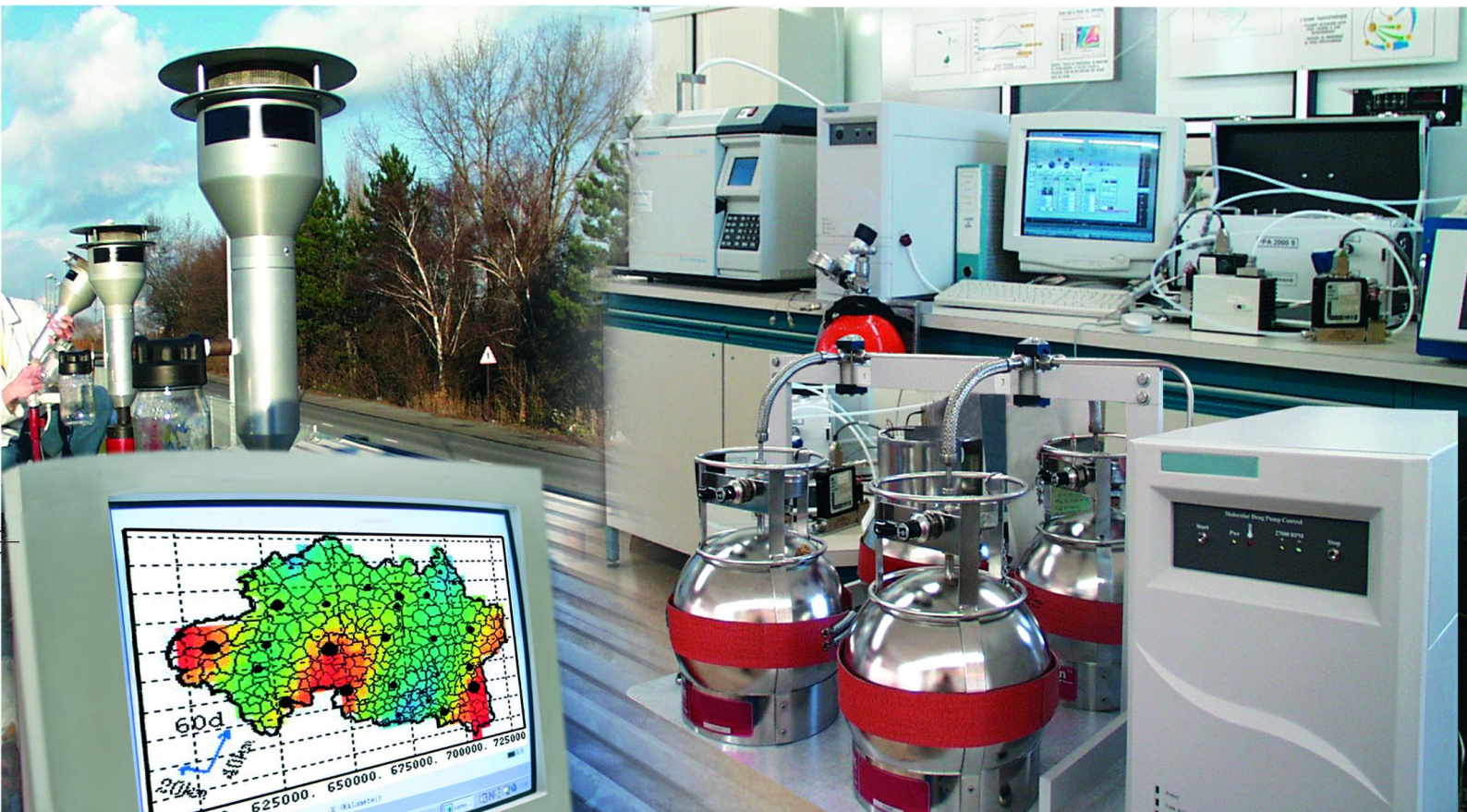




Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



Modélisation et Traitements Numériques

Travaux relatifs à la plate-forme nationale de modélisation
PREV'AIR : Cartographie locale journalière du dioxyde
d'azote à partir des simulations PREV'AIR (2/3)

Décembre 2008

Programme 2008

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'École 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 le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer 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 (2/3)

Laboratoire Central de Surveillance
de la Qualité de l'Air

Thème : Modélisation et Traitements Numériques

Programme financé par le
Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer
(MEEDDM)

2008

G CARDENAS, L. MALHERBE

Ce document comporte 57 pages (hors couverture et annexes)

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	G. CARDENAS, L. MALHERBE	B. BESSAGNET L. ROUIL	M. RAMEL
Qualité	Ingénieurs Direction des Risques Chroniques	Responsable Unité MOCA Responsable Pôle DECI Direction des Risques Chroniques	Responsable LCSQA/INERIS Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	7
REMERCIEMENTS	8
1. INTRODUCTION	9
2. RAPPEL DE LA METHODE PROPOSEE	10
3. APPLICATION A LA REGION ALSACE	15
3.1 Estimation des campagnes par tubes	15
3.2 Estimation journalière.....	22
3.2.1 Estimation des campagnes par tubes avec CHIMERE	22
3.2.1.1 Modèle CHIMERE et variable delta.....	22
3.2.1.2 Estimation de la variable delta.....	25
3.2.1.3 Estimation du NO ₂	28
3.2.2 Application de la méthode de cartographie journalière automatique de NO ₂	30
3.2.2.1 Corrélation tubes - stations.....	30
3.2.2.2 Cartographie Journalière	30
3.3 Evaluation du modèle.....	33
3.3.1 Comparaison avec les estimations réalisées à partir de tubes à diffusion	33
3.3.2 Analyse de l'écart aux stations fixes : moyennes journalières mesurées - estimations par le modèle propose.....	37
4. CARTOGRAPHIE LOCALE DU DIOXYDE D'AZOTE A PARTIR DES SIMULATIONS PREV'AIR : VALIDATION REGION CENTRE (DONNEES 2007)	42
4.1 Estimation des campagnes par tubes	42
4.2 Estimation journalière.....	45
4.3 Evaluation du modèle.....	47
4.3.1.1 Comparaison des mesures reconstituées aux stations virtuelles avec les mesures réalisées à partir de tubes à diffusion.....	47
4.3.1.2 Comparaison avec les estimations réalisées à partir de tubes à diffusion.....	50
5. CONCLUSIONS	54
6. REFERENCES	56
7. LISTE DES ANNEXES	57

RESUME

En 2007 le LCSQA a développé une méthodologie sur la région Centre afin d'améliorer les estimations journalières de concentrations de NO₂ issues du modèle CHIMERE à l'aide de données de stations fixes, de données de campagnes et de variables auxiliaires. Elle repose sur l'exploitation des relations entre stations fixes et sites d'échantillonnage afin de définir des stations virtuelles, et sur l'utilisation des techniques de la géostatistique multi variable. La correction consiste à ajouter à la valeur simulée par CHIMERE un terme correctif calculé par krigeage à partir des données de stations fixes et virtuelles et des variables auxiliaires.

En 2008, la méthodologie a été adaptée à une nouvelle zone d'étude, l'Alsace, et a été testée sur un jeu de données indépendant collecté ultérieurement dans la région Centre.

La précision des résultats est liée à celle des données des stations virtuelles. En particulier, il est important que les modèles de stations virtuelles s'appuient sur un historique d'échantillonnage suffisamment long pour couvrir correctement la gamme possible des concentrations journalières. Elle est aussi fonction des variables auxiliaires qu'il convient de sélectionner avec soin.

Si la précision journalière espérée des estimations n'a pu être réalisée, la démarche proposée se révèle adaptée à la réalisation de bilans régionaux mensuels, saisonniers ou annuels dans les zones où l'on dispose de données de campagnes. En revanche une automatisation de la méthode sur toute la France n'est pas envisageable actuellement : elle exigerait des données de campagnes sur l'ensemble des régions françaises ; en outre, les différences entre le Centre et l'Alsace indiquent que la relation entre le NO₂ et les variables auxiliaires nécessite d'être ajustée selon le domaine géographique.

REMERCIEMENTS

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

1. INTRODUCTION

Cette étude constitue la seconde partie des travaux initiés en 2007 relatifs à l'amélioration des estimations journalières des concentrations de dioxyde d'azote calculées par le modèle CHIMERE. Les modèles de qualité de l'air reproduisent difficilement les concentrations en polluants primaires comme le NO₂.

Dans la première partie de l'étude une méthode a été proposée et testée pour les estimations journalières de l'année 2005 dans la région Centre, celle-ci peut se résumer ainsi :

- 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 validations effectuées dans la première phase de l'étude pour la région Centre avaient été assez satisfaisantes. Cependant celles-ci ont été réalisées sur des estimations menées dans la même année que celle qui a servi à sélectionner les paramètres du modèle (stations virtuelles, modèle de variogramme, méthode d'estimation géostatistique, etc.). Or, des nouvelles campagnes de mesure à l'échelle régionale ont été réalisées par LIG'Air en 2007, ce qui a donné la possibilité d'effectuer une seconde validation de la méthode sur un jeu de données indépendant de celui qui a permis à la construire.

L'objectif de ce rapport est de présenter les résultats de cette validation et d'exposer un second cas d'étude réalisé sur la région Alsace.

L'étude se scinde en trois parties :

- La première rappelle les principes de la méthodologie proposée.
- La seconde correspond à l'application pratique de cette approche dans la région Alsace.
- La troisième présente les résultats de la validation en région Centre avec les données de l'année 2007, indépendantes du jeu utilisé pour la mise au point.

Le dernier chapitre récapitule les principales conclusions tirées des études de cas et précise le champ d'application et les limites de la méthodologie proposée pour améliorer l'estimation journalière du dioxyde d'azote du modèle CHIMERE.

2. RAPPEL DE LA METHODE PROPOSEE

Les principales caractéristiques de la méthodologie sont résumées par la suite, pour une description plus détaillée, le lecteur peut consulter la référence Cardenas, 2007.

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

$$NO_2^{Jour} = Chimere_{NO_2}^{Jour} + Delta_{NO_2}^{Jour}$$

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

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

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

$$NO_2^{Jour}_{tubes} = Chimere^{Jour}_{tubes} + Delta^{Jour}_{tubes}$$
$$\Rightarrow$$
$$Delta^{Jour}_{tubes} = NO_2^{Jour}_{tubes} - Chimere^{Jour}_{tubes}$$

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. Les méthodes géostatistiques pouvant être utilisées sont le krigeage des résidus, le krigeage en dérive externe ou le cokrigeage.

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

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.

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.

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 typologie différente.

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.

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

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

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

SV : Station virtuelle

SFref : Station fixe de référence

SF : Station Fixe

TP : Tube passif

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

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{tubes}}^{\text{Jour}} &= \text{NO}_2^{\text{Jour}}_{\text{tubes}} - \text{Chimere}^{\text{Jour}}_{\text{tubes}} \\ \Rightarrow \\ \Delta_{\text{SV}}^{\text{Jour}} &= \text{NO}_2^{\text{Jour}}_{\text{SV}} - \text{Chimere migré}^{\text{Jour}}_{\text{SV}} \\ \text{avec: } \text{NO}_2^{\text{Jour}}_{\text{SV}} &= \alpha_{CT} * \text{NO}_2^{\text{SFréf}}_{\text{Jour}} + \beta_{CT} \end{aligned}$$

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.

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 (τ).	$\overline{\text{Chimere}}^{\tau}_{\text{maille}}$ 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.	$\overline{\text{Chimere}}^{\tau}_{\text{tubes}}$
3	Calcul de la variable Delta aux tubes : $\overline{\text{Delta}}^{\tau}_{\text{tubes}} = \overline{\text{NO}_2}^{\tau}_{\text{tubes}} - \overline{\text{Chimere}}^{\tau}_{\text{tubes}}$	$\overline{\text{Delta}}^{\tau}_{\text{tubes}}$
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) : $\text{Delta} = \text{Résidu} + \text{Dérive}$ avec : $\text{Dérive} = \mu * (F. \text{Aux.}) + \beta$	$\overline{\text{Résidu}}^{\tau}_{\text{tubes}} = \overline{\text{Delta}}^{\tau}_{\text{tubes}} - \overline{\text{Dérive}}^{\tau}_{\text{tubes}}$
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.	$\overline{\text{Delta}}^{\tau}_{\text{maille}}$ et $\sigma^{\text{Krigeage Delta}}$
10	Calcul du NO_2 sur les mailles CHIMERE : $\overline{\text{NO}_2}^{\tau}_{\text{maille}} = \overline{\text{Delta}}^{\tau}_{\text{maille}} + \overline{\text{Chimere}}^{\tau}_{\text{maille}}$	$\overline{\text{NO}_2}^{\tau}_{\text{maille}}$ 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 $(NO_2^{journal})_{tubes}$
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.	$(Chimere^{journal})_{tubes}$
3	Calcul de la variable Delta aux tubes : $(Delta^{journal})_{tubes} = (NO_2^{journal})_{tubes} - (Chimere^{journal})_{tubes}$	$(Delta^{journal})_{tubes}$
4	Estimation de la variable Delta sur les mailles CHIMERE en appliquant le modèle géostatistique prédéfini (Tableau 1)	$(Delta^{journal})_{maille}^*$
5	Estimation finale de la concentration journalière de NO ₂ : $(NO_2^{journal})_{maille}^* = (Delta^{journal})_{maille}^* + (Chimere^{\tau})_{maille}$	$(NO_2^{journal})_{maille}^*$

Tableau 2 : Etapes de la cartographie journalière

3. APPLICATION A LA REGION ALSACE

3.1 ESTIMATION DES CAMPAGNES PAR TUBES

On dispose, d'une part, de mesures de NO₂ en µg/m³ provenant de 8 campagnes réalisées pendant l'année 2004 sur 60 points repartis sur toute la région Alsace. Les tubes à diffusion ont été exposés 15 jours consécutifs durant quatre périodes en hiver et quatre en été (cf. Figure 1 et Tableau 3).

D'autre part, on compte en 2004, 24 stations fixes de mesure du NO₂, dont 8 sont de typologie urbaine, 3 de type périurbain, 3 de proximité trafic, 5 de type industriel, 4 de type rural et 1 camion laboratoire (cf. Figure 2).

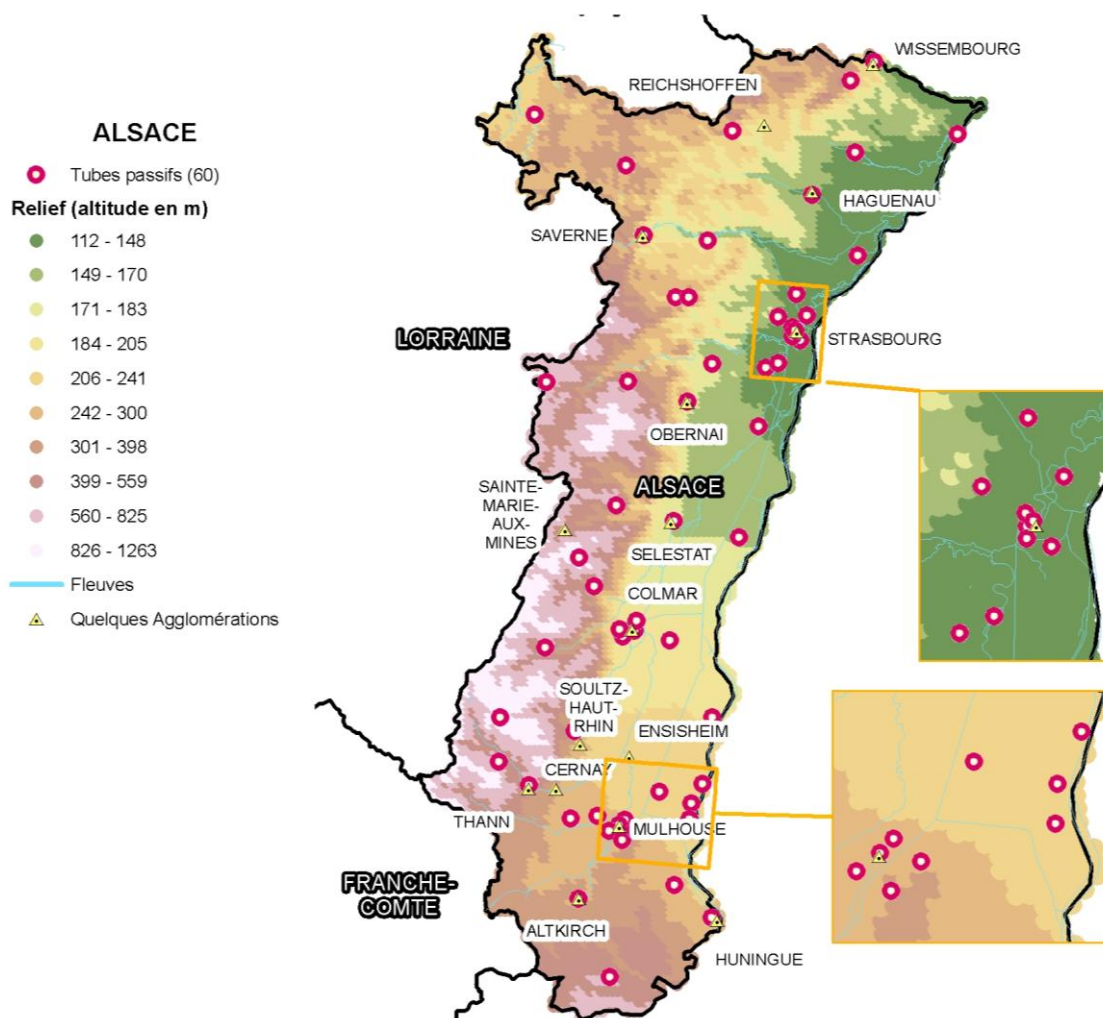


Figure 1 : ALSACE - Localisation tubes NO₂ (campagne régionale 2004)

Dates Campagne :	20 janv. - 3 fév.	3 - 17 fév.	17 fév. - 2 mars	2 - 16 mars	Moy. Hiver 2004	11 - 25 mai	25 mai - 8 juin	8 - 22 juin	22 juin - 6 juill.	Moy. Été 2004	Moy. 8 camp.
Nb Tubes	60	60	60	60	60	60	58	60	60	60	60
Minimum [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	5	6	7	5	5,8	3	2	1	1	1,8	4
Moyenne [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	30,4	32	29,1	32,9	31,1	19,1	18,8	16,4	14,7	17,3	21,9
Maximum [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	61	64	60	73	64,5	63	62	60	52	59,2	56
Ecart-type [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	11,9	12,6	11,7	14	12,4	11,9	12,8	10,8	10,2	11,2	10,7

Tableau 3 : ALSACE - Statistiques des 8 campagnes régionales de NO_2 en 2004

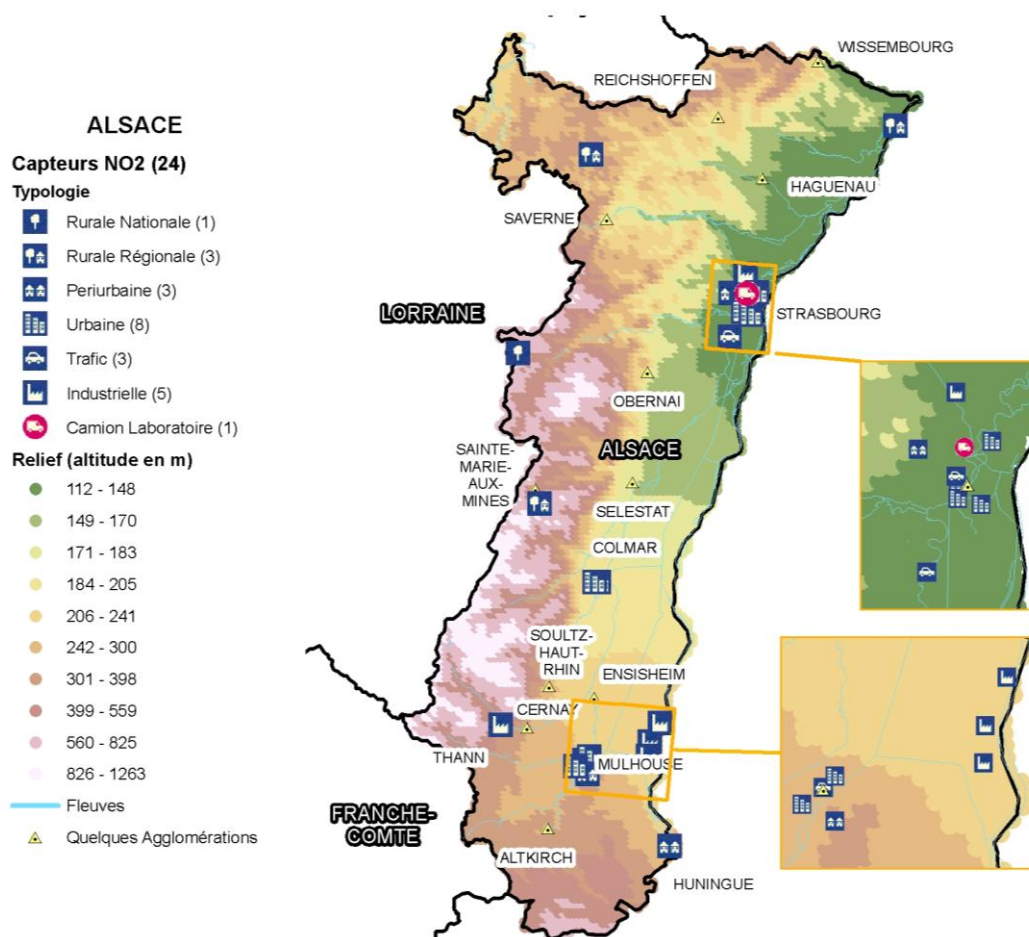


Figure 2 : ALSACE - Localisation capteurs NO_2

Par ailleurs, trois informations additionnelles sont aussi disponibles à une résolution kilométrique, à savoir, la densité d'émission en $\text{kg}/\text{km}^2/\text{an}$ (cf. Figure 3), la densité de population en Nb d'habitants par km^2 (cf. Figure 4) et l'altitude en mètres (cf. Figure 1 et Figure 2).

