIE JOURNALIERE

L'estimation journalière de la variable Delta s'effectue de façon automatisée, selon la même procédure que dans la méthode de cartographie automatique du NO_2 à l'échelle urbaine.

La technique d'estimation mise en œuvre est un krigeage avec variables auxiliaires. Tous les paramètres d'estimation sont définis à l'avance : fonction auxiliaire, méthode d'estimation et modèle de variogramme à utiliser. Pour cela, on réalise d'abord une estimation du NO₂ à l'aide des données expérimentales de campagnes par tubes à diffusion et du modèle CHIMERE, en appliquant le modèle proposé.

Le Tableau 1 affiche les principales opérations qui doivent être préalablement effectuées sur les données de campagnes par tubes à diffusion, afin de dégager les paramètres d'estimation qui seront utilisés dans la cartographie journalière.

Le Tableau 2 indique les étapes à effectuer quotidiennement pour élaborer les cartographies journalières de NO₂.

#	Action	Résultat
1	Calcul de la moyenne des résultats du modèle CHIMERE sur les mêmes périodes que les campagnes par tubes	$(Chimere^\tau)_{maille}$ avec : $\tau = 15 \text{ jours ou plus}$
2	Estimation de CHIMERE aux points des tubes : à chaque point de tube est affectée la valeur de la maille à laquelle il appartient.	$(Chimere^\tau)_{tubes}$
3	Calcul de la variable Delta aux tubes : $(Delta^\tau)_{tubes} = (NO2_2^\tau)_{tubes} - (Chimere^\tau)_{tubes}$	$(Delta^\tau)_{tubes}$
4	Analyse statistique de la variable Delta : calcul des histogrammes, des nuages de corrélation entre campagnes, des nuages de corrélation avec les coordonnées X et Y, des variogrammes, etc.	Connaissance approfondie du phénomène : détection des données erronées, des dérives spatiales, des anisotropies, etc.
5	Recherche des informations auxiliaires : étude des variables disponibles : relief, émissions, densité de population, données météo, etc. Calcul des nuages de corrélation.	Construction et analyse de la ou des fonctions auxiliaires les mieux corrélées à la variable Delta.
6	Calcul des résidus (pour appliquer un krigeage selon le modèle des résidus) : $Delta = Résidu + Dérive$ avec : $Dérive = [\alpha * (F. Aux.)] + \beta$	$(Résidu^\tau)_{tubes} = (Delta^\tau)_{tubes} - (Dérive^\tau)_{tubes}$
7	Calcul et modélisation du variogramme des résidus (pour appliquer le krigeage des résidus) Calcul et modélisation des variogrammes croisés entre la variable Delta et la fonction auxiliaire (pour appliquer la méthode du cokrigeage)	Choix des structures de base et des paramètres des modèles de variogramme.
8	Application de la méthode de la validation croisée sur la variable Delta et le NO ₂ final.	Choix de la méthode d'estimation et du modèle inhérent qui seront utilisés pour la cartographie journalière : krigeage des résidus (Krés), cokrigeage (CK) ou krigeage avec dérive externe (Dext)
9	Estimation moyenne par campagne de la variable Delta, à l'aide de la méthode sélectionnée (estimation sur des blocs coïncidant avec la maille CHIMERE) Analyse des résultats obtenus ainsi que de la variance d'estimation.	$(Delta^\tau)^*_{maille}$ et $\sigma^{Krigeage Delta}$
10	Calcul du NO ₂ sur les mailles CHIMERE : $(NO2_2^\tau)^*_{maille} = (Delta^\tau)^*_{maille} + (Chimere^\tau)_{maille}$	$(NO2_2^\tau)^*_{maille}$ Conclusions sur la qualité des estimations et sur l'allure générale des cartes obtenues.

Tableau 1 : Opérations à effectuer sur les données de tubes à diffusion avant de mettre en place la cartographie journalière

#	Action	Résultat
1	Récupération des données journalières aux stations fixes et application des modèles de stations virtuelles.	Concentration journalières reconstituées aux stations virtuelles $\left(NO_2^{jour} \right)_{tubes}$
2	Estimation de la valeur journalière de CHIMERE aux points des tubes : à chaque point de tube est affectée la valeur journalière de la maille à laquelle il appartient.	$\left(Chimere^{jour} \right)_{tubes}$
3	Calcul de la variable Delta aux tubes : $\left(Delta^{jour} \right)_{tubes} = \left(NO_2^{jour} \right)_{tubes} - \left(Chimere^{jour} \right)_{tubes}$	$\left(Delta^{jour} \right)_{tubes}$
4	Estimation de la variable Delta sur les mailles CHIMERE en appliquant le modèle géostatistique prédéfini (Tableau 1)	$\left(Delta^{jour} \right)_{maille}^*$
5	Estimation finale de la concentration journalière de NO ₂ : $\left(NO_2^{jour} \right)_{maille}^* = \left(Delta^{jour} \right)_{maille}^* + \left(Chimere^{\tau} \right)_{maille}$	$\left(NO_2^{jour} \right)_{maille}^*$

Tableau 2 : Etapes de la cartographie journalière

3.2.4 EVALUATION PRELIMINAIRE DE LA METHODE

Le modèle proposé a été testé sur deux cas d'étude, les régions Centre et Alsace. Nous présentons ci-après les résultats pour la région Centre. Les résultats relatifs à l'Alsace, en cours d'exploitation, seront approfondis en 2008.

Deux types d'évaluation ont été effectués. Le premier a consisté à comparer les estimations mensuelles de NO₂ effectuées à partir des mesures par tubes, sans prendre en compte le modèle CHIMERE, avec les moyennes sur les mêmes périodes des estimations journalières de NO₂ élaborées à l'aide de la méthode de cartographie automatique.

Le second type de validation a consisté à analyser les statistiques par station fixe de la différence entre la moyenne journalière mesurée et estimée par une procédure de validation croisée.

Le chapitre 4 est consacré à l'évaluation du modèle proposé dans le cas de la Région Centre. Pour faciliter la compréhension, seuls les principaux résultats de l'application des méthodes sont présentés.

