



Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



Etude n° 11- Plate-forme nationale de modélisation

Application de modèles grande échelle à la problématique régionale : cartographie de l'ozone et du dioxyde d'azote

Novembre 2004

Convention : 04000087

Cécile HONORE - Laure Malherbe



VERSION FINALE



Financée par la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques (DPPR)

Novembre 2004

Cécile HONORÉ, Laure MALHERBE

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Cécile HONORÉ Laure MALHERBE	Laurence ROUÏL	Martine RAMEL
Qualité	Ingénieurs Etudes et Recherches Direction des Risques Chroniques	Ingénieur Etudes et Recherches Direction des Risques Chroniques	Coordination LCSQA Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. Résumé.....	5
2. Introduction	7
PARTIE 1 - CARTOGRAPHIE DE L'OZONE	
3. Présentation des données utilisées.....	11
3.1 Données modèle	11
3.2 Données d'observation.....	11
Critère de choix des stations d'analyse	11
3.3 Données additionnelles	12
3.3.1 Données d'occupation du sol	12
3.3.2 Données d'altitude.....	12
3.3.3 Données d'émissions de NOx	13
4. Demarche.....	15
4.1 Tests réalisés	15
4.2 Critères de comparaison.....	15
5. Cartographie du pic - résultats de l'analyse de sensibilité.....	17
5.1 Krigeage des innovations : sensibilité aux paramètres du variogramme	17
5.1.1 Paramètres testés	18
5.1.2 Résultats toutes stations confondues	20
5.1.3 Résultats par AASQA	24
5.1.4 Résultats par station	27
5.1.5 Remarque sur les zones urbaines	30
5.2 Krigeage des innovations : introduction de variables auxiliaires	31
5.2.1 Etude des corrélations	31
5.2.2 Krigeage des innovations avec l'altitude en dérive externe	33
5.3 Krigeage des observations avec le modèle en dérive externe.....	38
5.3.1 Résultats toutes stations confondues	38
5.3.2 Résultats par AASQA	39
5.3.3 Résultats par station	40
5.4 Krigeage des observations avec le modèle et l'altitude en dérive externe.....	41
5.4.1 Résultats toutes stations confondues	41
5.4.2 Résultats par AASQA	42
5.4.3 Résultats par station	43
5.5 Exemples de cartographies.....	46
15/06/2003	47
25/06/2003	49
12/08/2003	51
6. Conclusion de la partie 1.....	53
7. Présentation des données utilisées.....	55
7.1 Données modèle	55
7.2 Données d'observation.....	55
7.3 Données additionnelles	56
7.3.1 Données de taux d'urbanisation	56
7.3.2 Données d'émissions de NOx	56
8. Evaluation statistique des méthodes de krigeage.....	57
8.1 Tests réalisés	57
8.2 Validation croisée	57
8.3 Vérification sur un jeu de stations indépendantes.....	57

8.4	Indicateurs statistiques calculés	58
9.	Krigeage des innovations: influence des paramètres de krigeage.....	59
9.1	Expériences réalisées	59
9.2	Résultats statistiques	60
9.3	Résultats cartographiques	62
10.	Résultats pour les autres méthodes de krigeage	67
10.1	Expériences réalisées	67
10.2	Résultats statistiques	68
10.3	Résultats cartographiques	69
11.	Conclusions et perspectives de la partie 2	73
12.	Références.....	75
13.	Liste des annexes.....	76

1. RESUME

Au début de l'été 2003, à la suite d'une première expérience conduite par le Laboratoire de Statistique d'Orsay sur la région Grand Ouest, une procédure d'adaptation statistique du modèle CHIMERE à l'échelle de la France a été implantée dans le système PREV'AIR. Fondée sur la méthode dite « krigeage des innovations », elle a pour but de corriger par les observations les simulations des concentrations d'ozone. Ainsi PREV'AIR délivre chaque matin une cartographie, ou carte d'analyse, du pic d'ozone de la veille.

Par une analyse de sensibilité, ce travail a pour but d'affiner le traitement cartographique de l'ozone réalisé dans PREV'AIR. Une série de tests menés sur la période 14-29 juin 2003- 31 juillet-12 août 2003 a été réalisée afin d'évaluer l'influence :

- des principaux paramètres du krigeage (paramètres du variogramme) ;
- de l'utilisation de variables secondaires en dérive externe ;
- du mode de correction du modèle (krigeage des innovations / krigeage des observations avec CHIMERE en dérive).