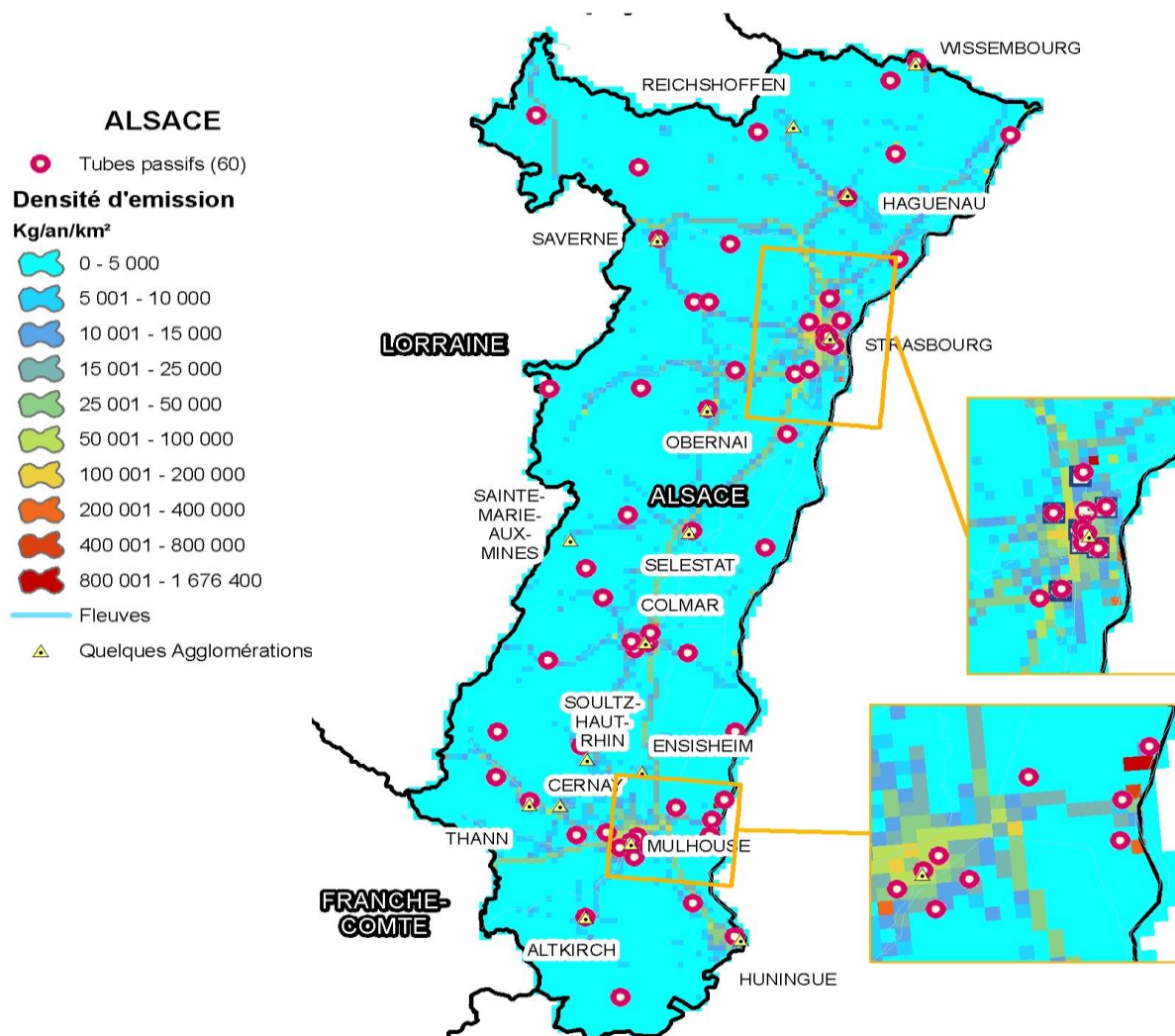


Figure 3 : ALSACE - Cartes des variables auxiliaires : Densité d'émission

A partir de ces informations, trois variables auxiliaires ont été créées par SIG aux endroits où sont localisés les tubes passifs et les stations fixes, ainsi que dans les nœuds de la maille d'estimation finale¹: la densité d'émission en $\text{Kg}/\text{Km}^2/\text{an}$ dans un rayon de 2 km, la densité de population en hab/km^2 dans un rayon de 2Km et l'altitude en mètres estimée par krigeage ordinaire.

¹ Pour cette étude la maille choisie est d'environ 10 Km de côté, qui correspond à la résolution actuelle de la plateforme PREVAIR domaine France.

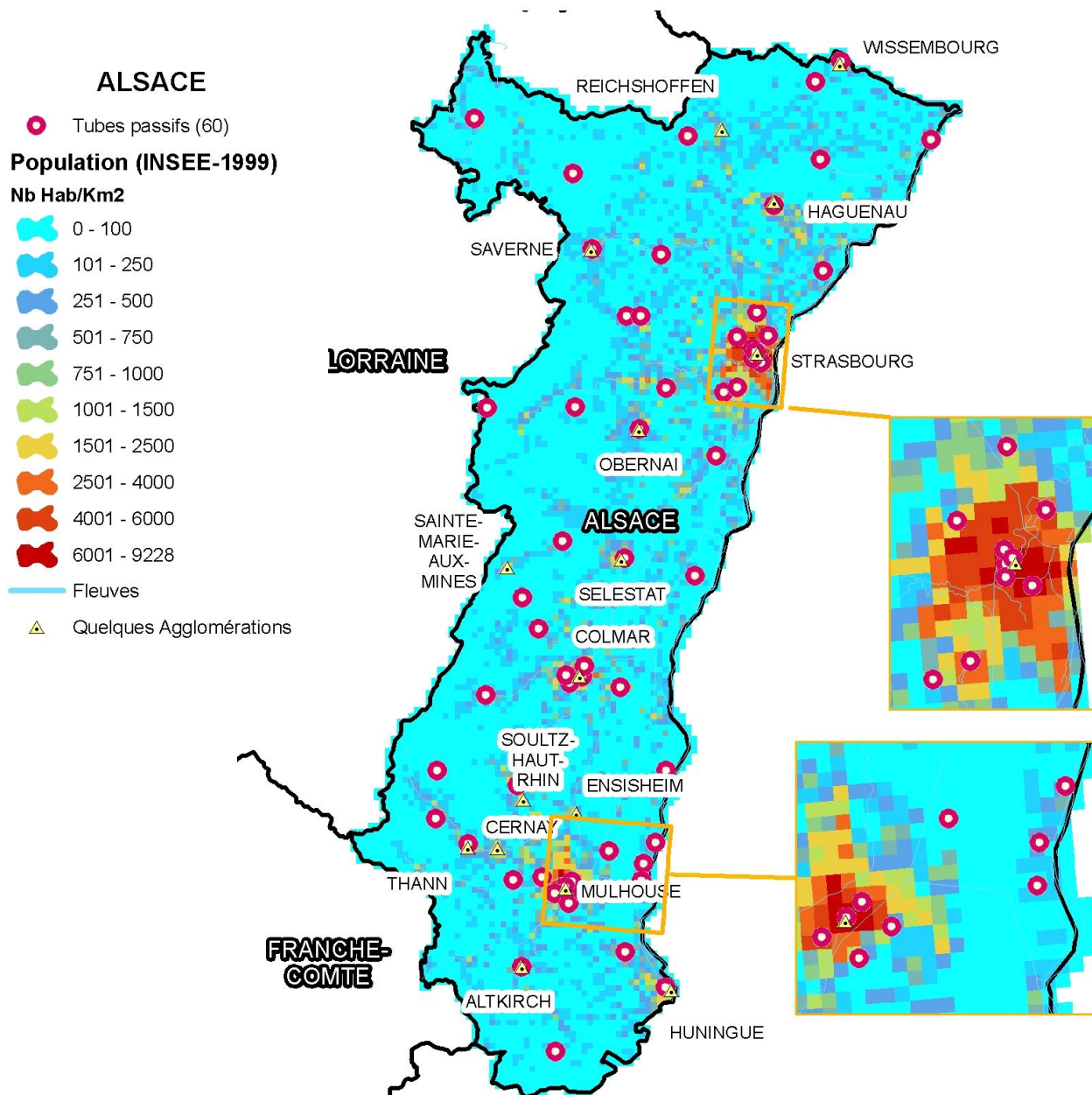


Figure 4 : ALSACE - Cartes des variables auxiliaires : Densité de population

Finalement pour l'étude des corrélations entre ces trois variables finales et les concentrations mesurées aux tubes passifs, il a été décidé d'effectuer une transformation logarithme aux densités d'émissions et de population : logarithme naturel translaté [$\ln(\text{Var Aux}+1)$].

Le modèle ci-joint a été utilisé pour fusionner les trois variables auxiliaires dans une seule variable corrélée aux concentrations de NO₂.

$$\text{Variable Auxiliaire} = A + [B * (\text{Densité d'émission})] + [C * (\text{MNT})] + [D * (\text{Densité de population})]$$

Les coefficients A, B, C et D sont calculés par régression linéaire multiple entre les concentrations de chaque campagne et les trois variables auxiliaires.

Le Tableau 4 montre les coefficients obtenus pour chaque campagne et la Figure 5 montre les nuages de corrélation entre les concentrations mesurées dans chaque campagne et les variables auxiliaires finales ainsi obtenues.

Coefficients	20 janv. - 3 fév.	3 - 17 fév.	17 fév. - 2 mars	2 - 16 mars	11 - 25 mai	25 mai - 8 juin	8 - 22 juin	22 juin - 6 juill.
A	52	61.9	35.2	59.4	22.3	18.2	21.8	19.2
B (Densité d'émission)	3.3	3	2.7	2.5	2.8	3.1	2.5	3
C (MNT)	-10.8	-12.1	-8.2	-12.1	-7	-6.9	-6.8	-6.4
D (Densité de population)	1.1	1.5	2.3	2.7	1.5	1.6	1.4	0.5

Tableau 4 : ALSACE - Coefficients des équations des régressions entre le NO₂ et la variable auxiliaire

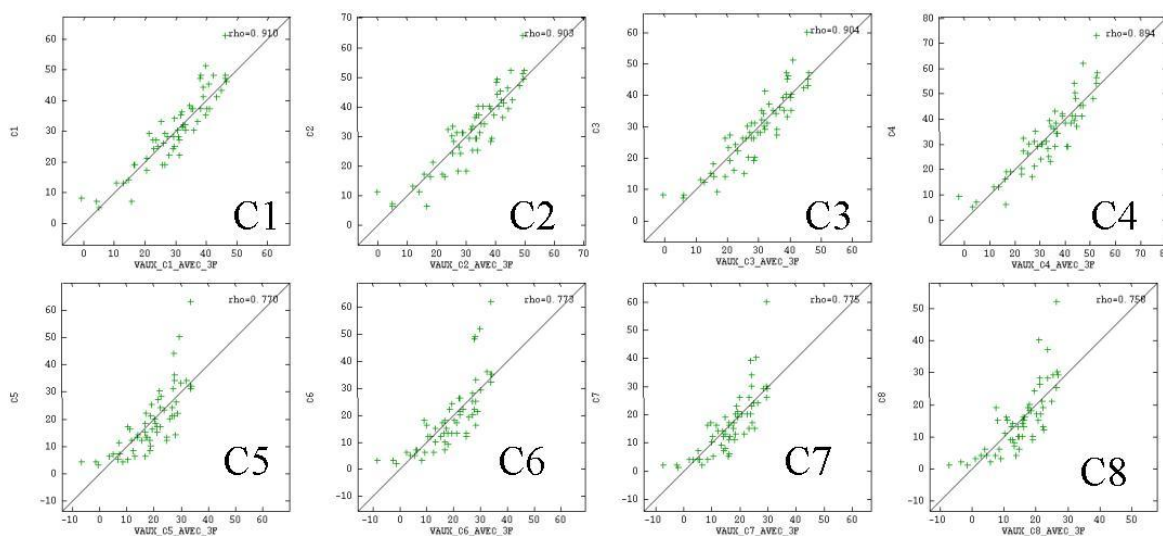


Figure 5 : ALSACE - Nuage de corrélation entre les concentrations et la covariable obtenue

La Figure 6 montre les cartes des variables auxiliaires agrégées finalement pour chaque campagne, elles seront utilisées lors des estimations des campagnes NO₂.

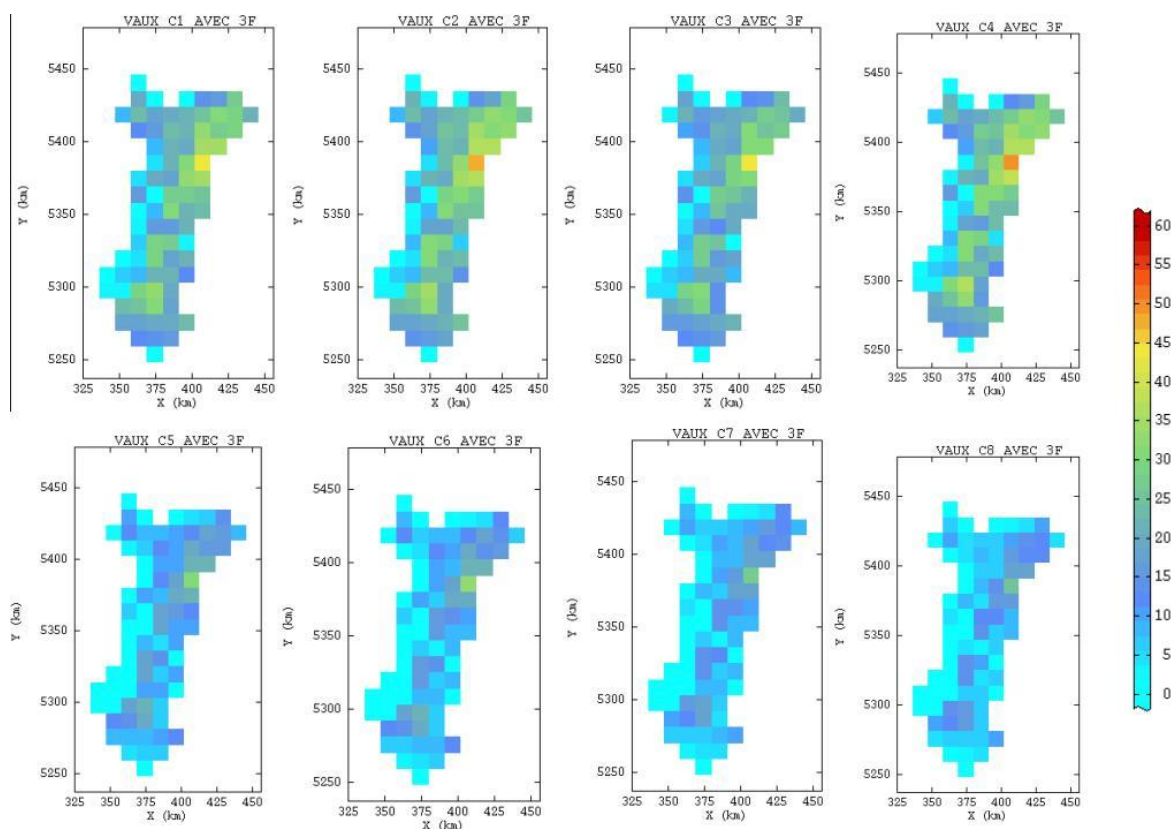


Figure 6 : ALSACE - Variables auxiliaires par campagne, obtenues par régression linéaire multiple

Une cartographie des campagnes de mesure de NO₂ par tubes a été établie par cokrigage colocalisé entre les concentrations et la variable auxiliaire. Le modèle de variogramme est une structure croisée composée d'un effet de pépite et d'un modèle sphérique de portée 40 km, les paliers respectifs ont été ajustés automatiquement pour chaque campagne à l'aide du logiciel Isatis². On rappelle que la maille d'estimation est celle du modèle CHIMERE (environ 10 km de côté).

La Figure 7 et le Tableau 5 montrent les statistiques et les cartes des estimations obtenues par campagne. La Figure 8 est la carte de la moyenne des estimations des 8 campagnes.

² L'ajustement du modèle s'effectue dans le cadre d'un **modèle linéaire de corégionalisation**, celui-ci consiste à ajuster les différents variogrammes par une combinaison linéaire des mêmes structures de base (dans notre cas par un effet de pépite et une structure sphérique).