4. APPLICATION A LA REGION CENTRE

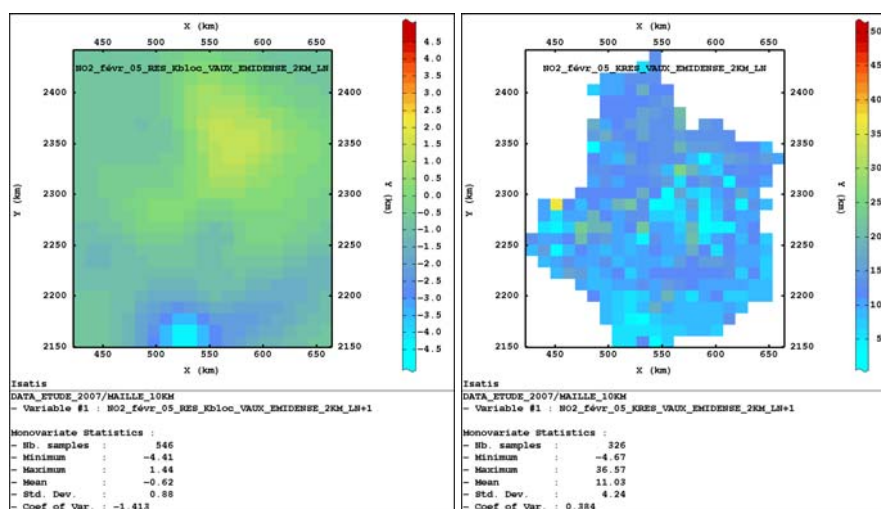
4.1 ESTIMATION DES CAMPAGNES PAR TUBES

On dispose, d'une part, de mesures de NO₂ provenant de 12 campagnes réalisées pendant l'année 2005 sur 49 points repartis sur toute la région Centre. Les tubes à diffusion ont été exposés pendant douze mois consécutifs, de janvier à décembre¹.

D'autre part, on compte en 2005 17 stations fixes de mesure du NO₂, dont 14 sont de typologie urbaine et 2 de proximité trafic

Deux variables ont été créées par un Système d'Information Géographique (SIG) : la densité d'émission dans un rayon de 2Km et la densité de population dans un rayon de 5Km. L'étude des corrélations entre ces deux variables et avec les concentrations n'a pas permis de les fusionner dans une seule fonction auxiliaire. Par la suite, la densité d'émission dans un rayon de 2Km a été choisie comme fonction auxiliaire.

Une cartographie mensuelle de NO₂ a été établie par le modèle des résidus, la Figure 1 montre les résultats concernant les estimations de février 2005.



A gauche : Estimation par krigeage des résidus du NO₂

A droite : Estimation du NO₂ (Résidus estimés + Dérive)

Figure 1 : NO₂ – Résultats des estimations par le modèle de résidus avec comme dérive la densité d'émissions en février 2005

¹ Les premières campagnes ont déjà fait l'objet d'analyses au sein du LCSQA en 2005 dans le cadre de la fiche « Application des méthodes géostatistiques pour l'exploitation conjointe de mesures de fond et de proximité ». La plupart des choix réalisés lors de ces analyses ont été conservés dans la présente étude.

4.2 ESTIMATION JOURNALIERE

La méthode consiste à appliquer la procédure expliquée dans la section 3.2 pour estimer les concentrations journalières de NO₂ en 2005. Ensuite, les moyennes mensuelles seront calculées pour rendre possible la comparaison avec l'estimation directe des campagnes par tubes.

Dans un premier temps, il faut réaliser une estimation du NO₂ à l'aide des campagnes par tubes à diffusion et du modèle CHIMERE, en appliquant le modèle proposé. Ce travail permettra de sélectionner les paramètres de l'estimation journalière (Tableau 1).

4.2.1 ESTIMATION DES CAMPAGNES PAR TUBES AVEC CHIMERE

4.2.1.1 MODELE CHIMERE ET VARIABLE DELTA

A titre d'exemple, la Figure 2 montre la moyenne mensuelle de NO₂ calculée par le modèle CHIMERE pour février 2005.

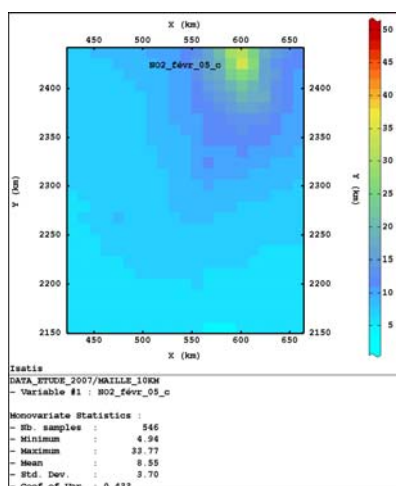


Figure 2 : CHIMERE - moyenne Février 2005

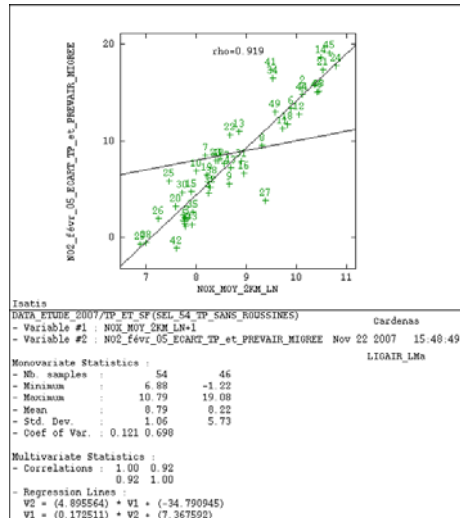
A partir des mesures NO₂ et des résultats du modèle CHIMERE estimés aux tubes, la variable Delta (NO₂-CHIMERE) est calculée aux sites de mesure. Dans la partie suivante, elle est estimée sur le domaine.

4.2.1.2 ESTIMATION DE LA VARIABLE DELTA

La même méthode utilisée lors de l'estimation mensuelle du NO₂ a été appliquée à la variable Delta. Celle-ci consiste à décomposer la variable en deux parties, une dérive qui est fonction de la variable de densité d'émission et un résidu calculé aux localisations des tubes et interpolé par krigeage :

$$\left(\text{Résidu}^\tau \right)_{\text{tubes}} = \left(\text{Delta}^\tau \right)_{\text{tubes}} - \left\langle \left\{ \left[\alpha * (F. \text{Emissions}) \right] + \beta \right\}^\tau \right\rangle_{\text{tubes}}$$

Il faut donc réaliser une corrélation linéaire entre la variable Delta et la fonction auxiliaire pour trouver les paramètres α et β , ensuite calculer les résidus et les estimer sur tout le domaine par krigeage. Cette corrélation est généralement de bonne qualité, par exemple celle correspondant au mois de février 2005 a un coefficient de 0.92 (cf. Figure 3).