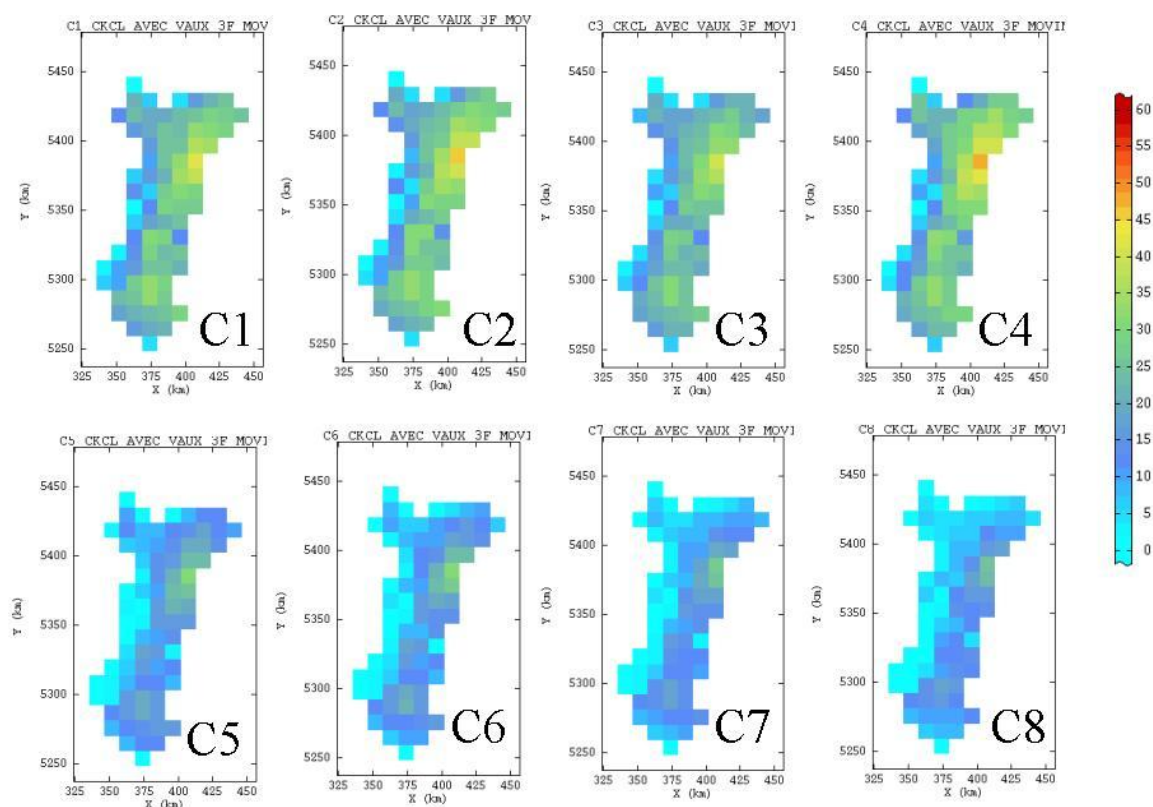


Figure 7 : ALSACE - Estimation des concentrations de NO_2 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour les huit campagnes de mesure

Dates Campagne:	20 janv. - 3 fév.	3 - 17 fév.	17 fév. - 2 mars	2 - 16 mars	Moy. Hiver 2004	11 - 25 mai	25 mai - 8 juin	8 - 22 juin	22 juin - 6 juill.	Moy. Eté 2004	Moy. 8 camp.
Nb de mailles	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Minimum [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	3.7	3.2	4.2	4.6	4	0	0	0	0	0	0.4
Moyenne [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	22.8	23.6	21.5	24.8	23.2	12.3	11.4	10	8.8	10.6	16.9
Maximum [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	42.9	45.2	40.5	47.2	44	30.4	31.5	27.2	25	28.5	36.2
Ecart-type [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	8.3	9.4	7.6	9.4	8.6	6.9	6.9	6.2	5.8	6.3	7.4

Tableau 5 : ALSACE - Statistiques des estimations des huit campagnes de mesure de NO_2

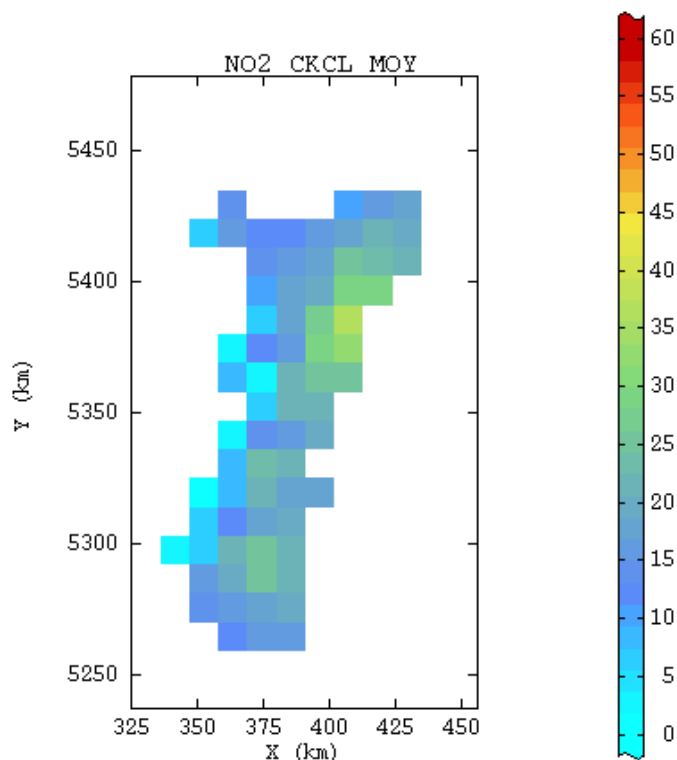


Figure 8 : ALSACE - Moyenne des estimations du NO₂ réalisées pour les huit campagnes de mesure

3.2 ESTIMATION JOURNALIERE

La méthode consiste à appliquer la procédure expliquée dans le chapitre précédent (cf. § 2) pour estimer les concentrations journalières de NO₂ en 2004.

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 (cf. Tableau 1).

3.2.1 ESTIMATION DES CAMPAGNES PAR TUBES AVEC CHIMERE

3.2.1.1 MODELE CHIMERE ET VARIABLE DELTA

La Figure 9 et le Tableau 6 montrent les statistiques et les cartes de la moyenne du modèle CHIMERE pour les mêmes périodes de campagnes de mesures du NO₂ par tubes passifs en 2004 dans la région Alsace, la Figure 10 représente la carte de la moyenne du modèle CHIMERE pour ces périodes.

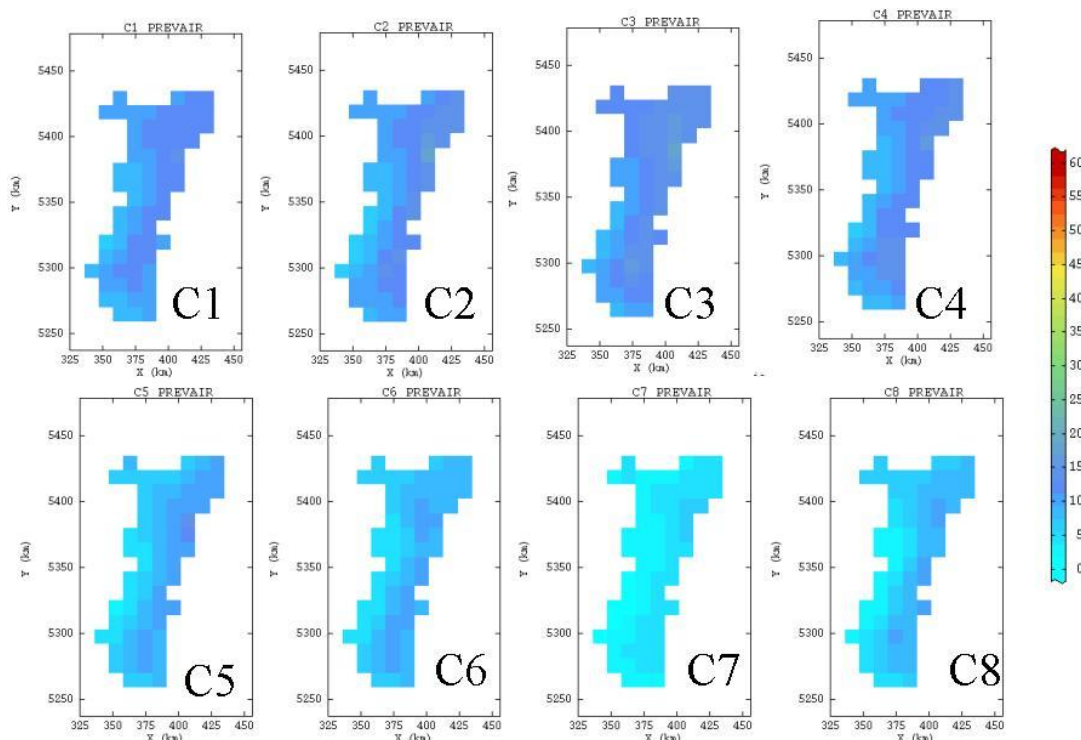


Figure 9 : ALSACE - Moyenne du modèle CHIMERE pour les huit périodes des campagnes de mesure du NO₂

Dates Campagne:	20 janv. - 3 fév.	3 - 17 fév.	17 fév. - 2 mars	2 - 16 mars	Moy. Hiver 2004	11 - 25 mai	25 mai - 8 juin	8 - 22 juin	22 juin - 6 juill.	Moy. Été 2004	Moy. 8 camp.
Nb de mailles	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Minimum [µg/m ³]	7.4	6.6	7.7	7.2	7.2	3.6	3.8	1.4	2.5	2.8	5
Moyenne [µg/m ³]	10.8	11.3	12.6	11.2	11.5	8.1	7.7	3.7	6.8	6.6	9
Maximum [µg/m ³]	14.8	17.2	18.1	15.6	16.5	13.2	10.9	7.1	11.2	10.6	13.5
Ecart-type [µg/m ³]	1.5	2.2	2.1	1.9	1.9	2.1	1.8	1.3	2.2	1.8	1.8

Tableau 6 : ALSACE - Statistiques du modèle CHIMERE pour les mêmes périodes des campagnes de mesure du NO₂

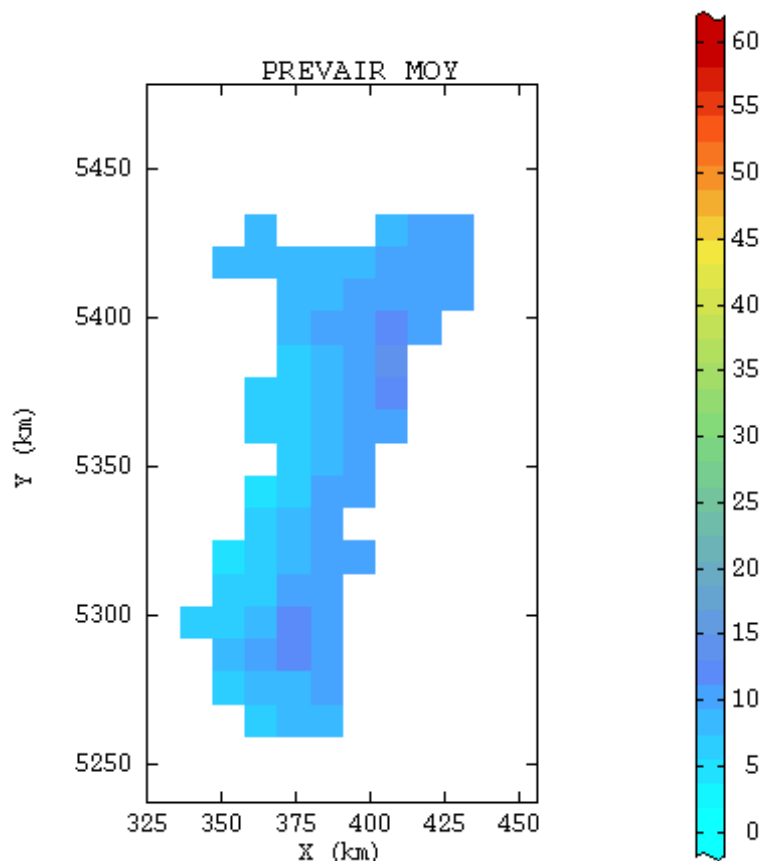


Figure 10 : ALSACE - Moyenne du modèle CHIMERE pour la période correspondante aux huit campagnes de mesure de NO₂

Pour chaque campagne la variable Delta est calculée aux tubes (cf. Tableau 7), à partir des mesures NO₂ et de la moyenne du modèle CHIMERE (obtenue par interpolation aux tubes avec une méthode déterministe³ à partir de la maille CHIMERE) : Delta=NO₂-CHIMERE.

Dates Campagne:	20 janv. - 3 fév.	3 - 17 fév.	17 fév. - 2 mars	2 - 16 mars	Moy. Hiver 2004	11 - 25 mai	25 mai - 8 juin	8 - 22 juin	22 juin - 6 juill.	Moy. Été 2004	Moy. 8 camp.
Nb de mailles	60	60	60	60	60	60	58	60	60	58	58
Minimum [µg/m3]	-3.5	-2.8	-2.1	-3.4	-2.5	-2.3	-2.6	-0.6	-3.5	-1.8	-2.1
Moyenne [µg/m3]	18.9	19.7	15.5	20.7	18.7	10	10.3	12.1	7.1	9.8	14.2
Maximum [µg/m3]	46.2	46.8	41.9	57.4	48.1	49.8	51.1	52.9	40.8	48.7	48.4
Ecart-type [µg/m3]	10.8	10.8	10.1	12.6	10.9	10.4	11.7	10	8.9	10.2	10.4

Tableau 7 : ALSACE - Statistiques de la variable DELTA

³ Dans ce cas, parmi les méthodes proposées par Isatis, la méthode « Spline Model Kriging » (Krigage avec un Spline comme modèle de covariance) a été choisie.

3.2.1.2 ESTIMATION DE LA VARIABLE DELTA

La variable Delta est estimée par la méthode du cokrigage colocalisé avec comme covariable une fonction créée par régression linéaire multiple entre la variable Delta et les trois variables auxiliaires, la Figure 11 montre les nuages de corrélation entre les variables Delta et la covariable ainsi obtenue.

La Figure 12 affiche les cartes obtenues en appliquant chaque régression sur la maille d'estimation.

Le modèle de variogramme choisi présente les mêmes caractéristiques que celui ajusté pour l'estimation directe de concentrations, il s'agit donc d'une structure croisée composée d'un effet de pépite et d'un modèle sphérique de portée 40 km, où les paliers respectifs sont ajustés automatiquement pour chaque campagne à l'aide du logiciel Isatis⁴.

Le Tableau 8 et la Figure 13 montrent les statistiques et les cartes des estimations de la variable Delta obtenues par campagne.

⁴ Dans le cadre du « Modèle linéaire de corégionalisation ».

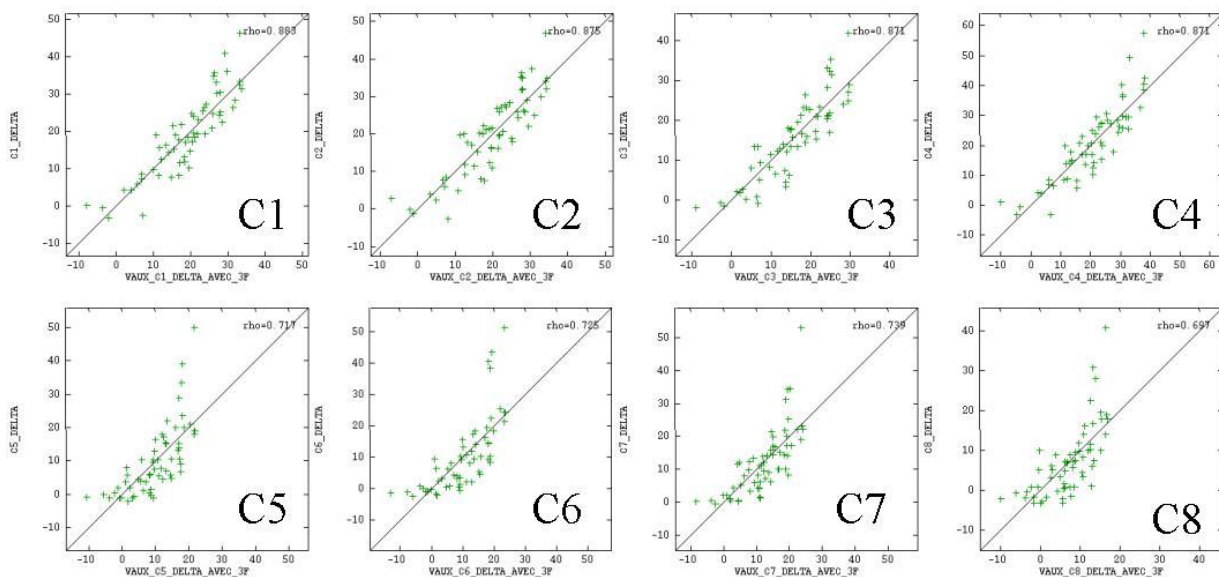


Figure 11 : ALSACE - Nuage de corrélation entre la variable Delta et la variable obtenue par régression linéaire multiple

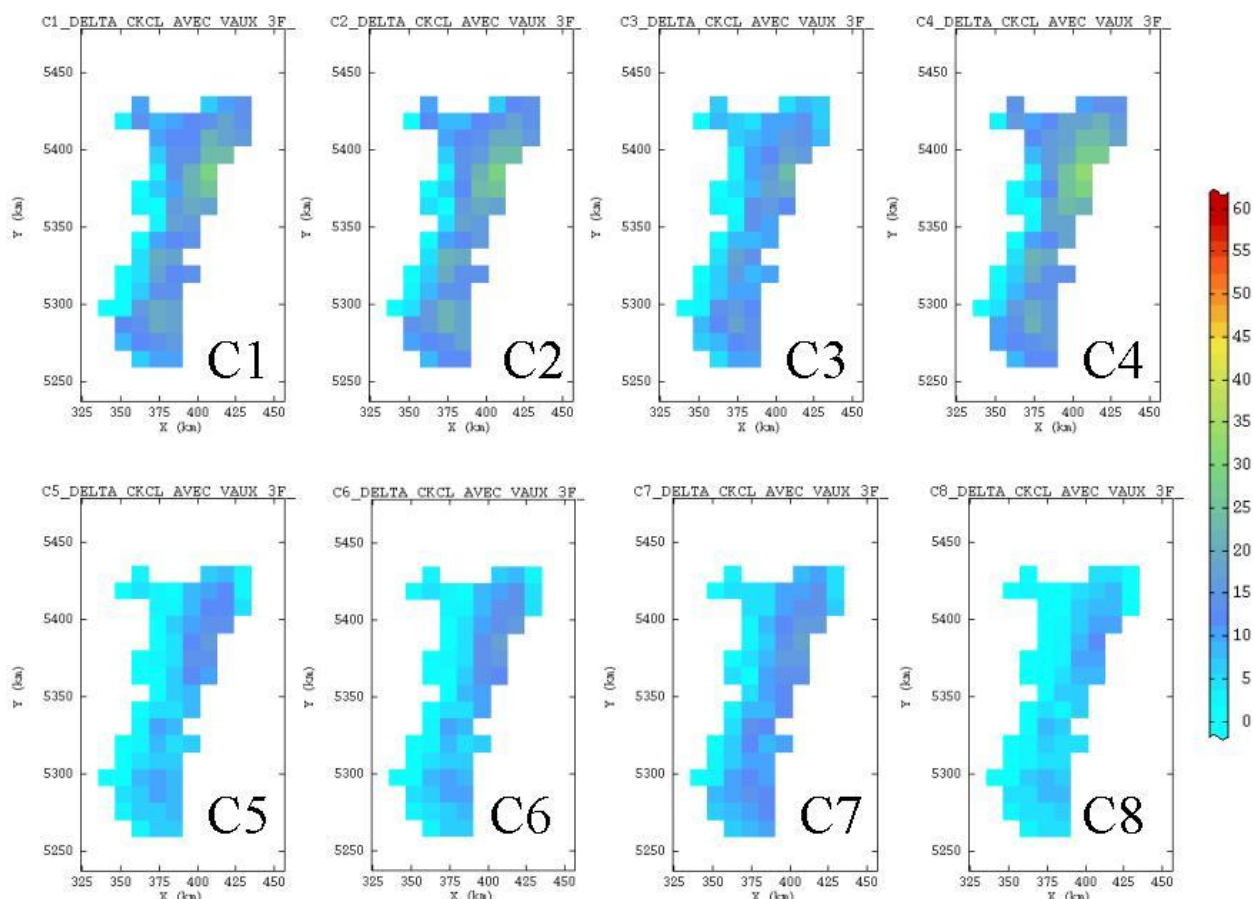


Figure 12 : ALSACE - Variable obtenue par régression linéaire multiple entre la variable Delta et les 3 variables auxiliaires

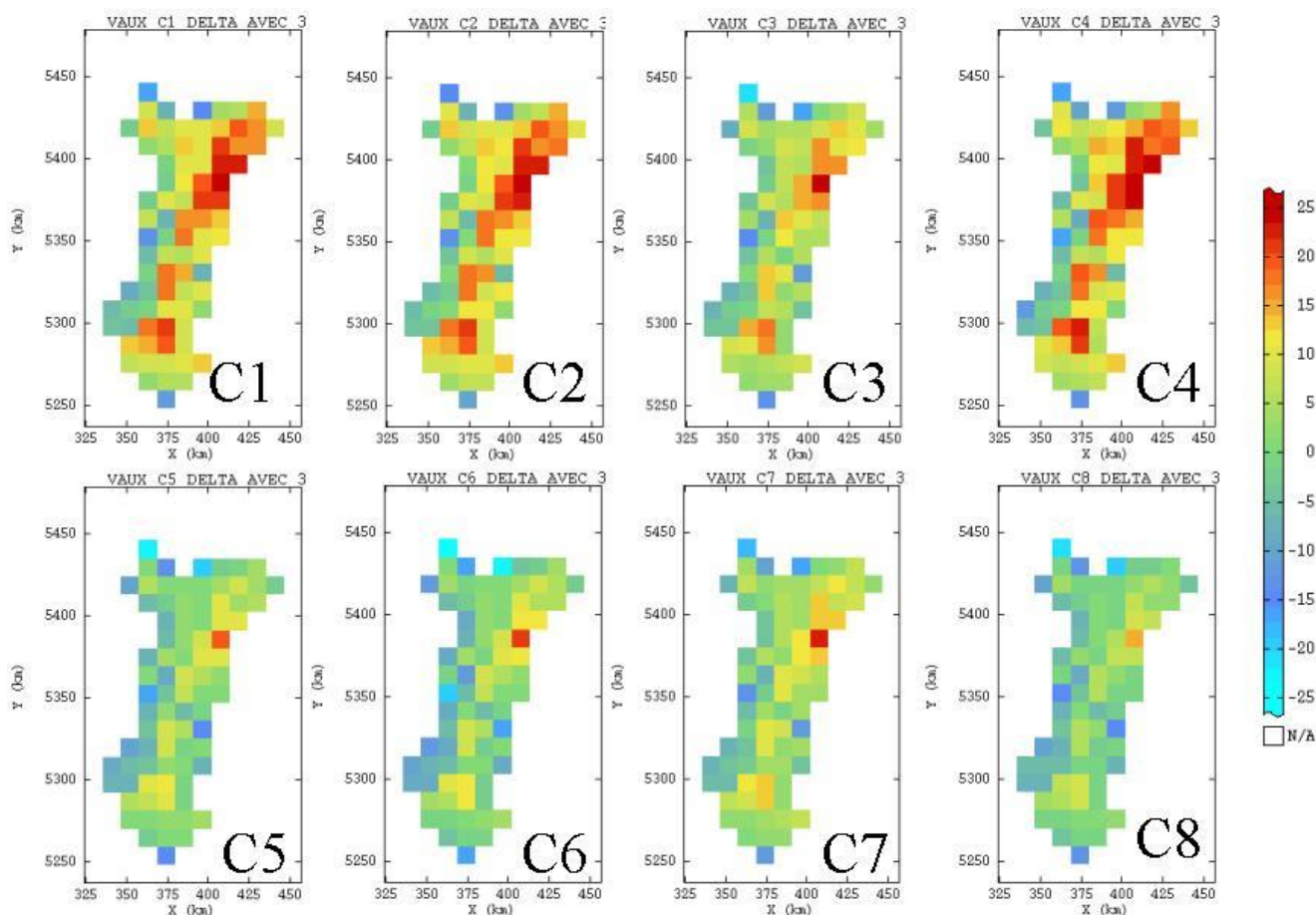


Figure 13 : ALSACE - Estimations de la variable Delta

Dates Campagne:	20 janv. - 3 fév.	3 - 17 fév.	17 fév. - 2 mars	2 - 16 mars	Moy. Hiver 2004	11 - 25 mai	25 mai - 8 juin	8 - 22 juin	22 juin - 6 juill.	Moy. Été 2004	Moy. 8 camp.
Nb de mailles	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Minimum [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-4.6	-4.1	-4.9	-3.4	-3.8	-4.1	-5.4	-2.9	-5.8	-4.4	-3.5
Moyenne [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	12.1	12.8	9.3	13.8	12	5.9	6.1	8.5	4.1	6.2	9.1
Maximum [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	29	29.7	24	33.1	29	16.6	18.1	18.2	11.9	16.2	22.6
Ecart-type [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	7.1	7.1	5.8	7.9	7	4.6	5.2	4.5	3.7	4.5	5.6

Tableau 8 : ALSACE - Statistiques des estimations de la variable DELTA

3.2.1.3 ESTIMATION DU NO₂

Finalement les estimations des niveaux de pollution de NO₂ sont obtenues en rajoutant aux concentrations du modèle CHIMERE les estimations de la variable Delta (cf. Figure 14).

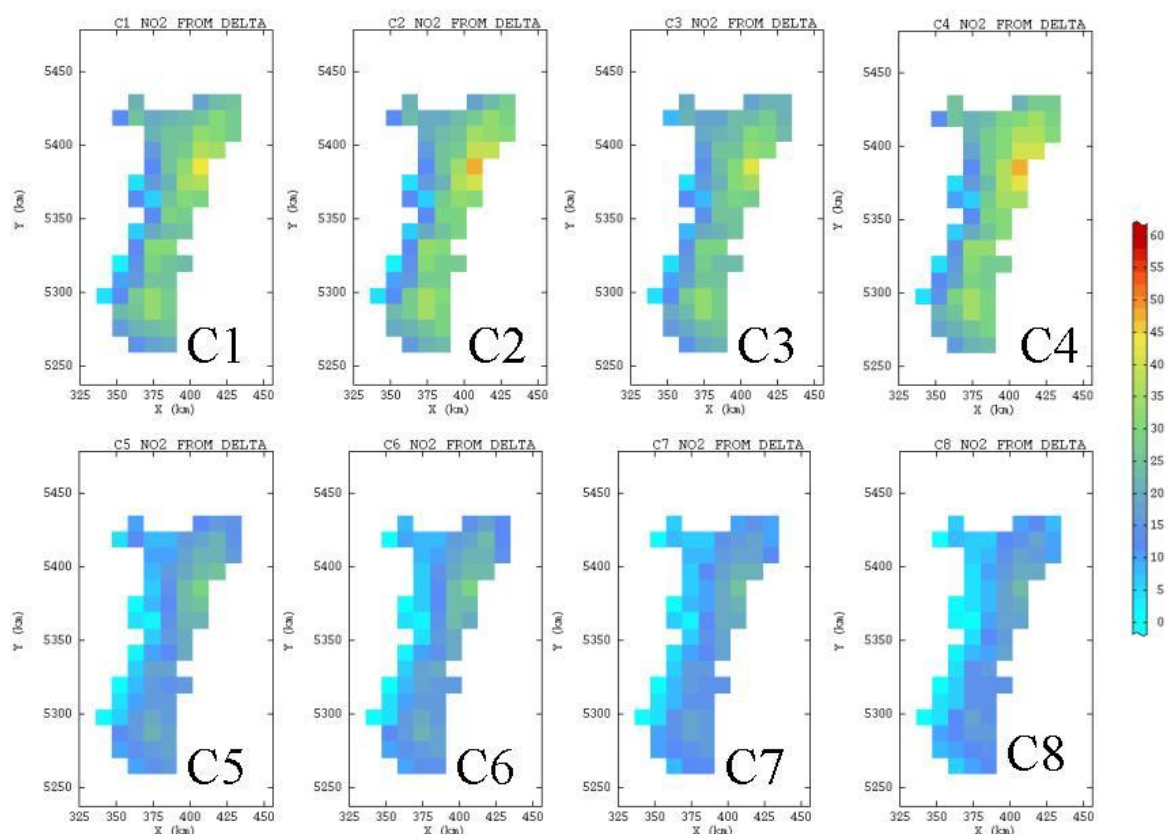


Figure 14 : ALSACE - Résultat final du modèle proposé pour l'estimation du NO₂ (Delta + CHIMERE)

Dates Campagne:	20 janv. - 3 fév.	3 - 17 fév.	17 fév. - 2 mars	2 - 16 mars	Moy. Hiver 2004	11 - 25 mai	25 mai - 8 juin	8 - 22 juin	22 juin - 6 juill.	Moy. Été 2004	Moy. 8 camp.
Nb de mailles	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Minimum [µg/m ³]	2.7	3.3	4.0	3.8	3.5	0	0	0.3	0	0	1.6
Moyenne [µg/m ³]	22.9	24.1	21.8	25.0	23.5	14.1	13.8	12.2	10.9	12.7	18.1
Maximum [µg/m ³]	43.8	46.9	42.1	48.7	45.4	29.8	29	25.2	23.1	26.8	36.1
Ecart-type [µg/m ³]	8.4	9	7.4	9.4	8.5	6.4	6.7	5.5	5.5	6	7.2

Tableau 9 : ALSACE - Statistiques des estimations de NO₂ (Delta + CHIMERE)

La Figure 15 représente la moyenne des 8 estimations du NO₂ effectuées avec le modèle proposé et la Figure 16 le nuage de corrélation entre celle-ci et la moyenne des estimations directes des concentrations de NO₂ pour les 8 campagnes.

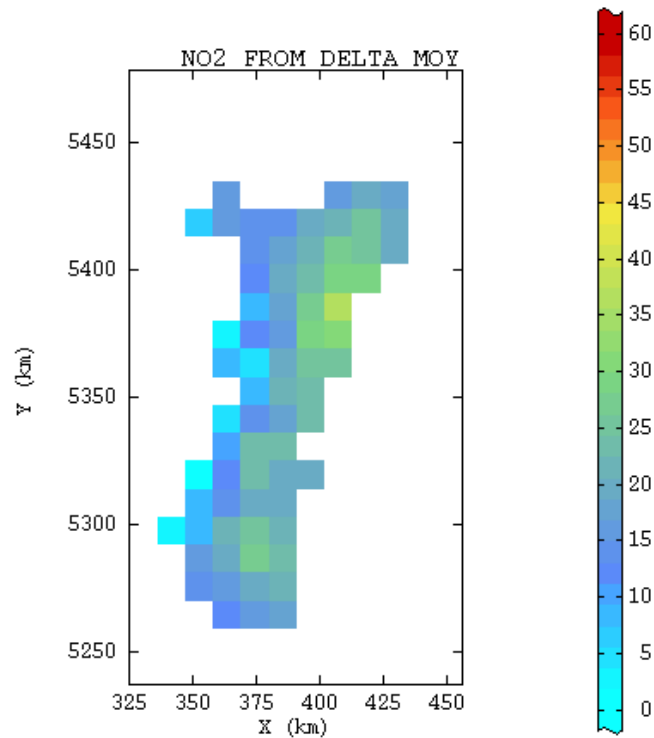
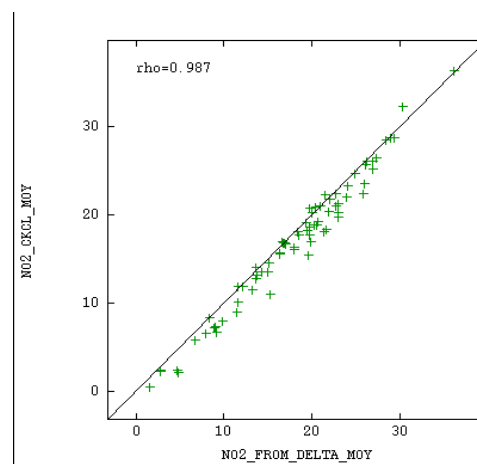


Figure 15 : ALSACE - Moyenne des estimations des huit campagnes de mesure du NO₂



Abscisse : estimation avec CHIMERE, Ordonnée : estimation sans CHIMERE

Figure 16 : ALSACE – Nuage de corrélation entre les moyennes des estimations des huit campagnes de mesure par les deux méthodes d’estimation

3.2.2 APPLICATION DE LA METHODE DE CARTOGRAPHIE JOURNALIERE AUTOMATIQUE DE NO₂

3.2.2.1 CORRELATION TUBES - STATIONS

La méthode des corrélations temporelles a été appliquée dans la région Alsace. Cela a permis d'attacher une station fixe à la plupart des sites d'échantillonnage (59 sites) et de trouver les paramètres statistiques nécessaires pour reconstituer les concentrations journalières des stations virtuelles.

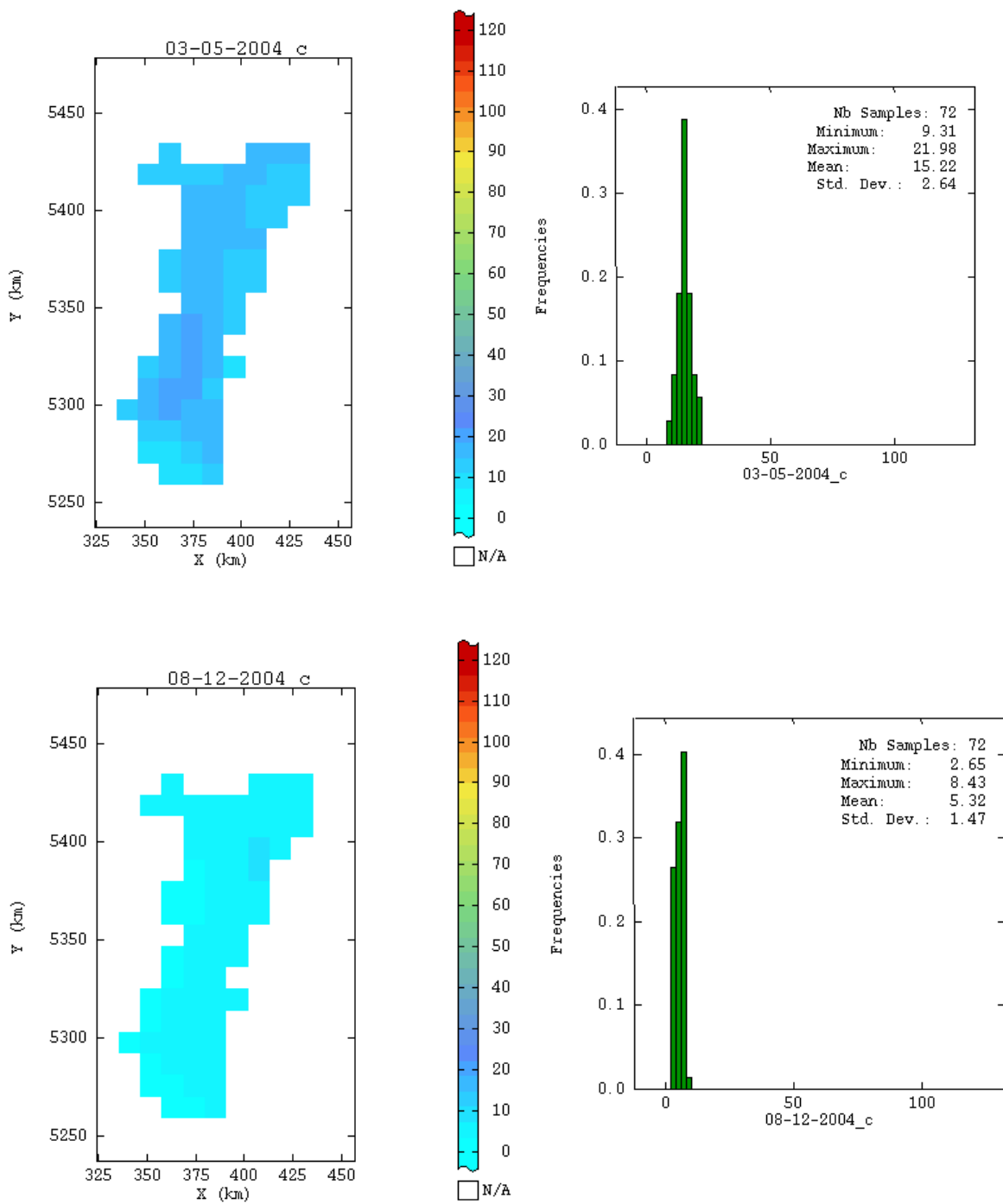
3.2.2.2 CARTOGRAPHIE JOURNALIERE

Le modèle proposé (Tableau 1) et déjà utilisé lors de l'estimation des campagnes par tubes (cf. § 3.2.1) est maintenant appliqué aux concentrations journalières reconstituées et mesurées pour l'année 2004. Les paramètres définis à l'avance grâce aux analyses précédentes sont compilés dans le Tableau 10.

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	59 Stations virtuelles et 24 stations fixes disponibles
Variabiles auxiliaires	Fonction obtenue par régression linéaire multiple entre la variable Delta et les trois variables suivantes : <ul style="list-style-type: none">• Logarithme naturel translaté de la densité d'émissions dans un rayon de 2Km ($\ln(V \text{ Aux} + 1)$).• Logarithme naturel translaté de la densité de population dans un rayon de 2Km ($\ln(V \text{ Aux} + 1)$).• Altitude estimée par krigeage ordinaire à partir d'un Modèle Numérique de Terrain à l'échelle kilométrique disponible pour la région Alsace.
Méthode d'estimation de la variable Delta	Cokrigeage colocalisé avec la fonction auxiliaire calculée précédemment.
Modèle de variogramme croisé entre la variable delta et la covariable ajustée.	Effet de pépite + structure sphérique de portée 40Km. Le palier est ajusté automatiquement tous les jours.

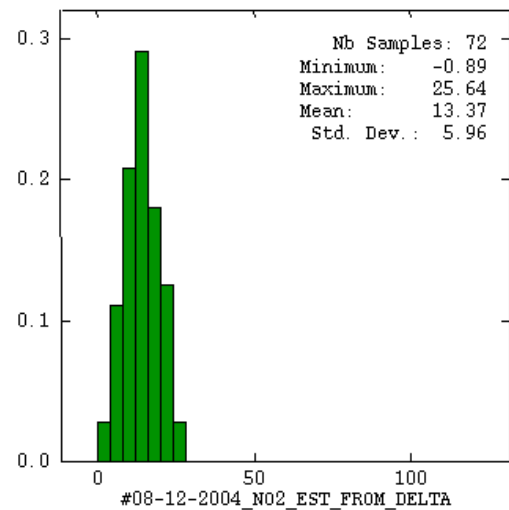
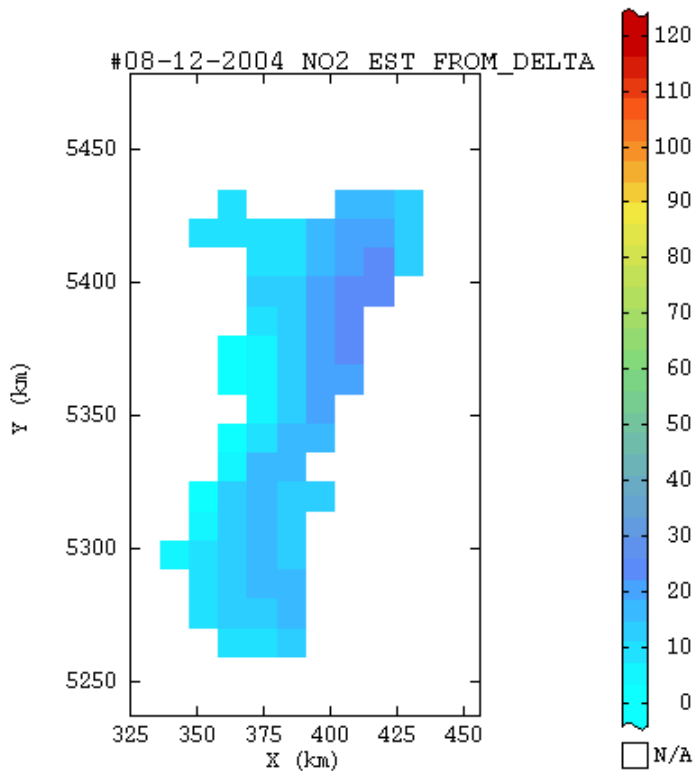
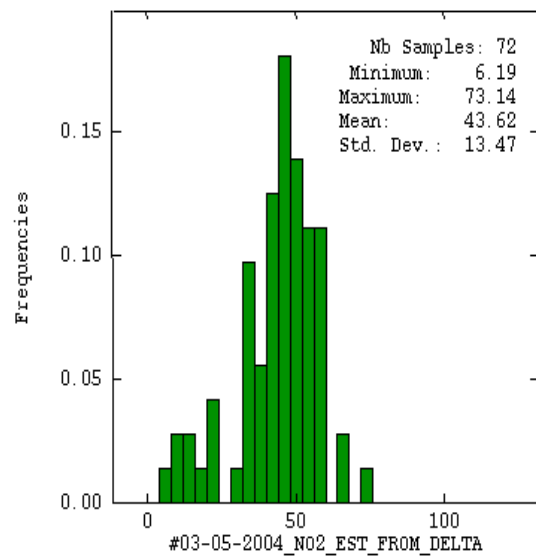
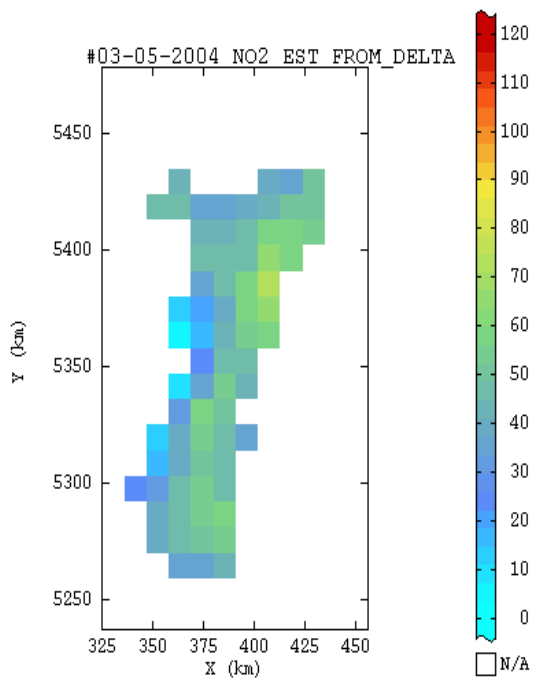
Tableau 10 : Cartographie Journalière - Paramètres définis à l'avance

Les résultats de l'estimation de deux journées appartenant à deux saisons différentes, celles du 4 mars et du 12 août 2004, sont présentés dans les figures ci-après.