Paramètres calculés : $\alpha = (4.89)$ et $\beta = (-34.8)$

Figure 3 : Variable Delta - Corrélation avec la densité d'émission en février 2005

Pour les résidus de la variable Delta, on a toujours ajusté le même modèle de variogramme composé d'un effet de pépite et d'une structure sphérique de portée 40Km ; ces modèles ne présentent généralement pas de forte corrélation spatiale. Par exemple pour le mois de février 2005, l'effet de pépite représente deux tiers de la variance totale (cf. Figure 4).

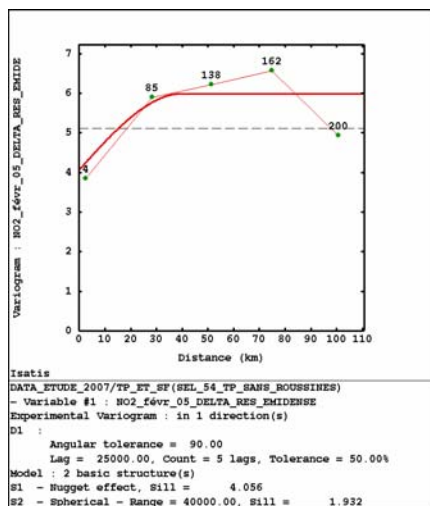
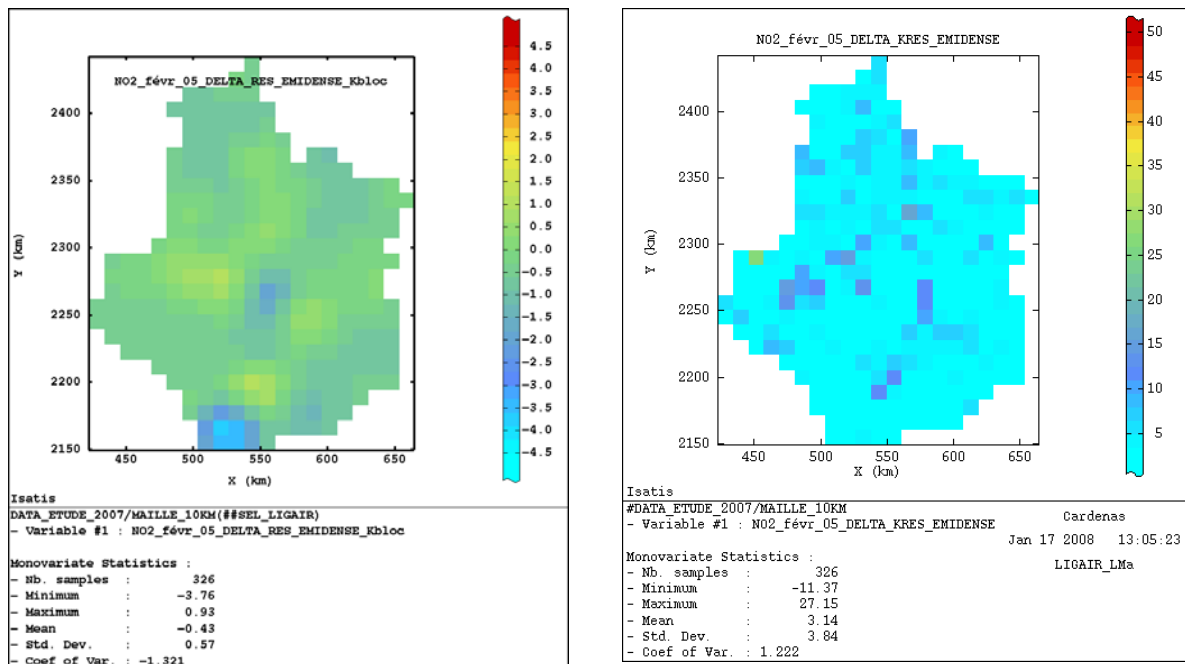


Figure 4 : Variable Delta – Modèle de variogramme des résidus en février 2005

Les résultats de l'estimation des résidus et de la variable Delta pour février 2005 sont présentés dans la Figure 5.



A gauche : Estimation par krigeage des résidus de la variable Delta

A droite : Estimation de la variable Delta (Résidus estimés + Dérive)

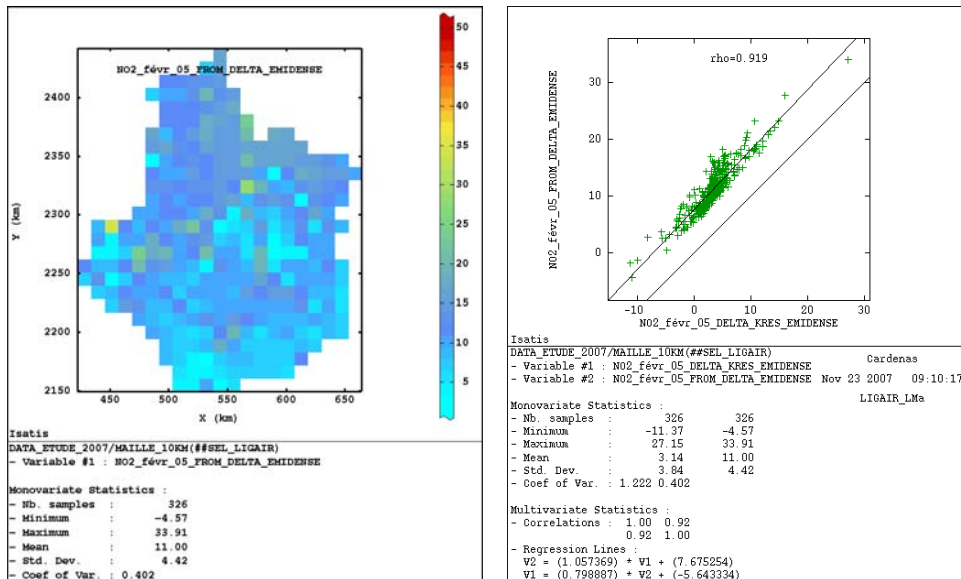
Où Dérive = $(4.89 * \text{Densité d'émission}) + (-34.8)$

Figure 5 : Variable Delta – Résultats de l'estimation par le modèle des résidus en février 2005

4.2.1.3 ESTIMATION DU NO₂

La concentration de NO₂ est calculée en ajoutant au modèle CHIMERE la variable delta estimée. La Figure 6 montre, pour février 2005, la correction du modèle CHIMERE obtenue.