En haut : Journée du 5 mars 2004 - En bas : Journée du 12 août 2004

Figure 17 : ALSACE - Cartes et statistiques du modèle CHIMERE



En haut : Journée du 5 mars 2004 - En bas : Journée du 12 août 2004

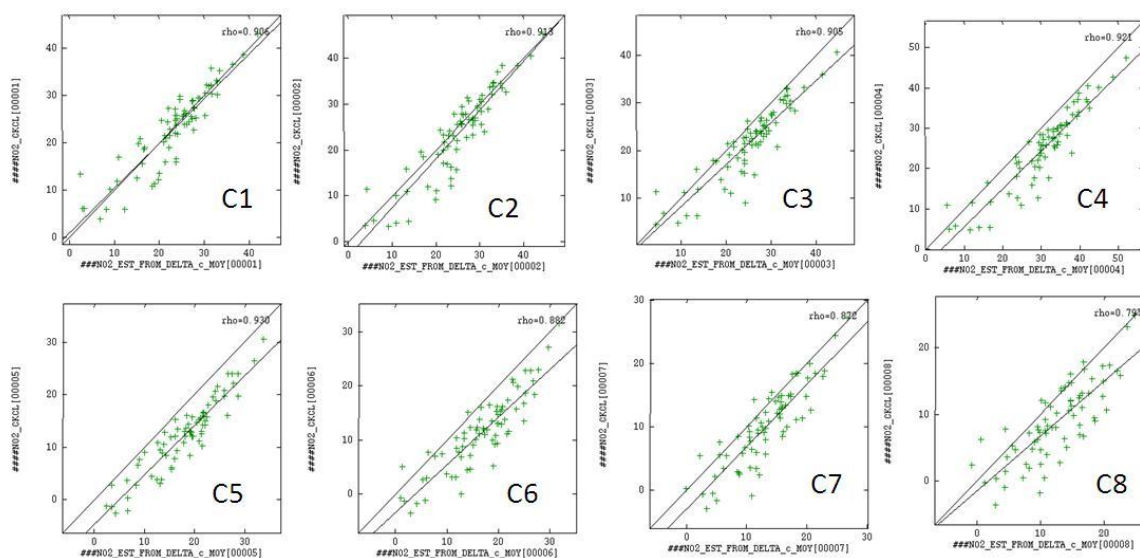
Figure 18 : ALSACE - Cartes et statistiques de l'estimation du NO₂

3.3 EVALUATION DU MODELE

3.3.1 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 par le modèle CHIMERE (à l'aide des stations virtuelles), et de les comparer avec les estimations issues des données de campagnes (mesures des tubes par quinzaines).

La Figure 19 montre les nuages de corrélation entre la moyenne des estimations journalières et l'estimation directe par tubes passifs, pour les huit campagnes. Les résultats sont très encourageants, pour la saison hivernale les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.9 et autour de 0.8 pour la saison estivale.



Abscisse : Moyenne par campagne des estimations journalières de NO₂ effectuées à partir des stations virtuelles en prenant en compte le modèle proposé (CHIMERE + DELTA)

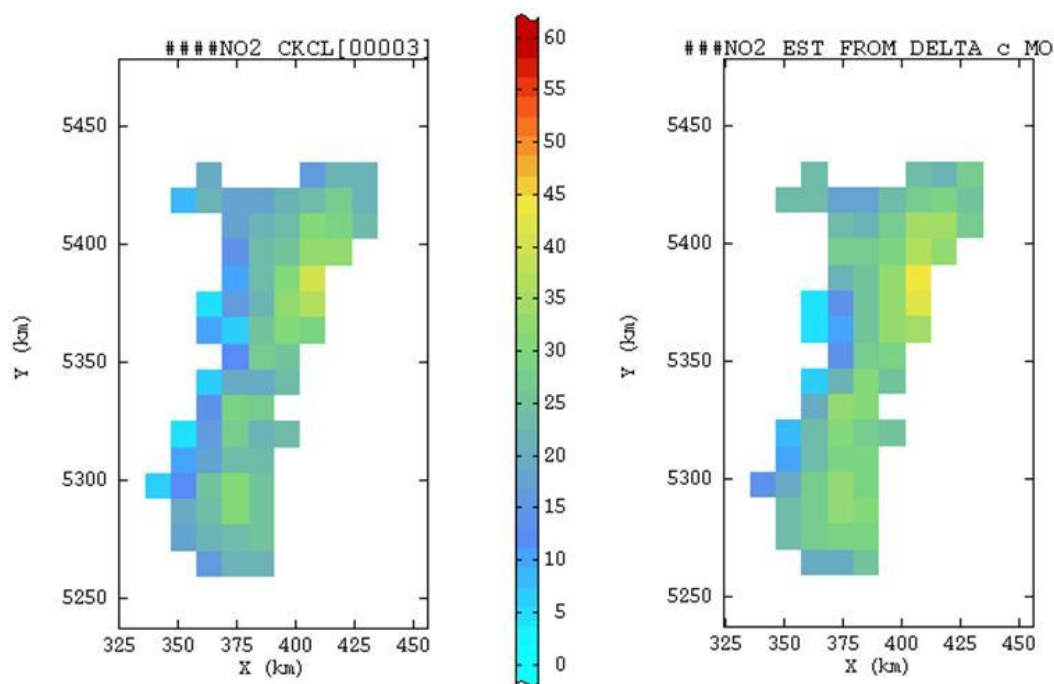
Ordonnée : Estimation NO₂ à partir des tubes à diffusion (CK avec la variable auxiliaire)

Figure 19: ALSACE - Nuages de corrélation par campagne entre les estimations à partir des tubes à diffusion et la moyenne des estimations journalières

Pour quelques campagnes, la moyenne de l'estimation par stations virtuelles est légèrement supérieure à l'estimation directe des tubes passifs, à cause, certainement de la prise en compte des stations de proximité automobile dans l'algorithme de cartographie journalière.

A titre d'exemple, la Figure 20 compare pour la troisième campagne les cartes des estimations obtenues par les deux méthodes, on observe une grande similitude dans les cartes.

Ces résultats résultent en partie du fait que l'on utilise les mêmes variables auxiliaires et que l'on applique les mêmes paramètres d'estimation par krigeage : modèle de variogramme, méthode d'estimation, etc.



A gauche : Estimation NO₂ à partir des tubes à diffusion (CKCL avec la variable auxiliaire)

A droite : Moyenne des estimations journalières de NO₂ effectuées à partir des stations virtuelles en prenant en compte le modèle proposé (CHIMERE + DELTA)

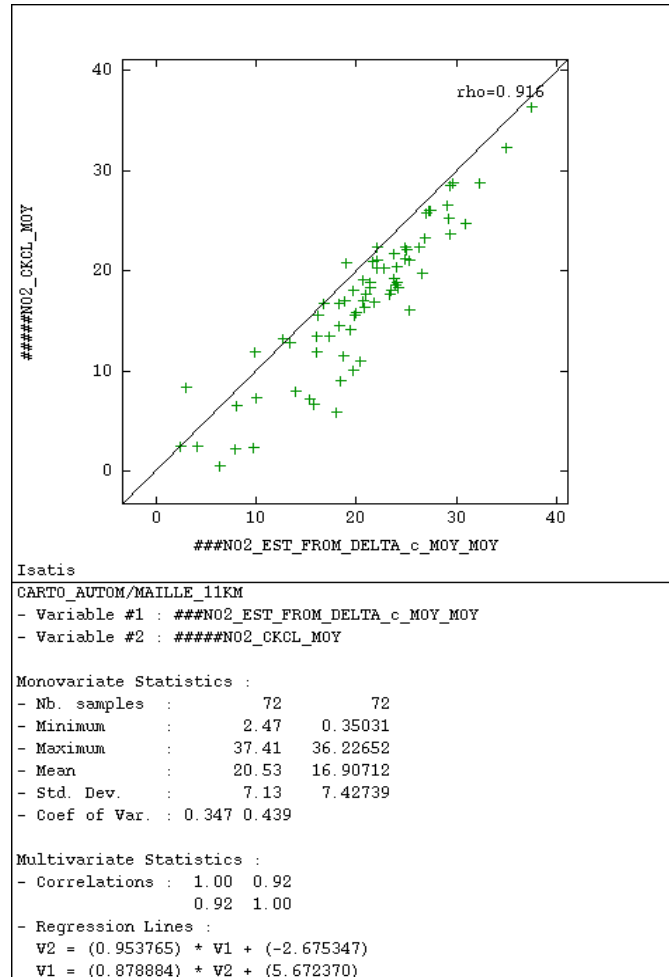
Figure 20: ALSACE - Cartes des estimations obtenues pour la troisième campagne à partir des tubes à diffusion (à gauche) et la moyenne des estimations journalières (à droite)

Le Tableau 11 affiche, pour chaque campagne, les statistiques détaillées de la moyenne des estimations journalières, celles-ci peuvent être comparées avec celles affichées dans le Tableau 5 pour la moyenne des estimations directes des campagnes.

Dates Campagne :	20 janv. - 3 fév.	3 - 17 fév.	17 fév. - 2 mars	2 - 16 mars	Moy. Hiver 2004	11 - 25 mai	25 mai - 8 juin	8 - 22 juin	22 juin - 6 juill.	Moy. Eté 2004	Moy. 8 camp.
Nb de mailles	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
Minimum [µg/m³]	2.5	3.9	4.4	5.5	4.2	2.4	1.0	0.0	0.0	0.6	2.5
Moyenne [µg/m³]	23.1	25.2	25.2	30.4	26.0	18.1	16.7	13.2	12.5	15.1	20.5
Maximum [µg/m³]	41.7	44.4	44.4	51.9	45.6	33.6	31.7	26.8	24.8	29.2	37.4
Ecart-type [µg/m³]	8.0	8.0	7.8	9.2	8.2	6.8	6.9	5.5	5.6	6.2	7.1

Tableau 11 : ALSACE - Statistiques par campagne de la moyenne des estimations journalières de NO₂ (Delta + CHIMERE)

Les estimations obtenues par la méthode de correction du modèle CHIMERE, sont en moyenne 3.6 µg/m³ plus élevées que celles obtenues par l'estimation directe des mesures par tubes passifs (cf. figures ci-jointes).



Abscisse : moyenne des estimations journalières effectuées par le modèle proposé (CHIMERE + DELTA)

Ordonnée : moyenne des huit estimations directes des campagnes par CKCL

Figure 21: ALSACE – Nuage de corrélation entre les moyennes des estimations des huit campagnes de mesure du NO₂ par les deux méthodes

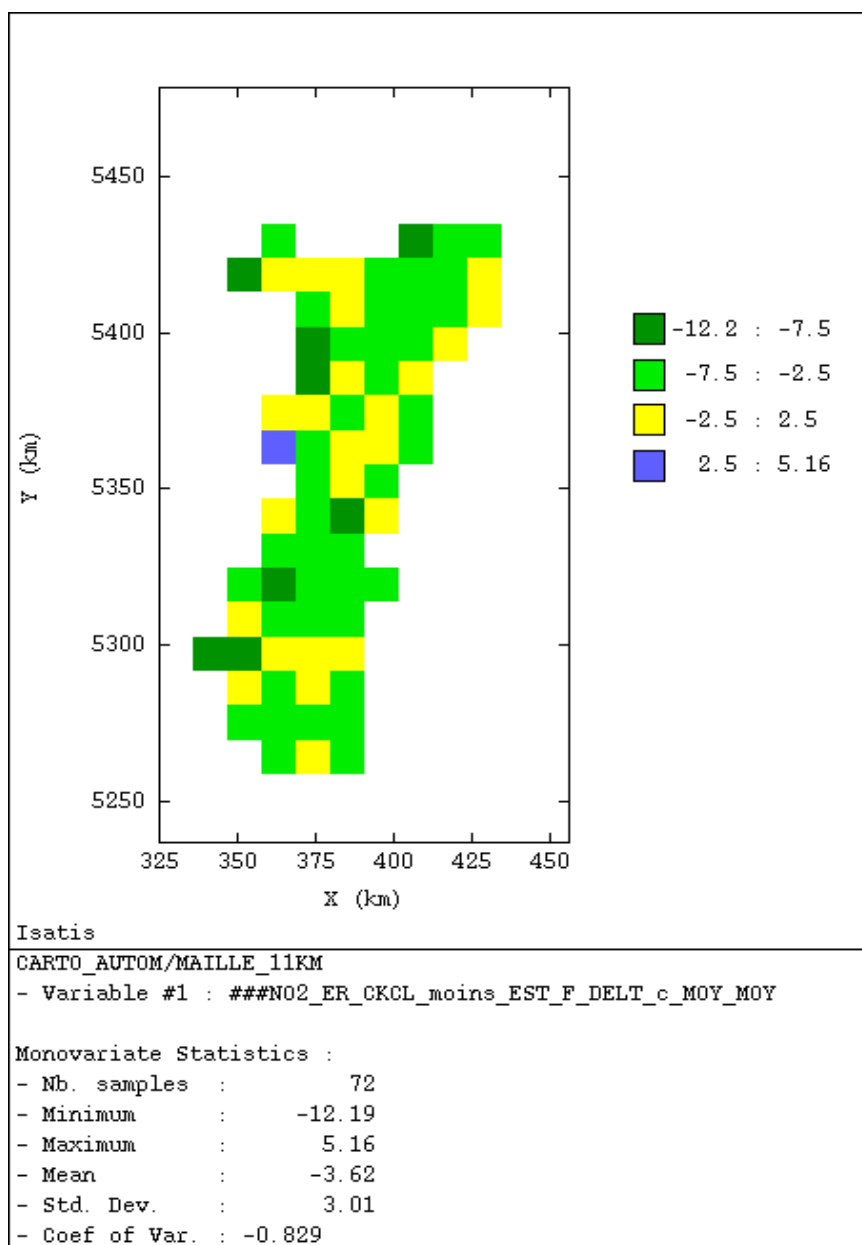


Figure 22: ALSACE – Carte de l'écart moyen (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre les estimations journalières réalisées par le modèle proposé et les estimations directes des campagnes par CKCL

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

L'estimation journalière du NO₂ en prenant en compte le modèle CHIMERE et les stations virtuelles est évaluée par validation croisée aux stations fixes, en comparant les moyennes journalières.

On applique toujours le même modèle proposé mais à chaque fois on estime la concentration d'une station fixe à partir des 60 stations virtuelles et des 23 autres stations fixes.

La moyenne des concentrations journalières ainsi que des statistiques sur l'erreur absolue et l'erreur relative d'estimation sont affichées dans les tableaux Tableau 12 et Tableau 13, et les figures Figure 23, Figure 24 et Figure 25.

L'erreur absolue est définie pour chaque station fixe comme l'écart entre la mesure et la valeur estimée par validation croisée (erreur = mesure - estimation), l'erreur relative est égale à l'erreur absolue divisée par la mesure, elle est exprimée en pourcentage (multipliée par 100).

Le faible nombre de données disponibles pour le camion laboratoire (station 16202, localisée au nord de l'agglomération de Strasbourg) ne permet pas de le comparer aux autres stations (on ne dispose que de 95 jours de mesure, soit 26% du temps), cette station ne sera donc pas prise en compte dans les analyses.

La configuration des points utilisés dans la région Alsace favorise la qualité des estimations dans les zones urbaines car la densité de points de mesure (tubes passifs et stations fixes) est plus forte dans ces territoires que dans les zones rurales.

Par exemple, si le rapport entre l'écart-type de l'erreur et la moyenne mesurée sur la station est pris en compte comme indicateur de la qualité d'estimation⁵, il est remarquable que pour les stations urbaines la dispersion de l'erreur absolue oscille entre 4% et 40% avec 21% en moyenne, alors que pour les stations périurbaines et rurales elle est plus élevée, le rapport pour celles-ci se trouvant entre 26% et 72%, avec 44% en moyenne.

Concernant la pollution de proximité, à la résolution spatiale considérée, le modèle n'est pas capable de reproduire précisément les concentrations locales sur les sites de trafic et de proximité industrielle. Dans ce cas, les statistiques calculées sur ces stations ne peuvent pas être utilisées pour tester l'efficacité de la méthode, elles ne seront donc pas prises en compte pour la valider.

⁵ Le résultat en pourcentage de ce rapport apparaît dans la colonne nommée « CV » du Tableau 12, il s'agit d'une mesure de la dispersion de l'erreur qui a l'avantage de ne pas dépendre des niveaux des concentrations mesurées.

Code	Nom	Type	NO2			Erreur [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]				CV (%)	
			Nb	Moy mesurée [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Ecart type	Min	Moy	Max	Ecart type		
16201	Vosges Moyennes	Rural national	293	6.1	4.9	-19.6	-2.1	13.8	4.4	72	
16017	Nord-Est Alsace	Rural régional	310	23.6	11.6	-26.9	-1.4	20	6.2	26	
16031	Vosges du Nord		319	12.4	8.4	-27.3	-4.5	17.4	6.4	51	
16032	Hautes Vosges		307	7.1	3.6	-20	-7.1	5.1	4	56	
16001	Schilt.ASPA	Périurbain	321	25.5	13.1	-23	2.6	37.8	8.3	32	
16060	3 Frontières		323	27.1	12.3	-45.2	-3.7	24.6	9.3	34	
16065	Mulhouse Est		330	16.5	11.9	-12	2.1	23.2	5.8	35	
16027	Strasbourg centre	Urbain	317	39.7	12.9	-13.5	-1.3	15.5	4.8	12	
16029	Strasbourg Nord		319	30.8	12.4	-7.6	0.3	6.5	1.3	4	
16037	Stras. Hôpital civil		305	42.3	12.4	-42	-5.7	37.5	11.7	28	
16038	STG Est		318	36	12.5	-24.4	-0.1	27.1	7.4	20	
16053	Colmar Est		327	29.8	12.1	-22.2	-2.1	12.5	5.1	17	
16054	Colmar Centre		327	35.9	11.3	-25.5	1.2	39.1	9.8	27	
16057	Mulhouse Nord		330	39.7	13.9	-27.2	-2.2	10.3	6.9	17	
16066	Mulhouse Sud II		329	23.2	12.8	-31.8	1.2	40.4	9.3	40	
16012	Strasbourg Ill kirch		Trafic	322	39.6	14.8	-19.2	1.6	19	7.2	18
16034	Stras. Clemenceau			323	57.7	14.9	-45.1	-6.4	14.6	9.7	17
16056	Mulhouse ASPA	327		34.1	14.4	-31.	1.7	16.3	7.6	22	
16004	Stars. Reichstett	Ind.	326	31.6	13.1	-28.7	-3	13.8	6.9	22	
16052	Thann		324	19.1	9.7	-16.8	2.2	17.8	4.8	25	
16055	Ottmarsheim		324	26	10.6	-18.7	1.5	19.2	6.2	24	
16059	Chalampé		330	32.6	13.2	-36.6	0.3	26.2	10.4	32	
16061	Homburg		326	20.4	11	-11.4	0.5	8.8	2.8	14	
16202	Camion Lab.	Obs. spécifique	95	21.6	10.7	5.6	17.8	36	6.2	29	

Tableau 12 : ALSACE - Stations fixes et principales statistiques de l'erreur calculée par validation croisée pour l'année 2004

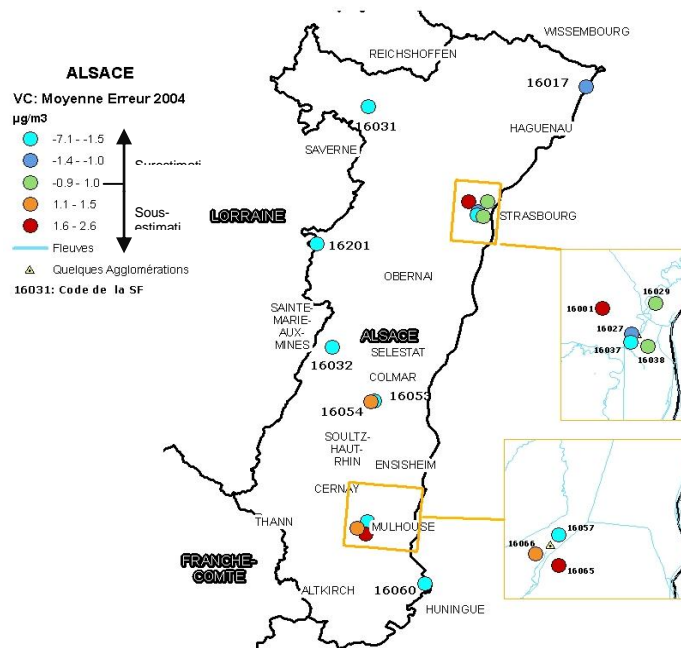


Figure 23 : ALSACE - Validation aux SF (Périurbaines, Urbaines et Rurales), Carte de la moyenne de l'erreur sur l'année 2004

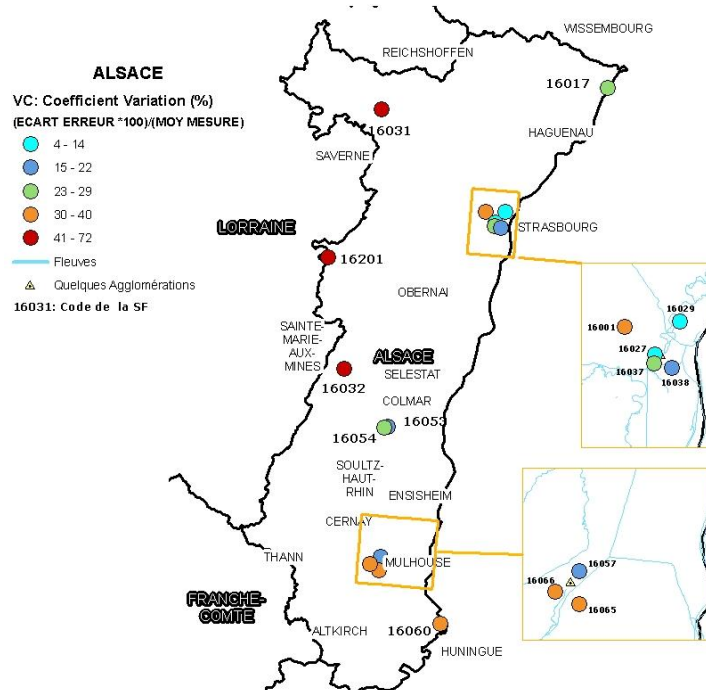


Figure 24 : ALSACE - Validation aux SF (Périurbaines, Urbaines et Rurales), Carte du coefficient de variation de l'erreur sur l'année 2004

Code	Nom	Type	NO2			Erreur Relative [%]		
			Nb	Moy mesurée [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Ecart type	Min	Moy	Max
16201	Vosges Moyennes	Rural national	293	6.1	4.9	-232	-24	743
16017	Nord-Est Alsace	Rural régional	310	23.6	11.6	-135	-1	99
16031	Vosges du Nord		319	12.4	8.4	-658	-40	213
16032	Hautes Vosges		307	7.1	3.6	-542	-112	170
16001	Schilt.ASPA	Périurbain	321	25.5	13.1	-50	23	324
16060	3 Frontieres		323	27.1	12.3	-126	-18	81
16065	Mulhouse Est		330	16.5	11.9	-146	26	279
16027	Strasbourg centre	Urbain	317	39.7	12.9	-26	-1	62
16029	Strasbourg Nord		319	30.8	12.4	-15	2	51
16037	Stras. Hôpital civil		305	42.3	12.4	-58	-10	102
16038	STG Est		318	36	12.5	-42	5	120
16053	Colmar Est		327	29.8	12.1	-53	-4	79
16054	Colmar Centre		327	35.9	11.3	-55	10	178
16057	Mulhouse Nord		330	39.7	13.9	-36	1	94
16066	Mulhouse Sud II		329	23.2	12.8	-69	21	292
16012	Strasbourg Ill kirch		Trafic	322	39.6	14.8	-33	14
16034	Stras. Clemenceau	323		57.7	14.9	-44	-8	50
16056	Mulhouse ASPA	327		34.1	14.4	-45	17	200
16004	Stars. Reichstett	Ind.	326	31.6	13.1	-49	-4	138
16052	Thann		324	19.1	9.7	-51	21	346
16055	Ottmarsheim		324	26	10.6	-43	16	283
16059	Chalampé		330	32.6	13.2	-66	13	198
16061	Homburg		326	20.4	11	-23	14	441
16202	Camion Lab.	Obs. spécifique	95	21.6	10.7	15	121	465

Tableau 13 : ALSACE - Stations fixes et principales statistiques de l'erreur relative (en %) -calculée par validation croisée pour l'année 2004

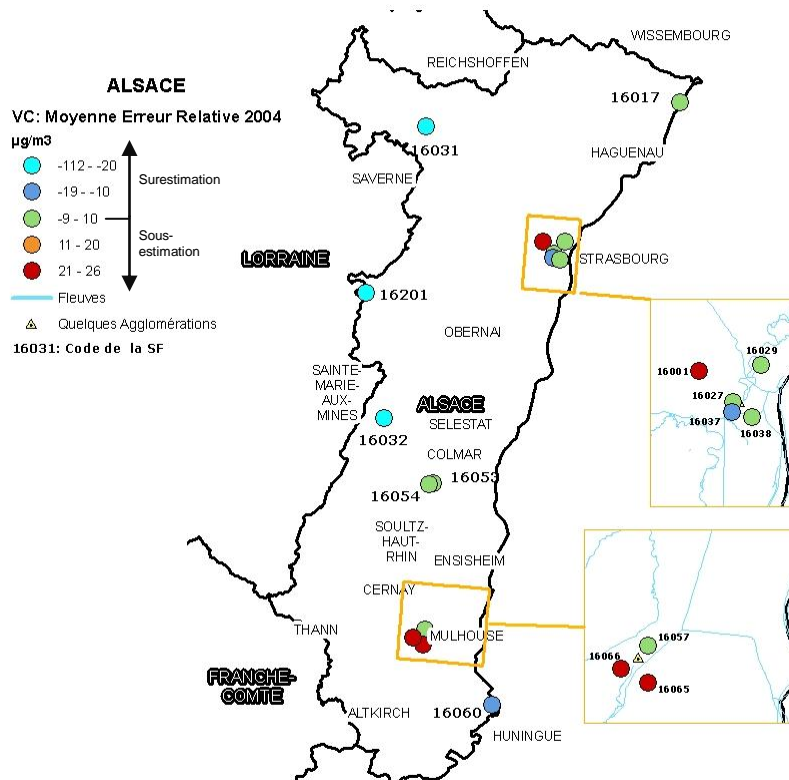


Figure 25 : ALSACE - Validation aux SF (Urbaines et Rurales), carte de la moyenne de l'erreur relative

Les résultats de deux types d'évaluations effectuées dans la région ALSACE pour l'année 2004 sont acceptables (cf. § 3.3.1 et 3.3.2), toutefois les paramètres du modèle ont été sélectionnés en fonction de campagnes de mesures réalisées cette même année ; malheureusement on ne dispose pas à l'heure actuelle des campagnes régionales de mesure plus récentes, ce qui empêche de valider le modèle pour une autre période du temps dans cette région.

Pour la région Centre, on a en revanche la chance de disposer de deux campagnes régionales de mesure du NO₂ (en 2005 et 2007), cela permettra de tester la méthode pour une période du temps différente à celui qui a servi à sélectionner les paramètres du modèle, ces résultats sont présentés dans le chapitre suivant.

4. CARTOGRAPHIE LOCALE DU DIOXYDE D'AZOTE A PARTIR DES SIMULATIONS PREV'AIR : VALIDATION REGION CENTRE (DONNEES 2007)

Deux grandes campagnes de mesures par tubes passifs ont été menées en 2005 et 2007 dans la région Centre. Les campagnes ont comporté une cinquantaine de tubes passifs couvrant toute la région et mesurant les niveaux de NO₂ pendant douze mois consécutifs, de janvier à décembre.

La campagne de l'année 2005 a déjà été exploitée par le LCSQA en 2007, elle a été l'objet d'une étude de cas (Cardenas, 2007) visant à tester et évaluer le modèle proposé pour améliorer les sorties NO₂ de CHIMERE.

Dans l'étude 2007, la comparaison effectuée entre les estimations directes des tubes et les estimations journalières avec le modèle proposé a donné des résultats satisfaisants.

L'objectif maintenant est d'effectuer le même type de comparaisons mais pour une période de temps différente de celle qui a servi à définir les stations virtuelles et à déterminer la méthode géostatistique d'estimation journalière. On utilise donc les données de 2005 pour mettre au point la méthode, qui sert à reconstituer les données de 2007.

4.1 ESTIMATION DES CAMPAGNES PAR TUBES

Chaque jeu de données mensuelles a été l'objet d'une analyse géostatistique de façon à obtenir une estimation des concentrations de NO₂ à partir des mesures par tubes passifs, en employant la méthode détaillée dans les paragraphes précédents.

Les estimations ont été réalisées avec les mêmes méthodes utilisées dans le rapport 2007, à savoir, krigeage de résidus avec comme dérive le logarithme naturel translaté de la densité d'émissions dans un rayon de 2 km.

La Figure 26 montre la variable auxiliaire utilisée comme dérive dans le modèle des résidus détaillé par la suite:

Modèle : NO₂ = Résidus + Dérive

Dérive = Ln [(densité d'émissions dans un rayon de 2 Km) +1]

Aux tubes :

Résidus = Mesure NO₂ - Ln [(densité d'émissions dans un rayon de 2 Km) +1]

Dans la maille d'estimation :

NO₂^{EST} = Résidus^{EST} + Ln [(densité d'émissions dans un rayon de 2 Km) +1]

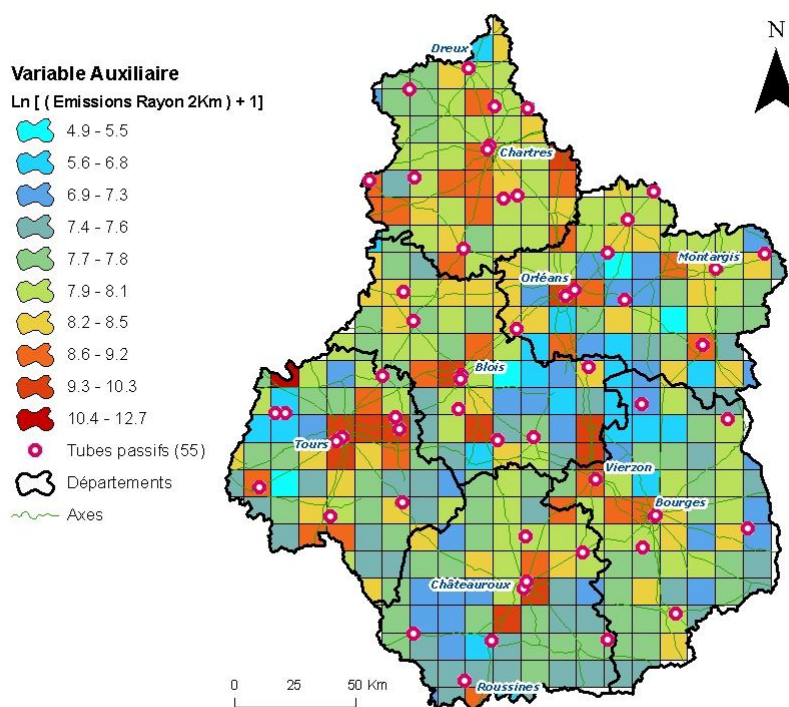


Figure 26 : CENTRE - Variable auxiliaire utilisée et localisation tubes passifs (campagnes 2005 et 2007)

Le Tableau 14 montre les statistiques des douze estimations mensuelles du NO₂ effectuées par krigeage des résidus dans la région Centre et la Figure 27 la carte de la moyenne de ces estimations.

KRES (Nb cellules= 326)	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Variance	Coeff. Var.
Janvier	-1.67	30.83	10.48	3.53	12.43	0.34
Février	-1.88	24.93	8.16	2.79	7.76	0.34
Mars	-3.19	30.52	9.73	3.88	15.02	0.4
Avril	0.01	23.41	8.79	3.15	9.89	0.36
Mai	-0.52	14.12	5.23	1.89	3.58	0.36
Juin	0.1	13.88	5.09	1.7	2.9	0.33
Juillet	3.02	9.78	6.09	1.1	1.2	0.18
Août	0.84	14.59	5.91	1.76	3.1	0.3
Septembre	-0.22	22.23	8.06	2.94	8.62	0.36
Octobre	1.45	27.55	11.28	3.85	14.79	0.34
Novembre	0.88	31.15	11.81	3.76	14.14	0.32
Décembre	3.11	30.22	13.73	3.46	12	0.25
MOYENNE ANNUELLE	0.52	22.71	8.7	2.66	7.09	0.31

Tableau 14: CENTRE - Statistiques des 12 estimations mensuelles par Krigeage des Résidus et de la moyenne pour l'année 2007

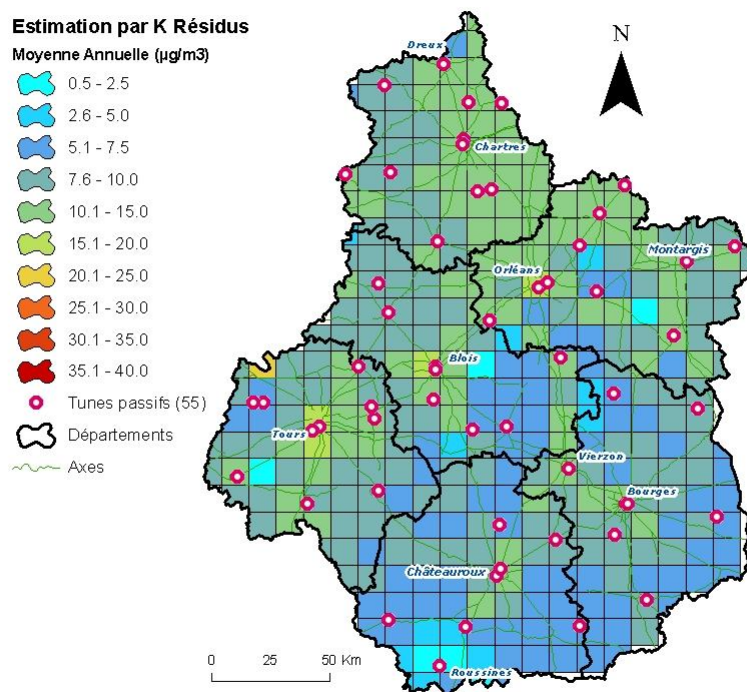


Figure 27 : CENTRE – Moyenne des 12 estimations mensuelles de l'année 2007

4.2 ESTIMATION JOURNALIERE

La méthode consiste à appliquer le modèle proposé dans le rapport 2007 pour estimer les concentrations journalières de NO₂. Ensuite, les moyennes mensuelles seront calculées pour rendre possible la comparaison avec l'estimation directe des campagnes par tubes.

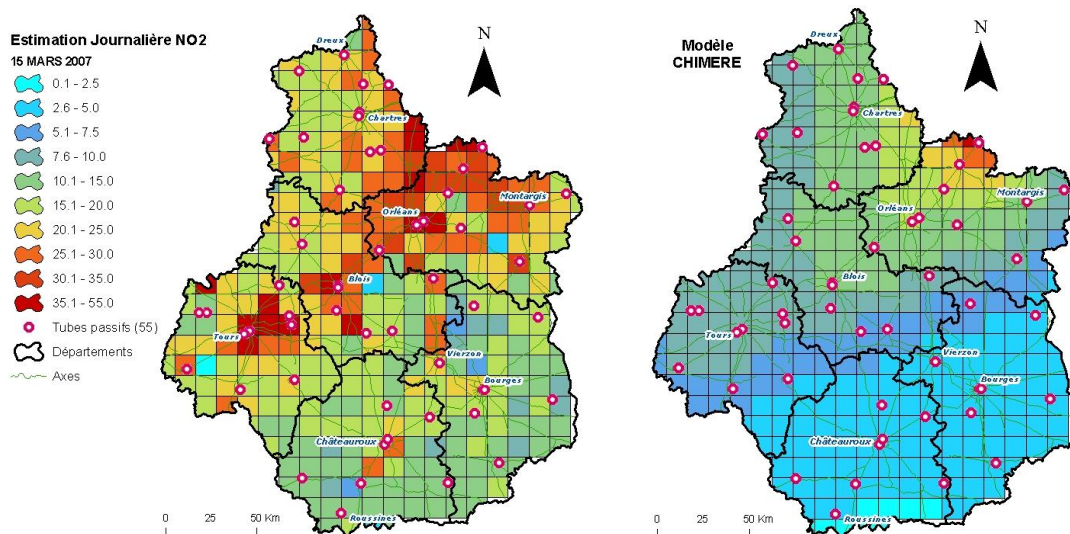
Les paramètres définis à l'avance grâce aux analyses déjà effectuées sont compilés dans le Tableau 15.

La station de référence No. 34023 n'a malheureusement pas fonctionné en 2007, par conséquent les concentrations des 7 stations virtuelles liées à cette station n'ont pas pu être reconstituées ; seulement 41 stations virtuelles sont donc disponibles pour les estimations journalières de 2007.

Variable	Choix
Concentrations aux stations virtuelles	Estimées à partir des stations de référence et paramètres statistiques des corrélations temporelles déterminées avec les données des campagnes 2005.
Les jeux des données à estimer	45 Stations virtuelles et 18 stations fixes disponibles
Variable auxiliaire	Densité d'émissions dans un rayon de 2 km
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 40 km. Le palier est ajusté automatiquement tous les jours.