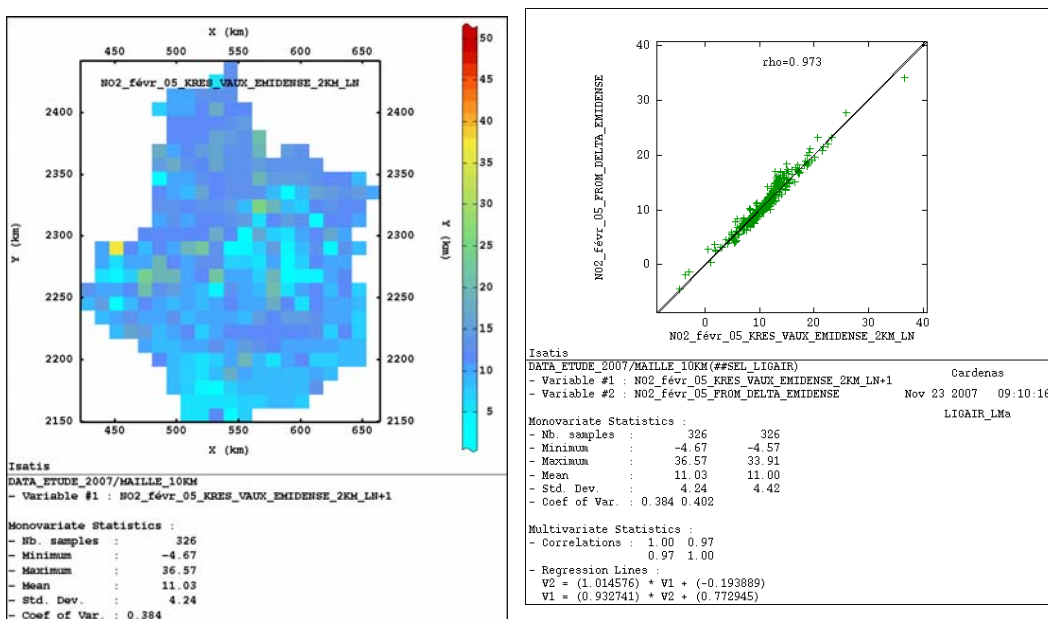
A titre de comparaison, la Figure 7 montre pour février 2005 le nuage de corrélation entre l'estimation obtenue en prenant en compte le modèle CHIMERE d'une part et l'estimation réalisée à partir des seules mesures par tubes. La corrélation est très élevée. Ce résultat peut notamment s'expliquer par le rôle important des variables auxiliaires dans chacune de ces estimations.



A gauche : Estimation de NO₂ (Delta + CHIMERE)

A droite : Nuage NO₂ vs la variable Delta

Figure 6 : NO₂ - Résultats de l'estimation en prenant en compte le modèle CHIMERE en février 2005



A gauche : Estimation de NO₂ (sans prendre en compte CHIMERE)

A droite : Nuage NO₂ (Delta + CHIMERE) vs NO₂ (sans prendre en compte CHIMERE)

Figure 7 : NO₂ - Comparaison des résultats des deux méthodes d'estimation en février 2005

4.2.2 APPLICATION DE LA METHODE DE CARTOGRAPHIE JOURNALIERE AUTOMATIQUE DE NO₂

4.2.2.1 CORRELATION TUBES - STATIONS

La méthode des corrélations temporelles expliquée dans la section 3.2.1 a été appliquée dans la région Centre. Cela a permis d'attacher une station fixe à la plupart des sites d'échantillonnage (45 sites) et de trouver les paramètres statistiques nécessaires pour reconstituer les concentrations journalières des stations virtuelles.

Il faut noter que certaines stations fixes jouent plus que d'autres le rôle de station de référence, y compris pour des sites d'échantillonnage relativement éloignés. Les concentrations qu'elles mesurent semblent donc refléter une évolution assez générale de la pollution de fond en NO₂ sur le domaine ou une partie du domaine. Il s'agit des sites suivants :

Joué-lès-Tours (station « urbaine de fond » de Tours, attachée à 16 stations virtuelles), Leblanc (station « urbaine de fond » de Bourges, attachée à 10 stations virtuelles), Châteauroux - Sud (station « urbaine de fond » de Châteauroux, attachée à 5 stations virtuelles), Jardin Botanique (ancienne station urbaine de fond de Tours, attachée à 5 stations virtuelles), Déols (station urbaine de Châteauroux, attachée à 3 stations virtuelles).

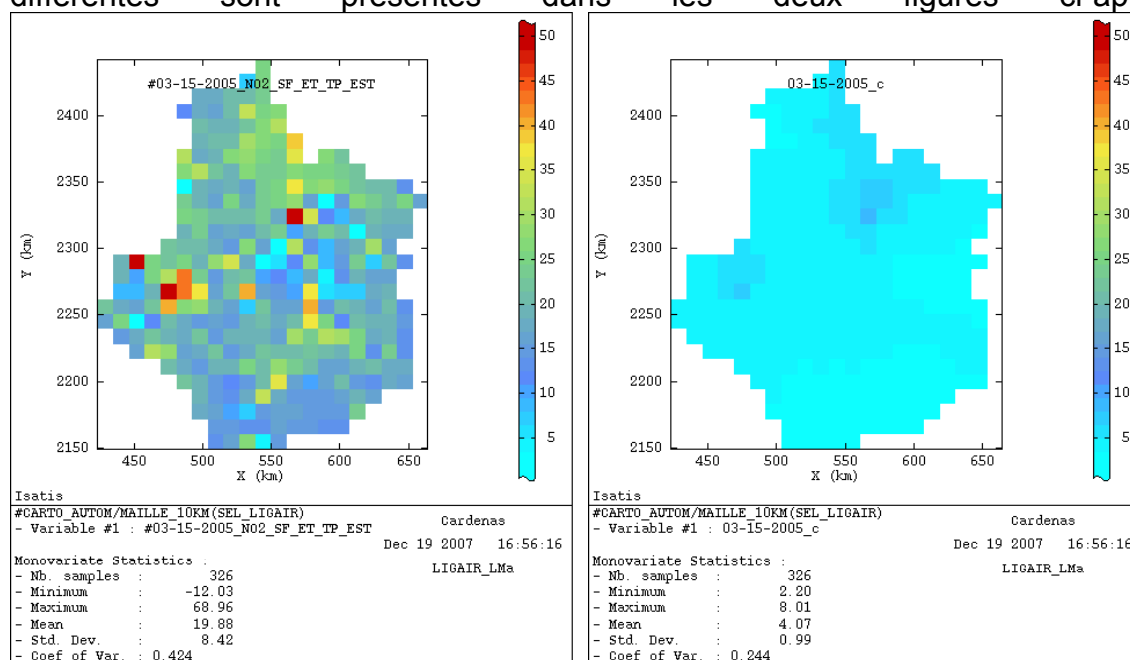
4.2.2.2 CARTOGRAPHIE JOURNALIERE

Le modèle proposé dans cette étude (§ 3.1, Tableau 1) et déjà utilisé lors de l'estimation des campagnes par tubes (§ 4.2.1) est maintenant appliqué aux concentrations journalières reconstituées et mesurées pour l'année 2005. Les paramètres définis à l'avance grâce aux analyses précédentes sont compilés dans le Tableau 3.