Tableau 15 : Cartographie Journalière - Paramètres définis à l'avance

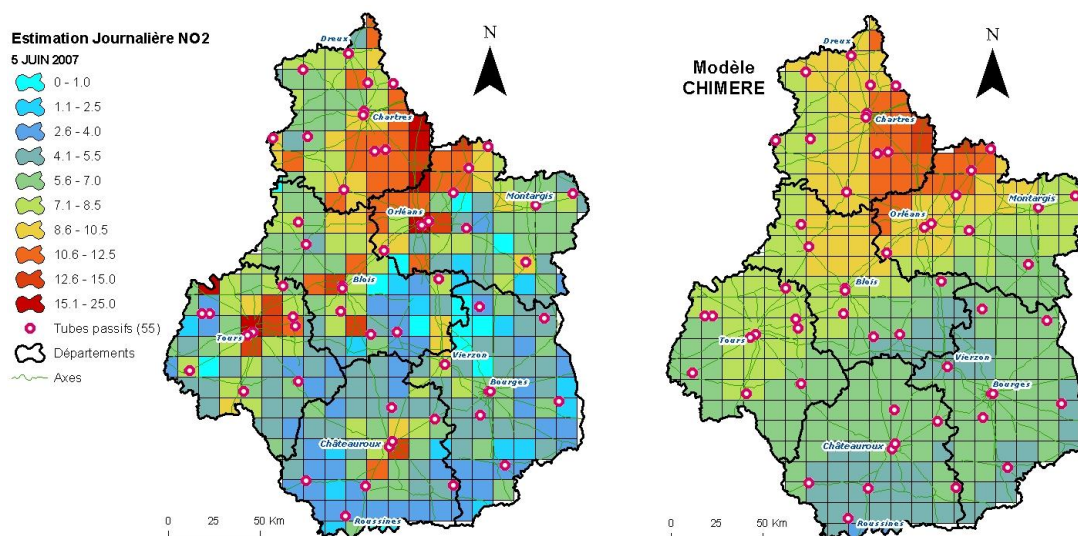
Les résultats de l'estimation de deux journées appartenant à deux saisons différentes sont présentés dans les Figure 28 et Figure 29.



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

A droite : Modèle CHIMERE seul

Figure 28 : CENTRE - NO₂ (CHIMERE + Delta) - Résultats pour la journée du 15 mars 2007 (saison hivernale)



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

A droite : Modèle CHIMERE

Figure 29 : NO₂ (CHIMERE + Delta) - Résultats pour la journée du 5 juin 2007 (saison estivale)

4.3 EVALUATION DU MODELE

4.3.1.1 COMPARAISON DES MESURES RECONSTITUEES AUX STATIONS VIRTUELLES AVEC LES MESURES REALISEES A PARTIR DE TUBES A DIFFUSION

On teste d'abord la méthode des corrélations temporelles (choix des stations virtuelles, des stations de référence et des paramètres des corrélations) en comparant la moyenne mensuelle des mesures journalières reconstituées avec la mesure effectivement réalisée aux tubes passifs en 2007.

Ce test permettra d'examiner si les paramètres des corrélations temporelles choisis en 2005 sont encore valables en 2007.

Les cartes de la Figure 30 montrent pour les 41 stations virtuelles, la moyenne et le coefficient de variation des 12 erreurs calculées pour chaque mois entre les deux types de mesures, celle de la Figure 31 montrent la moyenne de l'erreur relative.

Le Tableau 16 reporte les statistiques de l'erreur pour toutes les 41 stations virtuelles et le Tableau 17 celles de l'erreur relative, les valeurs des mesures et de l'erreur calculée par validation croisée pour chaque tube passif et pour chaque mois sont présentées dans l'annexe 1 et dans l'annexe 2 pour l'erreur relative.

Pour les 12 mois et pour les 41 stations virtuelles le modèle ne présente en moyenne qu'une légère surestimation de $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (9% en relative), avec une erreur dont la dispersion varie entre 11% et 48% (22% en moyenne).

41 Stations Virtuelles	Erreur [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (Mesure Tube - Moyenne Mensuelle Mesures Reconstitués)					
	NB de mois	Valeur Minimale	Valeur Moyenne	Valeur Maximale	Ecart-type	CV (%)
Valeur Minimale	8	-10.29	-4.80	0.55	1.24	11
Valeur Moyenne		-4.33	-0.60	3.73	2.34	22
Valeur Maximale	12	-1.67	1.96	17.47	5.46	48

Tableau 16 : Statistiques des erreurs aux stations virtuelles

41 Stations Virtuelles	Erreur Relative [%]: (Mesure Tube - Moyenne Mensuelle Mesures Reconstitués)*100/Mesure Tube			
	NB de mois	Valeur Minimale	Valeur Moyenne	Valeur Maximale
Valeur Minimale	8	-542	-66	3
Valeur Moyenne		-71	-9	28
Valeur Maximale	12	-9	13	71

Tableau 17 : Statistiques des erreurs relatives aux stations virtuelles

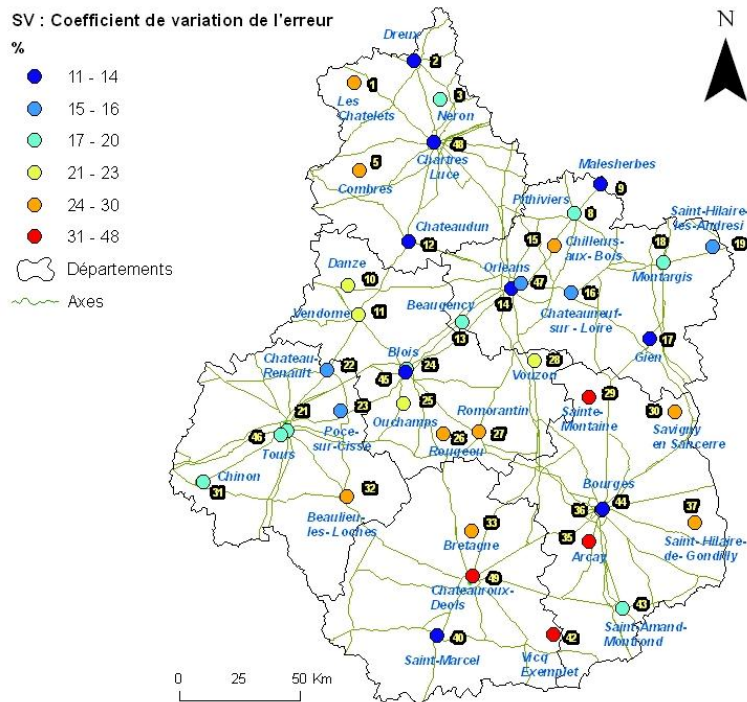
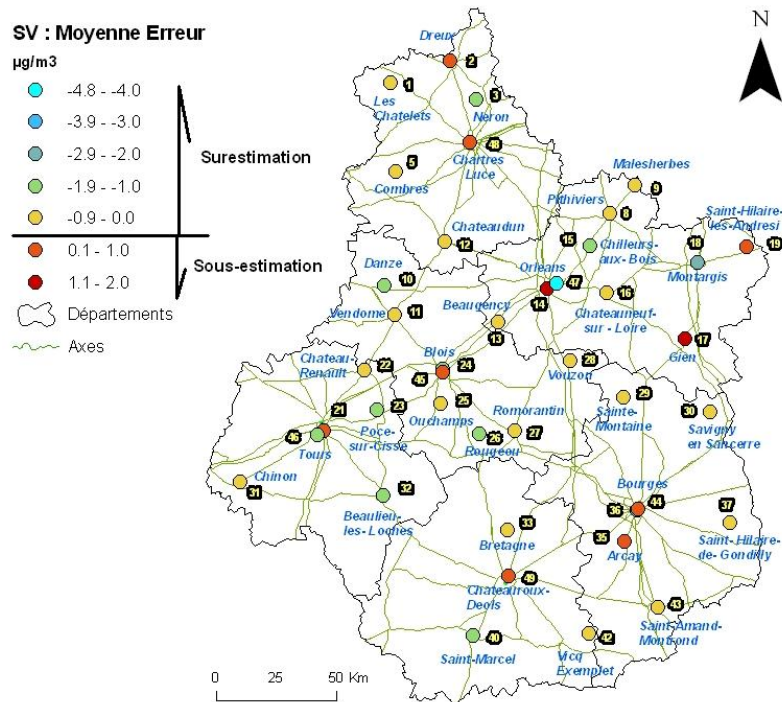


Figure 30 : Carte de la moyenne et du coefficient de variation des erreurs aux stations virtuelles

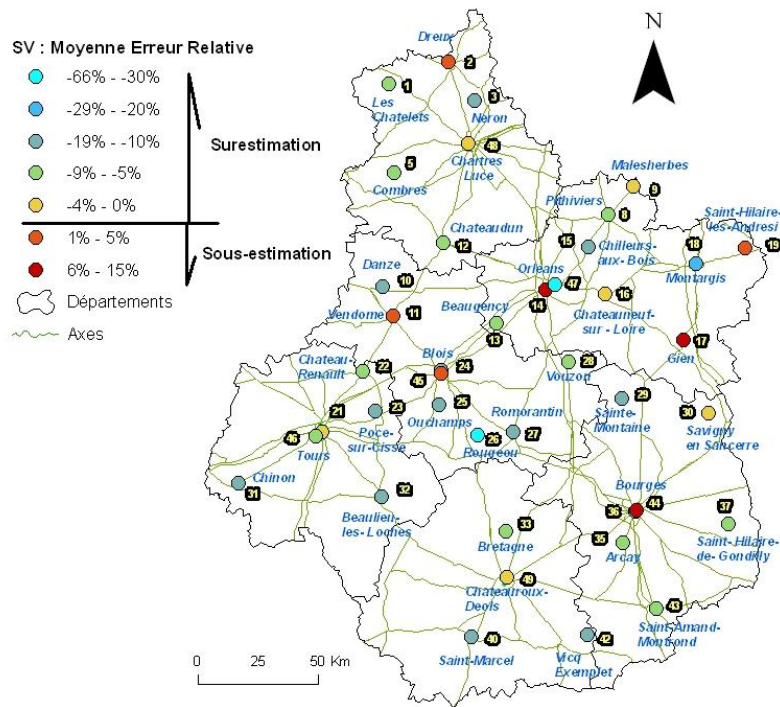
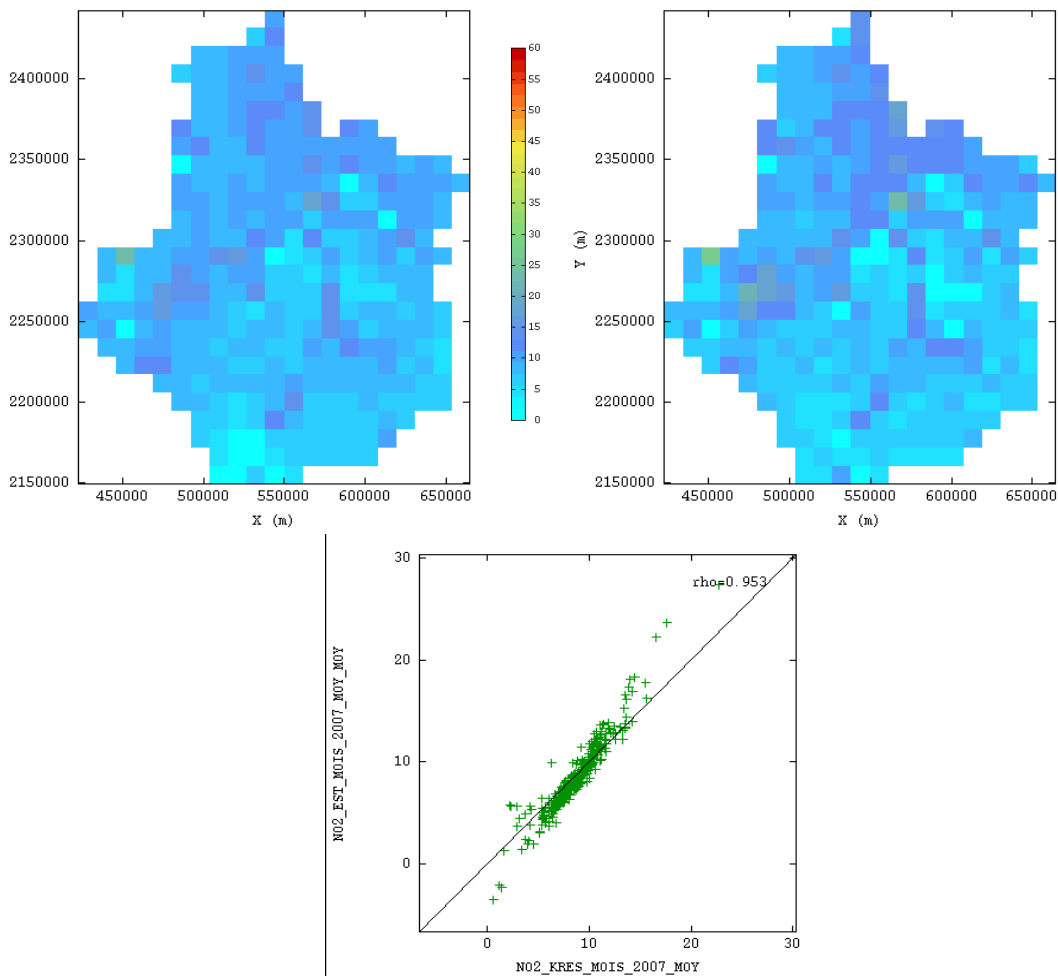


Figure 31 : Carte de la moyenne des erreurs relatives aux stations virtuelles

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

La même procédure appliquée à la région Alsace est utilisée, la méthode consiste à calculer la moyenne des estimations journalières réalisées via le modèle CHIMERE, et de les comparer avec les estimations issues des données de campagnes (mesures mensuelles des tubes).

Les résultats sont très encourageants, ainsi la Figure 32 montre la moyenne annuelle obtenue par chaque méthode. Les cartes des deux variables sont similaires, les statistiques ne montrent qu'une légère surestimation par le modèle proposé.



*A gauche : moyenne des 12 estimations directes de tubes par KR
A droite : moyenne des estimations journalières par le modèle proposé
En Bas : nuage de corrélation entre ces deux variables*

Figure 32 : CENTRE - Comparaison de la moyenne des estimations pour l'année 2007

Variable	Nb	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type
Moyenne des estimations journalières	326	-3.65	8.54	27.28	3.53
Moyenne des 12 estimations mensuelles	326	0.52	8.70	22.71	2.66

Tableau 18 : CENTRE - Statistiques sur le domaine de la moyenne annuelle des estimations

La Figure 33 montre les résultats concernant les estimations de février 2007 et la Figure 34 ceux de juillet 2007.

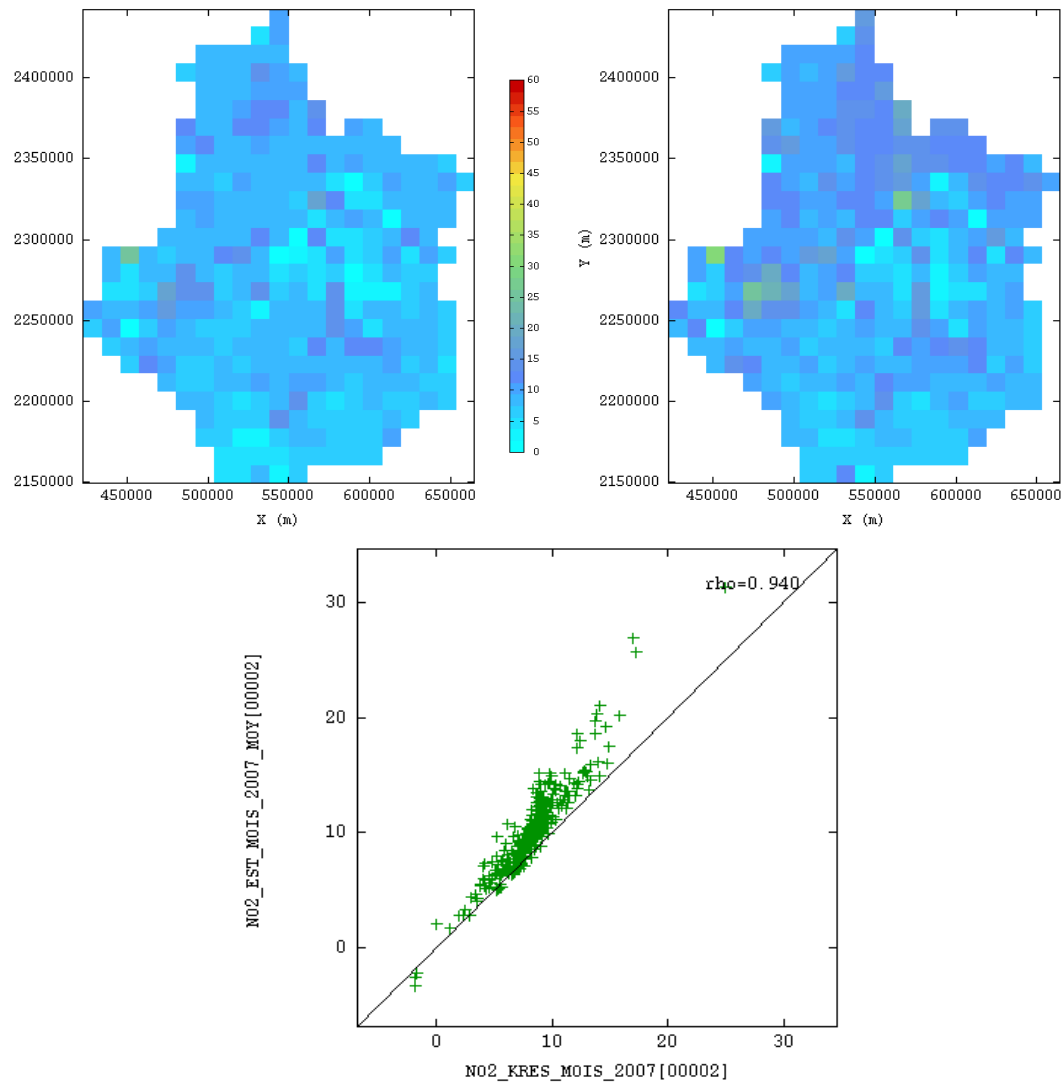
Le nuage de corrélation des résultats des estimations estivales de juillet montre que pour cette saison l'écart entre les deux modèles est plus important.

Il est connu que les niveaux de concentrations estivales de NO₂ peuvent d'un point de vue géostatistique présenter une faible⁶ structure spatiale, par conséquent les estimations obtenues par krigeage peuvent dans ce cas être moins précises.

Le fait d'appliquer un modèle plus robuste⁷ pour estimer les concentrations estivales permettrait donc d'améliorer les estimations pour cette saison.

⁶ On parle d'une faible corrélation spatiale lorsque la composante pépitique est plus importante que le palier du modèle de variogramme ajusté (dans le cas de la région Centre le modèle de variogramme est composé d'un effet de pépité et d'une structure sphérique de portée 40 km, les paliers sont ajustés automatiquement tous les jours).

⁷ Par exemple, ne pas laisser ajuster les paliers automatiquement en période estivale mais les fixer en fonction des modèles ajustés pour les campagnes de mesure par tubes (hivernales et/ou estivales).