Variable	Choix
Concentrations aux stations virtuelles	Estimées à partir des stations de référence et paramètres statistiques des corrélations temporelles
Les jeux des données à estimer	45 Stations virtuelles et 18 stations fixes disponibles
Variable auxiliaire	Densité d'émissions dans un rayon de 2Km
Méthode d'estimation de la variable Delta	Décomposition en (résidus + dérive) et krigeage de ces résidus.
Modèle de variogramme des résidus de la variable delta.	Effet de pépite + structure sphérique de portée 40Km. Le palier est ajusté automatiquement tous les jours.

Tableau 3 : Cartographie Journalière - Paramètres définis à l'avance

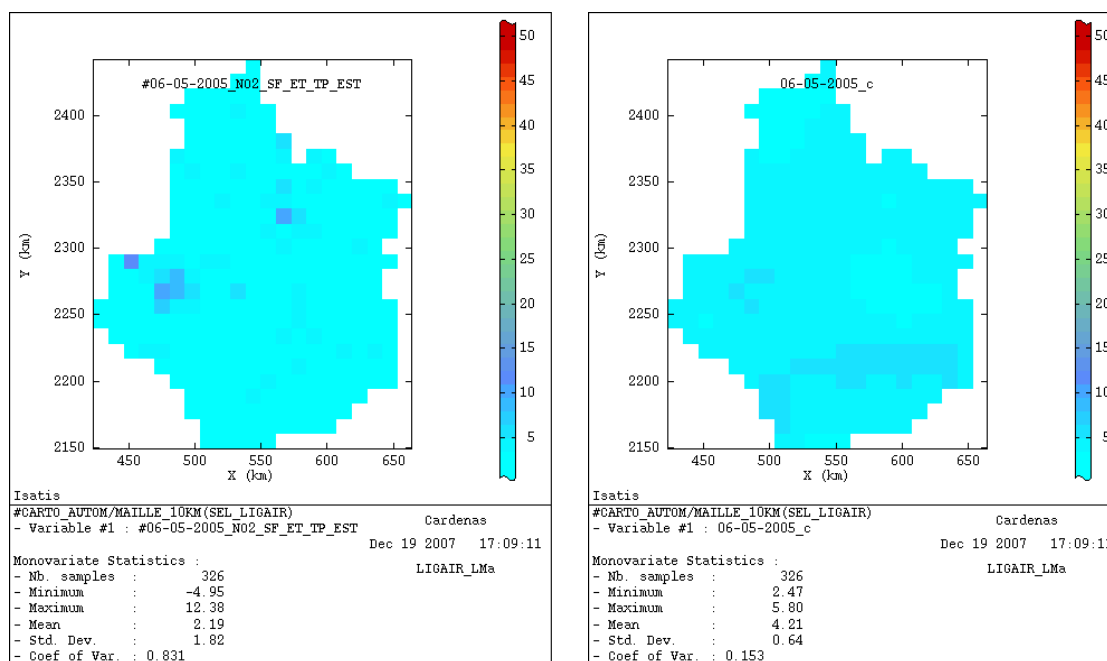
Les résultats de l'estimation de deux journées appartenant à deux saisons différentes sont présentés dans les deux figures ci-après.



A gauche : NO₂ – estimation par le modèle proposé (CHIMERE + Delta)

A droite : Modèle CHIMERE seul

Figure 8 : NO₂ (CHIMERE + Delta) – Résultats pour la journée du 15 mars 2005 (saison hivernale)



A gauche : NO₂ – estimation par le modèle proposé (CHIMERE + Delta)

A droite : Modèle CHIMERE

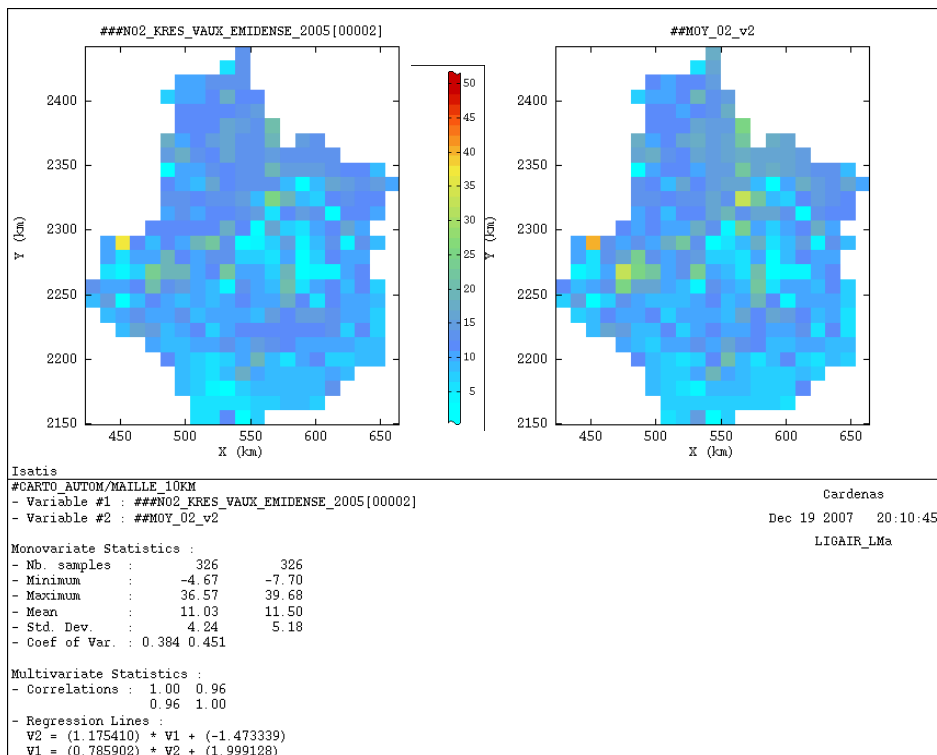
Figure 9 : NO₂ (CHIMERE + Delta) – Résultats pour la journée du 5 juin 2005 (saison estivale)

4.3 EVALUATION DU MODELE

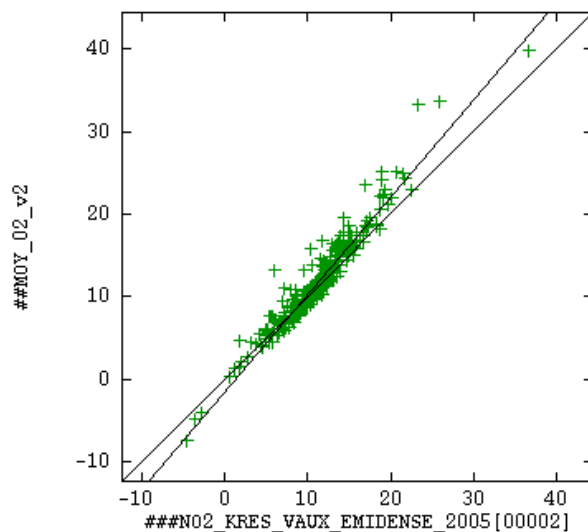
4.3.1 COMPARAISON AVEC LES ESTIMATIONS REALISEES A PARTIR DE TUBES A DIFFUSION

Une première façon de tester la méthode est de calculer la moyenne des estimations journalières, réalisées à partir des stations virtuelles en prenant en compte le modèle CHIMERE, et de les comparer avec les estimations issues des données de campagnes (mesures mensuelles des tubes).

Les résultats sont très encourageants, par exemple la Figure 10 montre les résultats obtenus pour février 2005. Les cartes des deux variables sont similaires, les statistiques ne montrent qu'une légère surestimation de la part du modèle proposé.



rho=0.961



En haut à droite : NO₂ – estimation à partir des tubes à diffusion (mesures mensuelles)

En haut à gauche : Moyenne mensuelle des estimations journalières de NO₂ effectuées à partir des stations virtuelles en prenant en compte le modèle proposé (CHIMERE + Delta)

En Bas : nuage de corrélation entre ces deux variables

Figure 10 : Validation : Comparaison avec les estimations réalisées à partir de tubes à diffusion pour le mois de février 2005.

4.3.2 ANALYSE DE L'ECART AUX STATIONS FIXES : MOYENNES JOURNALIERES MESUREES - ESTIMATIONS PAR LE MODELE PROPOSE

Il s'agit de l'adaptation de la méthode de la validation croisée à l'estimation journalière du NO₂ en prenant en compte le modèle CHIMERE.

Les résultats de la validation croisée aux stations fixes sont issus de la comparaison de la moyenne journalière estimée à des mesures réelles.

On applique toujours la procédure décrite précédemment (§ 4.2.2) mais à chaque fois on estime la concentration d'une station fixe à partir des 45 stations virtuelles et des 17 autres stations fixes.

La moyenne des concentrations journalières ainsi que des statistiques sur l'erreur et l'erreur relative d'estimation sont affichés dans les tableaux et figures suivantes.

Code	Nom	Type	NO2		Erreur [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]				
			Nb	Moy mesurée [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Nb	Min	Moy	Max	Ecart type
34018	Montargis	Urbaine	84	19.8	84	-9.8	-1.2	9.2	3.7
34062	Blois Centre		298	21.12	293	-8.5	1.7	19.2	4.0
34052	Déols		329	13.69	325	-6.7	1.0	12.8	3.1
34025	La Bruyère		333	25.62	328	-8.6	2.5	20.7	5.5
34024	Joue les Tours		339	18.79	334	-16.3	-4.7	6.6	3.5
34032	Leblanc		340	16.31	335	-9.8	-1.5	8.1	2.8
34011	Préfecture		342	25.54	337	-15.1	-0.3	14.4	5.0
34012	La Source		343	26.38	338	-11.5	6.1	31.2	8.8
34046	Dreux centre		349	15.63	344	-18.5	-3.8	9.9	3.8
34023	Jardin Botanique		350	25.39	345	-10.9	2.1	23.1	5.7
34014	St Jean		352	18.08	347	-17.0	-5.3	8.9	4.0
34061	Blois Nord		353	14.89	348	-14.9	-2.9	13.5	4.1
34041	Fulbert		356	17.1	351	-15.0	-3.0	17.9	4.3
34031	Gibjoncs		357	17.89	352	-9.7	1.9	17.7	4.3
34042	Luce		359	18.91	354	-14.9	-1.2	23.8	4.5
34051	Châteauroux Sud	359	13.91	354	-11.4	-2.1	12.7	3.4	
34013	Gambetta	trafic	358	40.39	353	3.3	17.2	41.8	6.9
34022	Mirabeau		354	46.21	349	-0.5	20.2	52.9	10.5

Tableau 4 : Stations fixes et principales statistiques de l'erreur calculée par validation croisée pour l'année 2005

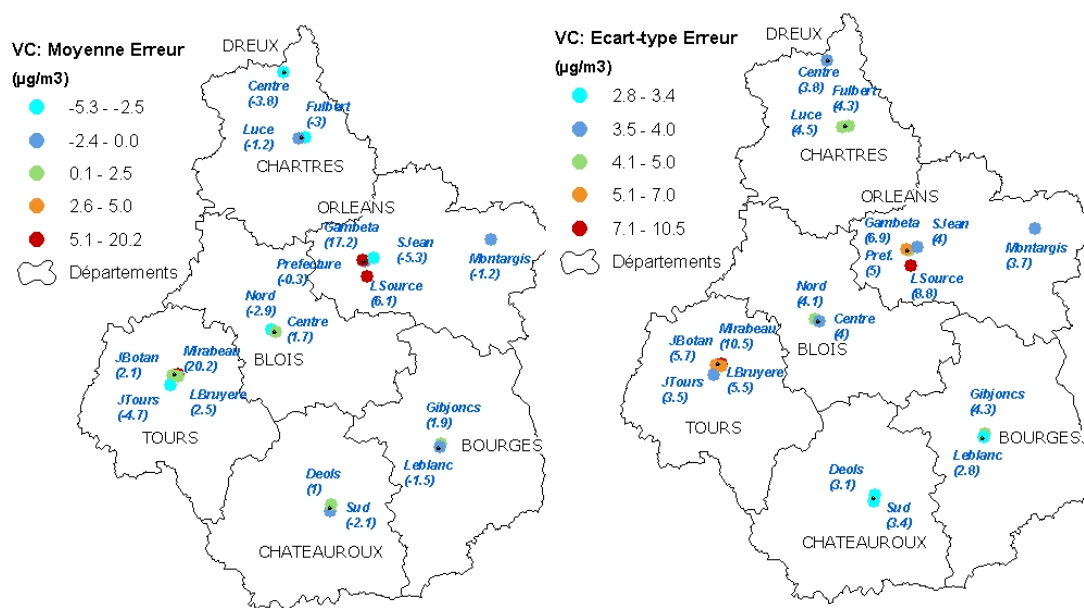


Figure 11 : Validation aux SF - Carte des statistiques de l'erreur en moyenne sur l'année 2005

La moyenne et l'écart - type des erreurs sont les plus importants pour les stations de trafic Gambetta à Orléans et Mirabeau à Tours ainsi que pour la station urbaine La Source à Orléans². Les concentrations journalières mesurées en ces stations sont largement sous-estimées (Gambetta : erreur de +17.2 µg/m³ en moyenne pour un écart - type de 6.9 µg/m³ ; Mirabeau : +20.2 µg/m³ et écart - type de 10.5 µg/m³ ; La Source : +6.1µg/m³ et écart - type de 8.8 µg/m³).