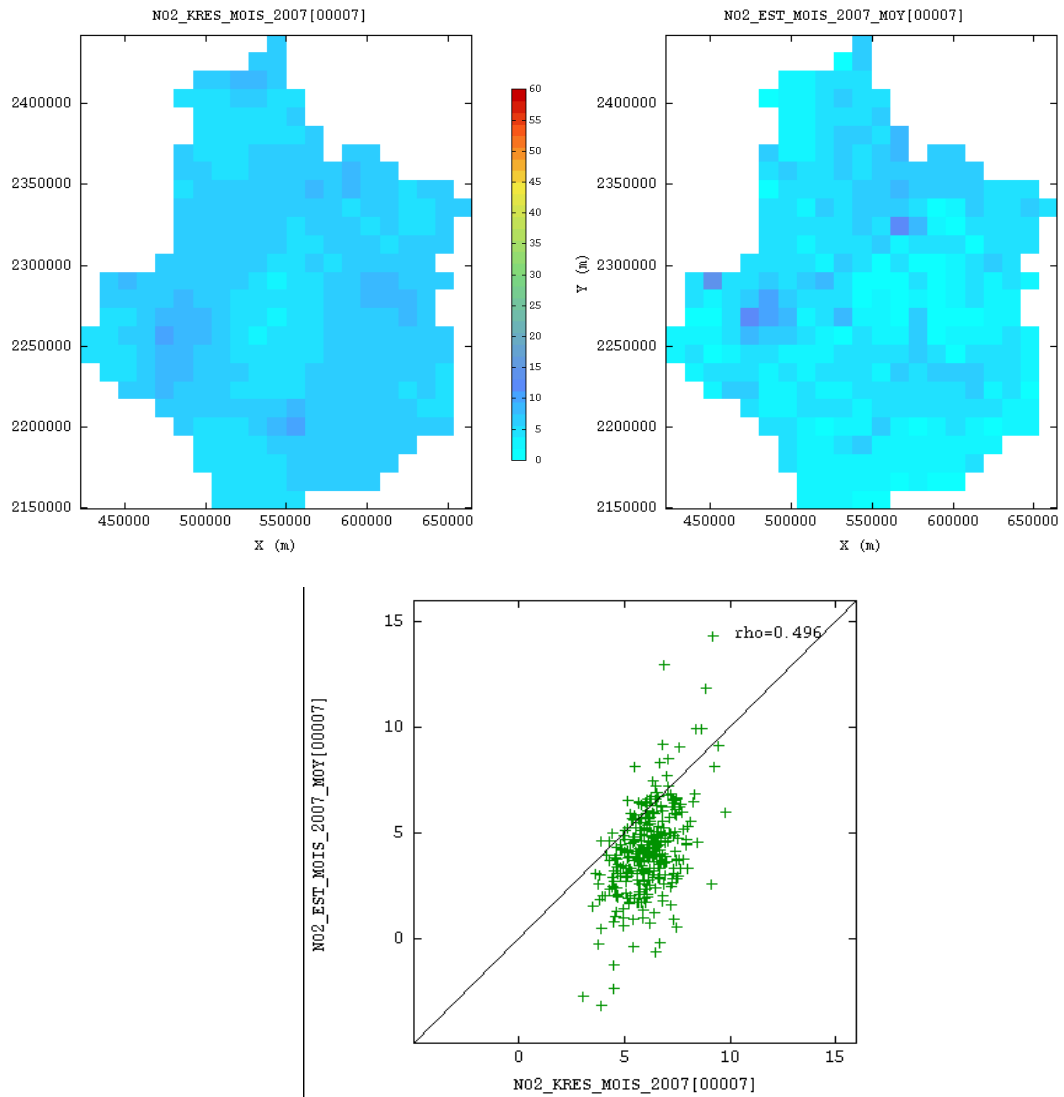


En haut à gauche : estimation directe de tubes par KR

En haut à droite : moyenne des estimations journalières par le modèle proposé

En Bas : nuage de corrélation entre ces deux variables

Figure 33 : CENTRE - Comparaison des estimations pour le mois de février 2007



En haut à gauche : estimation directe de tubes par KR

En haut à droite : moyenne des estimations journalières par le modèle proposé

En Bas : nuage de corrélation entre ces deux variables

Figure 34 : CENTRE - Comparaison des estimations pour le mois de juillet 2007

5. CONCLUSIONS

Afin de corriger les simulations journalières de NO₂ du modèle CHIMERE une méthodologie fondée sur la géostatistique multi variable est proposée. Elle comprend plusieurs étapes : la définition de stations virtuelles à partir de données de campagnes, une analyse géostatistique destinée à caler certains paramètres du modèle de correction, la mise en œuvre automatique de l'estimation journalière. Cette démarche a été mise au point en 2007 sur un jeu de données de la région Centre.

Les calculs réalisés en 2008 ont eu pour objet d'une part, de tester la méthodologie sur un jeu de données collecté à posteriori dans cette région, donc n'ayant pas servi à ajuster les modèles de stations virtuelles et le modèle géostatistique, et d'autre part, d'évaluer si cette méthodologie est généralisable à d'autres zones.

En moyenne par mois, la méthode de définition des stations virtuelles se révèle satisfaisante malgré des erreurs ponctuellement plus élevées pour quelques sites. Il est important que les stations virtuelles puissent être établies à partir de données suffisamment nombreuses et couvrant l'ensemble des situations de pollution rencontrées dans l'année. Si l'historique des campagnes est assez riche, un modèle par saison pourrait être envisagé.

Autres composantes essentielles du modèle de correction, les variables auxiliaires ont une influence sensible sur les cartographies. Elles doivent être soigneusement choisies et éventuellement transformées à l'aide d'un SIG. Pour la région Centre, la densité d'émissions de NO_x et la densité de population dans un certain rayon ont été utilisées. Pour l'Alsace, l'altitude, la densité d'émissions de NO_x et la densité de population ont été retenues.

Les calculs sur la région Alsace montrent que la méthodologie peut être transposée géographiquement mais une adaptation du modèle et de ses paramètres à chaque contexte est nécessaire afin de prendre en compte les particularités de la zone étudiée (relief, densité de population, émissions, etc.)

La validation réalisée sur la région Centre atteste qu'une bonne précision d'estimation peut être atteinte en moyenne mensuelle, saisonnière ou annuelle. En été, les résultats sont de moindre qualité mais ils correspondent à des concentrations plus faibles et l'on sait de plus qu'en été, les concentrations de NO₂ sont moins corrélées spatialement qu'en hiver. Comme les données de validation sont des mesures mensuelles de tubes, une validation jour par jour de la méthode n'a pu être effectuée.

Une autre façon de corriger CHIMERE serait d'exploiter directement les corrélations spatiales entre CHIMERE, les données de stations fixes, les données de tubes et les variables auxiliaires sans création intermédiaire de stations virtuelles. La définition du modèle multi variable se révèle cependant complexe. Dans un souci de fournir une méthodologie opérationnelle la démarche initiale a donc été préférée à cette autre option.

D'après les résultats obtenus, elle est adaptée à la réalisation de bilans régionaux mensuels, saisonniers ou annuels dans les zones où l'on dispose de données de

campagnes suffisamment nombreuses dans le temps et l'espace et de variables auxiliaires. Sa mise en pratique est relativement aisée.

A l'échelle de la France, la définition d'un modèle uniforme de correction ne paraît pas actuellement envisageable : il faudrait disposer de données de campagnes sur toutes les régions françaises et la relation entre le NO₂ et les variables auxiliaires n'est pas nécessairement la même dans chaque région.

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.

Cárdenas G. et Malherbe L., 2007. Cartographie locale du dioxyde d'azote à partir des simulations PREV'AIR (2/2), Travaux relatifs à la plate-forme nationale de modélisation PREV'AIR. Rapport LCSQA, www.lcsqa.org.

7. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
ANNEXE 1	REGION CENTRE - ERREUR ABSOLUES PAR MOIS ET STATISTIQUES ANNUELLES PAR STATION VIRTUELLE	1
ANNEXE 2	REGION CENTRE - ERREUR RELATIVES PAR MOIS ET STATISTIQUES ANNUELLES PAR STATION VIRTUELLE	1

ANNEXE 1 : REGION CENTRE - ERREUR ABSOLUES PAR MOIS ET STATISTIQUES ANNUELLES PAR STATION VIRTUELLE

No.	VILLE	jan	fév	mar	avr	mai	jui	jui	aoû	sep	oct	nov	déc	NB	MIN	MOY	MAX	ECART	CV
1	Les Châtelets	0.3	-1.8	-2.8	0.1	1.3	-0.1	0.3	0.1	-2.0	3.4	-3.1		11	-3.1	-0.4	3.4	1.8	27
2	Dreux	3.0		5.1	-2.1	1.7	-0.7	2.2	-1.2	1.0	-3.6	2.5	3.0	11	-3.6	1.0	5.1	2.5	13
3	Néron	1.0	-2.6	-3.2	-2.5	1.0	0.0	-0.4	-0.8	-2.9	-0.2	-3.9	0.0	12	-3.9	-1.2	1.0	1.6	17
5	Combres	-1.7	0.6	-2.1	-2.0		0.0	0.5	0.4	-0.8	-3.2	-1.4	4.8	11	-3.2	-0.5	4.8	2.0	27
8	Pithiviers	-2.5	-6.5	1.2	-3.5	-0.8	-2.7	1.6	1.6	0.3	0.6	3.2	-1.5	12	-6.5	-0.7	3.2	2.6	17
9	Malesherbes	1.4	-2.7	-1.9	0.2	0.6	-0.1	-2.2	1.1	1.3	1.9	-0.9	-1.4	12	-2.7	-0.2	1.9	1.5	11
10	Danze	0.0	-3.2	-5.3	-4.7	0.7	0.1	1.5	-0.5	-2.3	0.6	-4.5	1.2	12	-5.3	-1.4	1.5	2.4	23
11	Vendôme		-2.5	-5.0	-1.2	0.8	-0.1	1.7	0.6	1.4	5.2	-1.7		10	-5.0	-0.1	5.2	2.6	22
12	Châteaudun	2.9	-1.4	-1.5	-2.0	-1.3	-2.9	-1.8	-1.6	-1.2	2.5	-2.7	0.6	12	-2.9	-0.9	2.9	1.8	13
13	Beaugency	4.2	-3.7	-1.6	-3.9	-0.3	-1.5	0.5	0.8	-1.3	-1.8	0.9		11	-3.9	-0.7	4.2	2.2	17
14	Orléans	6.3	-2.1	4.5	0.6	5.0	2.9	-2.0	2.6	1.0	1.9	1.2	1.5	12	-2.1	2.0	6.3	2.4	13
15	Chilleurs-aux-Bois	1.2	-5.4	-2.6	-3.0	2.0	2.2	3.2	0.3	-7.6	-2.1	-3.8	-1.6	12	-7.6	-1.4	3.2	3.2	29
16	Chateaufort-sur-Loire	0.5	-4.8	-0.4	-4.1	1.1	1.6	0.8	-0.5	-1.2	-0.8	-1.9	1.6	12	-4.8	-0.7	1.6	2.0	16
17	Gien	3.8	-0.1	1.7	1.1	3.6	3.5	0.6		2.9		-1.7	2.5	10	-1.7	1.8	3.8	1.7	11
18	Montargis	1.4	-6.4	-1.3	-5.0	0.6	0.4	-3.9	-1.5	-3.2	-3.4	-6.4	-0.9	12	-6.4	-2.5	1.4	2.5	18
19	Saint Hilaire les Andresi	1.6	-3.6	0.0	0.0	0.1	-1.2	3.2	1.3				0.4	9	-3.6	0.2	3.2	1.8	15
21	Tours	6.0	1.9	-1.9	1.7	-0.1	-1.3	-4.6	4.4				2.8	9	-4.6	1.0	6.0	3.1	17
22	Chateau-Renault	2.3	-3.3	-1.9	-1.2	-1.2	-2.7	-0.9	0.0	1.8	2.7	-1.8	1.8	12	-3.3	-0.4	2.7	1.9	14
23	Pocé-sur-Cisse	1.3	-1.1	-2.8	-5.3	0.4	0.6		-1.1	-2.7	-2.5	-2.1	-0.6	11	-5.3	-1.4	1.3	1.8	16
24	Blois	5.3	-5.2	-0.9	-4.9	2.1	1.4	-4.9	0.9	-1.6	-0.2	-6.2	-2.9	12	-6.2	-1.4	5.3	3.4	19
25	Ouchamps	1.9	-4.4	-3.3	-3.4	1.0	1.6	-0.6	0.2	-1.9	-0.9	-1.9	0.7	12	-4.4	-0.9	1.9	2.0	23
26	Rougeou	-1.1	-3.5	-3.5	-4.1	-0.5	0.6	-1.2	-0.8	-2.3	-2.8	-4.9	1.0	12	-4.9	-1.9	1.0	1.8	28
27	Romorantin	2.3	-0.3	-2.0	-4.9	1.6	1.7	-0.5	0.2	-2.4	-4.1	-4.1	2.7	12	-4.9	-0.8	2.7	2.5	29
28	Vouzon	2.4	-3.3	-0.4	-3.9	1.6	1.1	0.4	0.0	-2.2	-1.4	-0.9	0.8	12	-3.9	-0.5	2.4	1.8	23
29	Sainte-Montaine	0.5	-3.3	-2.4	-1.7	1.0		7.9	0.4	-2.2	-1.0	-1.4	-1.5	11	-3.3	-0.3	7.9	2.9	45
30	Savigny en Sancerre	-0.3	-3.5	-2.8	-0.9	0.5	0.1	4.7	1.6	0.7	0.7	-2.4	-1.0	12	-3.5	-0.2	4.7	2.1	28
31	Chinon	1.9	-3.0	-2.1	-3.4	1.9	1.8	-3.0	0.2	-0.2	0.5	-1.9	-1.9	12	-3.4	-0.8	1.9	1.9	18
32	Beauleu-Lès-Loches	0.8	-3.5	-3.3	-4.7	1.6	1.6		0.8		-2.3	-2.8	0.1	10	-4.7	-1.2	1.6	2.3	28
33	Bretagne	0.2	-2.2	-2.2	-1.6	0.7	0.0	0.3	2.1	-0.4	0.4	-4.2	0.0	12	-4.2	-0.6	2.1	1.6	30
35	Arcay	0.0	-3.0	-2.2	-2.8	-0.8	-0.9	3.8	-1.0	11.4	-1.9	-2.4	1.9	12	-3.0	0.2	11.4	3.9	48
36	Bourges	-0.7	-2.6	1.3	-7.2	-2.5	-2.2	-9.3	-3.4	-2.0	-10.3	-4.4	-6.6	12	-10.3	-4.1	1.3	3.4	21
37	Saint Hilaire De Gondilly	0.2	-2.9	-2.4	-2.0	0.0	-0.7	2.3	0.6	0.3	0.5	-0.6	2.6	12	-2.9	-0.2	2.6	1.6	29
40	Saint-Marcel	-0.3	-3.2	-0.9	-1.4	-1.1		-3.6	0.6	-0.3	0.0	-0.8	-0.2	11	-3.6	-1.0	0.6	1.2	13
42	Vicq-Exempt	-0.3	-1.8			-0.7	-0.4	3.6	2.0	-1.6	-1.3	-1.6	0.6	10	-1.8	-0.1	3.6	1.6	39
43	Saint-Amand-Montrond		-0.2	-2.8	-3.2	0.1	-0.4				-1.0	2.1	3.0	8	-3.2	-0.3	3.0	2.0	20
44	Bourges Leblanc	1.9	-0.9	-2.2	-2.8	-0.1	1.0	3.8	1.6	1.8	1.3	0.3	0.1	12	-2.8	0.5	3.8	1.8	12
45	Blois Centre	5.3	-4.4	0.9	2.4	0.4	-0.7	0.5	-0.8	2.1	0.9	-3.0	0.7	12	-4.4	0.4	5.3	2.4	13
46	Tours Joue	3.7	-4.3	0.1	-5.1	1.7	1.2	4.9	-2.1	-2.1	-5.0	-4.0	-6.0	12	-6.0	-1.4	4.9	3.5	20
47	Orléans St Jean	0.6	-7.1	-4.1	-6.9	-4.5	-5.8	-6.2	-2.3	-0.4	-6.5	-7.6	-6.7	12	-7.6	-4.8	0.6	2.6	15
48	Chartres Luce	4.4	2.4	-2.0	-2.0	1.4	1.4	-5.0	1.0	2.8	3.6	-1.1	1.3	12	-5.0	0.7	4.4	2.6	14
49	Châteauroux-Déols	17.5	-0.8	0.3	-2.0	0.2	-0.2	3.6	-0.9	-1.2	-4.5	-4.1	1.0	12	-4.5	0.7	17.5	5.5	40

ANNEXE 2 : REGION CENTRE - ERREUR RELATIVES PAR MOIS ET STATISTIQUES ANNUELLES PAR STATION VIRTUELLE

No.	VILLE	jan	fév	mar	avr	mai	jui	jui	aoû	sep	oct	nov	déc	NB	MIN	MOY	MAX
1	Les Châtelets	3	-24	-39	1	27	-3	8	2	-34	26	-41		11	-41	-7	27
2	Dreux	14		20	-10	14	-6	18	-12	6	-14	9	10	11	-14	4	20
3	Néron	8	-28	-30	-23	17	0	-10	-13	-36	-1	-31	0	12	-36	-12	17
5	Combres	-28	6	-31	-26		-1	13	9	-14	-33	-16	29	11	-33	-8	29
8	Pithiviers	-18	-58	5	-22	-9	-34	16	14	2	3	12	-7	12	-58	-8	16
9	Malesherbes	8	-18	-11	1	6	-1	-39	12	10	11	-5	-8	12	-39	-3	12
10	Danze	0	-31	-56	-47	11	1	21	-6	-24	4	-35	7	12	-56	-13	21
11	Vendôme		-16	-36	-9	10	-2	23	10	12	26	-9		10	-36	1	26
12	Châteaudun	15	-9	-9	-13	-15	-36	-24	-19	-10	12	-14	3	12	-36	-10	15
13	Beaugency	25	-41	-11	-24	-3	-24	8	8	-10	-9	5		11	-41	-7	25
14	Orléans	25	-11	16	3	40	25	-32	19	5	8	5	6	12	-32	9	40
15	Chilleurs-aux-Bois	9	-59	-19	-23	28	31	39	4	-144	-14	-25	-10	12	-144	-15	39
16	Chateaufort-sur-Loire	4	-49	-2	-34	15	20	12	-6	-10	-5	-11	8	12	-49	-5	20
17	Gien	22	-1	9	6	34	34	8		17		-9	12	10	-9	13	34
18	Montargis	8	-51	-7	-31	7	5	-131	-18	-23	-18	-34	-4	12	-131	-25	8
19	Saint Hilaire les Andresi	10	-32	0	0	1	-18	31	15				3	9	-32	1	31
21	Tours	24	9	-9	8	-1	-11	-80	26				10	9	-80	-3	26
22	Chateau-Renault	13	-23	-12	-8	-14	-38	-11	0	13	15	-11	9	12	-38	-6	15
23	Pocé-sur-Cisse	10	-8	-22	-51	7	10		-16	-27	-18	-13	-4	11	-51	-12	10
24	Blois	21	-31	-4	-25	19	14	-136	7	-9	-1	-28	-12	12	-136	-15	21
25	Ouchamps	16	-64	-35	-36	20	29	-19	3	-23	-7	-14	5	12	-64	-10	29
26	Rougeou	-14	-58	-49	-62	-13	12	-45	-16	-36	-33	-65	8	12	-65	-31	12
27	Romorantin	19	-3	-19	-66	27	28	-14	3	-32	-47	-39	17	12	-66	-11	28
28	Vouzon	21	-50	-3	-55	29	22	10	0	-33	-14	-7	7	12	-55	-6	29
29	Sainte-Montaine	7	-82	-42	-27	22		71	8	-50	-14	-18	-21	11	-82	-13	71
30	Savigny en Sancerre	-4	-50	-34	-11	11	1	57	31	10	8	-26	-9	12	-50	-1	57
31	Chinon	14	-29	-16	-31	24	23	-110	3	-1	3	-13	-13	12	-110	-12	24
32	Beaulieu-Lès-Loches	8	-51	-39	-68	35	37		15		-23	-24	1	10	-68	-11	37
33	Bretagne	2	-36	-34	-33	19	-1	12	44	-10	5	-87	0	12	-87	-10	44
35	Arcay	1	-51	-28	-41	-21	-25	47	-22	58	-24	-27	15	12	-51	-10	58
36	Bourges	-3	-13	6	-44	-21	-18	-542	-35	-13	-58	-20	-30	12	-542	-66	6
37	Saint Hilaire De Gondilly	3	-62	-42	-49	1	-27	45	16	6	8	-8	24	12	-62	-7	45
40	Saint-Marcel	-3	-41	-7	-15	-20		-117	7	-3	0	-6	-2	11	-117	-19	7
42	Vicq-Exempt	-8	-52			-33	-15	58	38	-52	-28	-33	9	10	-52	-12	58
43	Saint-Amand-Montrond		-1	-27	-45	3	-9				-11	13	18	8	-45	-7	18
44	Bourges Leblanc	10	-5	-12	-22	-1	11	38	20	14	8	1	0	12	-22	5	38
45	Blois Centre	22	-27	4	11	4	-6	5	-6	11	4	-12	3	12	-27	1	22
46	Tours Joue	16	-25	1	-28	15	12	35	-20	-12	-25	-17	-31	12	-31	-7	35
47	Orléans St Jean	3	-42	-18	-36	-43	-59	-93	-19	-2	-33	-32	-31	12	-93	-34	3
48	Chartres Luce	17	9	-9	-11	11	10	-96	8	16	15	-5	5	12	-96	-3	17
49	Châteauroux-Déols	57	-6	2	-16	3	-2	35	-12	-11	-40	-24	5	12	-40	-1	57