Parmi les 15 autres stations urbaines, deux présentent une surestimation importante : Joué-Lès-Tours (-4.1 µg/m³) à Tours et Saint Jean (-5.3 µg/m³) à Orléans, ce qui peut s'expliquer par la proximité des stations de trafic qui, pour ces tests, ont été introduites dans l'estimation. Pour les 13 autres stations urbaines, le modèle proposé semble donner des résultats satisfaisants : les erreurs en moyenne annuelle varient entre -3.8 µg/m³ (Dreux Centre) et +2.5 µg/m³ (La Bruyère à Tours), et les écart - types de l'erreur entre 2.8 µg/m³ (Le Blanc à Bourges) et 5.7 µg/m³ (Jardin Botanique à Tours).

² Le comportement particulier de cette station a pu être mis en évidence dans une analyse de la variabilité temporelle des mesures de stations fixes.

Code	Nom	Type	Nb jours	Moy NO2 mesurée [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Erreur Relative [%]				
					Nb	Min	Moy	Max	Ecart type
34018	Montargis	Urbaine	84	19.8	84	-110.6	-13.0	23.8	26.2
34062	Blois Centre		298	21.12	293	-89.8	3.9	67.3	19.7
34052	Déols		329	13.69	325	-97.1	2.2	54.8	23.9
34025	La Bruyère		333	25.62	328	-107.2	6.7	57.1	23.9
34024	Joue les Tours		339	18.79	334	-287.0	-41.6	18.8	43.5
34032	Leblanc		340	16.31	334	-188.2	-15.8	26.5	24.6
34011	Préfecture		342	25.54	337	-107.1	-4.5	43.9	23.8
34012	La Source		343	26.38	338	-384.6	11.1	72.1	45.1
34046	Dreux centre		349	15.63	344	-363.2	-41.3	32.9	47.3
34023	Jardin Botanique		350	25.39	345	-122.3	1.0	46.8	25.2
34014	St Jean		352	18.08	347	-283.1	-40.6	17.6	37.3
34061	Blois Nord		353	14.89	348	-210.6	-34.0	44.1	40.5
34041	Fulbert		356	17.1	351	-184.8	-29.0	40.3	34.1
34031	Gibjoncs		357	17.89	352	-119.6	4.8	66.8	28.8
34042	Luce		359	18.91	354	-297.7	-14.9	46.5	36.5
34051	Châteauroux Sud	359	13.91	354	-377.1	-39.2	46.4	55.5	
34013	Gambetta	trafic	358	40.39	353	11.0	43.0	68.2	11.4
34022	Mirabeau		354	46.21	349	-1.5	42.9	70.0	14.7

Tableau 5 : Stations fixes et principales statistiques de l'erreur relative calculée par validation croisée pour l'année 2005

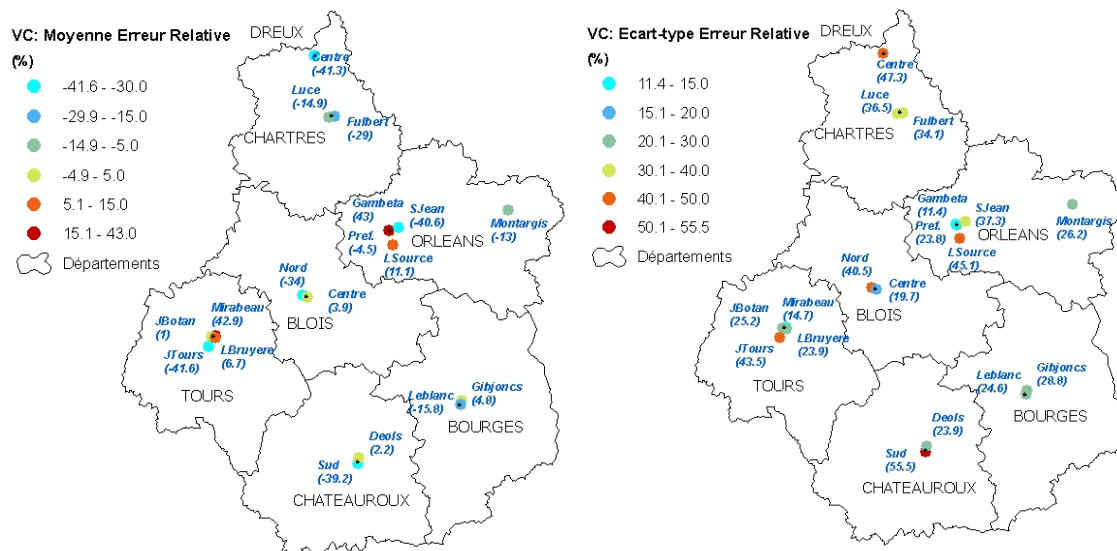


Figure 12 : Validation aux SF - Carte des statistiques de l'erreur relative, en moyenne sur l'année 2005

Pour plusieurs stations fixes situées au sud de la région Centre, et qui mesurent des concentrations plutôt faibles ou modérées (de 13 à 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle), l'erreur relative, en moyenne sur l'année, est comprise entre -7% et +7%. Il s'agit des stations Déols à Châteauroux, Gibjoncs à Bourges, Jardin Botanique et La Bruyère à Tours, Centre à Blois et Préfecture à Orléans.

Pour les autres stations urbaines, qui mesurent des concentrations relativement faibles (moyennes annuelles inférieures à 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), on observe une surestimation de plus de 13% en validation croisée³, avec des écarts - types d'erreur supérieurs à 26%. Il s'agit des stations Leblanc à Bourges, Saint Jean à Orléans, Joué-Lès-Tours à Tours, Luce et Fulbert à Chartres, Centre à Dreux, Sud à Châteauroux, Nord à Blois et la station de Montargis.

Pour les deux stations de trafic, le modèle sous-estime les concentrations d'environ 40% en moyenne. Finalement, les concentrations de la station La Source à Orléans ne sont sous-estimées que d'environ 11% en moyenne annuelle mais la variabilité journalière de l'erreur est très importante, (écart - type de 45.1%), ce qui confirme le caractère très particulier de cette station.

³ Il faut noter que l'erreur relative est calculée comme un pourcentage de la concentration mesurée au capteur. Lorsque cette concentration est faible, l'erreur relative a ainsi tendance à augmenter. Par exemple, une erreur de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ne représente que 12.5% d'erreur relative pour une station mesurant 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, alors que pour une station mesurant 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, elle s'élève à 25%.

5. BILAN ; VOIES D'AMELIORATION

Afin d'améliorer la précision des simulations des concentrations journalières de NO₂ dans PREV'Air, on cherche à exploiter les données d'observation disponibles. D'un point de vue temporel, l'information la plus riche est fournie par les stations fixes mais celles-ci sont en nombre limité (16 stations de fond dans la région Centre) et elles se situent le plus souvent en milieu urbain. D'un point de vue spatial, l'information la plus dense et la mieux répartie est fournie par les campagnes d'échantillonnage régionales mais celles-ci sont généralement temporaires et les données recueillies sont intégrées dans le temps (moyennes bihebdomadaires ou mensuelles).

Le travail réalisé montre l'intérêt d'utiliser toutes ces informations ainsi que des données de variables auxiliaires, pour les combiner au modèle CHIMERE. Dans cette étude exploratoire, il s'agissait d'examiner comment la méthodologie de cartographie automatique développée par le LCSQA à l'échelle urbaine pouvait être adaptée et si cette approche se révélait judicieuse pour répondre au problème posé.

La démarche suivie, élaborée avec des données de la région Centre, a été la suivante :

- proposition d'un modèle de correction, de la forme :
$$\text{NO2}_{\text{maille}} = \text{NO2}_{\text{CHIMERE}} + \text{Delta}$$
où Delta est estimé par krigeage, à l'aide des données d'observation et de variables auxiliaires
- analyse géostatistique des données de campagnes, des sorties CHIMERE (moyennes sur les campagnes) et des variables auxiliaires afin de déterminer les paramètres du modèle géostatistique ;
- création de stations virtuelles aux points d'échantillonnage, par corrélation avec les stations fixes, et reconstitution des données journalières en ces stations ;
- application du modèle de correction au pas journalier. Les données d'observation utilisées proviennent des stations fixes réelles et virtuelles.

Les premiers tests effectués sur la région Centre sont assez satisfaisants. Les estimations journalières de NO₂, réalisées à partir de CHIMERE, des mesures de stations fixes, des données de stations virtuelles et des variables auxiliaires, ont été comparées, en moyenne sur les périodes d'échantillonnage (i.e. les 12 mois de l'année 2005), aux estimations géostatistiques fondées uniquement sur les mesures par tubes et les variables auxiliaires. Ces deux séries d'estimations sont en bon accord. Cette comparaison a toutefois été effectuée pour l'année 2005, année qui a servi à construire les modèles de stations virtuelles et à choisir les paramètres de l'estimation géostatistique. De nouvelles campagnes de mesure à l'échelle régionale ont été réalisées par LIG'Air en 2007. Il sera particulièrement intéressant d'utiliser ce jeu de données comme jeu de validation indépendant en comparant en moyenne sur chaque mois :

- les données reconstituées aux stations virtuelles avec les données de tubes ;

- les estimations obtenues avec ces stations virtuelles et CHIMERE et les estimations obtenues avec les mesures de tubes.

Notons que des tests ont été aussi réalisés sur la région Alsace. Les résultats, dont l'analyse est en cours, se montrent également satisfaisants.

Comme il a été mentionné en 3.1, la mise en œuvre de la méthodologie repose sur deux approximations :

- l'une sur le plan temporel : les concentrations journalières des stations virtuelles sont reconstituées par des modèles de régression fondés sur des données mensuelles ou bihebdomadaires, et dont on ne peut, d'autre part, démontrer la représentativité dans toutes les situations ;
- l'autre sur le plan spatial : les moyennes par maille de CHIMERE sont affectées aux points d'échantillonnage (une interpolation aurait pu être également réalisée).

Pour que ces approximations restent acceptables et s'assurer au jour le jour que les conditions d'application sont réunies, des précautions et vérifications s'imposent, contrainte qui ne s'accorde pas nécessairement avec une automatisation de la méthode.

Aussi, une autre méthodologie suggérée par le Centre de Géostatistique pourra être explorée. Elle ne fera appel qu'à des données d'observation réelles et non à des données reconstituées. Il s'agira de réaliser un cokrigeage entre les données journalières de stations fixes et les mesures de tubes (issues d'une ou plusieurs périodes d'échantillonnage choisies selon la saison), en prenant CHIMERE comme dérive. Le problème à résoudre sera la définition d'un modèle de variogramme approprié.

Jusqu'à présent les simulations de NO₂ ont été corrigées localement sur deux régions particulières (Centre, Alsace). Un modèle géostatistique adapté à chacune a été développé. Or la finalité de l'étude est d'étendre la procédure de correction sur la France entière, en utilisant l'ensemble des campagnes d'échantillonnage régionales disponibles. Dans cette perspective, et si l'une ou l'autre des méthodologies évaluées est retenue, une réflexion s'impose sur le moyen de la généraliser à un plus grand domaine.

6. REFERENCES

Cárdenas G., Perdrix E., 2006. Méthode de surveillance des concentrations de NO₂ : cartographie automatique à partir de stations fixes et prise en compte de la proximité. Rapport LCSQA, www.lcsqa.org.

Cárdenas G., Perdrix E., 2005. Adaptation des méthodes géostatistiques à la cartographie automatique de NO₂. Rapport LCSQA, www.lcsqa.org.

Fouquet C. (de), 2008. Remarques sur la régression linéaire pour le calcul de concentrations journalières aux « stations virtuelles ». Rapport ARMINES R2008-025CFOU.

Malherbe L., Cárdenas G., 2006. Application des méthodes géostatistiques pour l'exploitation conjointe des mesures de fond et de proximité. Rapport LCSQA, www.lcsqa.org.

Perdrix E., Wroblewski A., Fourché B., Plaisance H., 2004. Cartographie des concentrations en dioxyde d'azote à partir des mesures en stations fixes. Rapport LCSQA, www.lcsqa.org.

Rouïl L., Malherbe L., 2003. Méthodes de représentation de la qualité de l'air – Guide d'utilisation des méthodes de la géostatistique linéaire. . Rapport LCSQA, www.lcsqa.org.