Plusieurs indicateurs statistiques calculés dans l'espace et/ou le temps sur la France, par AASQA et par station de mesure ont servi de critère de comparaison pour départager les méthodes.

Le krigeage des innovations, tel qu'il est aujourd'hui mis en œuvre dans PREV'AIR, se révèle efficace pour corriger le modèle en zones rurale et périurbaine et le choix actuel de paramètres est pertinent. En revanche, la correction apportée en zone urbaine tend parfois à dégrader le modèle et demande à être encore améliorée.

Deux modes d'analyse ont été comparés : 1) le krigeage des innovations, c'est-à-dire le krigeage des différences entre mesure et modèle, auquel est ajoutée la carte simulée par CHIMERE ; 2) le krigeage des observations avec le modèle en dérive externe. D'autre part, la variable altitude, qui présente avec les innovations ou avec les concentrations d'ozone une certaine corrélation, a été introduite comme dérive externe. Les cartographies obtenues par le krigeage des innovations ou des observations, avec ou sans l'altitude en dérive, conservent la structure générale du champ de concentration. Les différences portent principalement sur le degré de détail de la correction, qui est plus élevé lorsque la variable en dérive est corrélée à la variable d'étude.

Du point de vue de l'efficacité des méthodes, les indicateurs statistiques ne répondent pas tous de la même façon à chaque test, ce qui rend la comparaison délicate. Les statistiques sur toute la France et les histogrammes des statistiques par station donnent plutôt l'avantage au krigeage des observations avec le modèle et l'altitude en dérive externe. Vient en seconde position le krigeage des innovations avec l'altitude en dérive. Les statistiques spatio-temporelles par zone géographique (ici par AASQA) et par type de station permettent moins aisément de classer les méthodes. Le krigeage des observations avec dérive externe semble plus efficace en zone urbaine.

La seconde partie du rapport est une étude de faisabilité consacrée à la cartographie du dioxyde d'azote. Le caractère "local" des concentrations de dioxyde d'azote rend impossible une simple transposition à ce polluant des méthodes d'adaptation statistiques développées pour la cartographie de l'ozone. C'est pourquoi une série de tests a été menée sur l'été 2003 (période du 15 juin au 15 septembre) afin d'évaluer l'influence sur la bonne représentation -

par comparaison aux observations disponibles - des concentrations moyennes journalières de dioxyde d'azote :

- des principaux paramètres du krigeage (paramètres du variogramme) ;
- de l'utilisation de variables secondaires en dérive externe (émissions de NO_x ou le taux d'urbanisation) ;
- du mode de correction du modèle (krigeage des innovations / krigeage des observations avec le modèle CHIMERE en dérive).

Plusieurs indicateurs statistiques calculés dans l'espace et/ou le temps sur la France et par station de mesure ont servi de critère de comparaison pour évaluer les méthodes.

Dans toutes les expériences réalisées, le krigeage a pour effet de détériorer de façon importante les moyennes journalières des concentrations de dioxyde d'azote évaluées aux stations rurales.

En revanche, le krigeage améliore les moyennes journalières des concentrations de dioxyde d'azote évaluées aux stations périurbaines: les indicateurs calculés sur les stations périurbaines sont relativement stables, et les gains sont importants sur tous. Ainsi, le gain sur le biais varie entre 86 et 98%; celui sur la RMSE, entre 20 et 25%; celui sur la corrélation, entre 36 et 50%. Le krigeage améliore également les moyennes journalières des concentrations de dioxyde d'azote évaluées aux stations urbaines: les gains - calculés en validation croisée - sur les RMSE et les corrélations sont généralement de l'ordre de 40% et de plus de 100%, respectivement. Le gain sur le biais est de l'ordre de 75%, et atteint 93% pour la méthode de krigeage des observations avec le modèle et les émissions de NO_x ou le taux d'urbanisation en dérive externe.

Si les méthodes de krigeage mises en œuvre ont des performances statistiques à peu près similaires, les cartes de concentrations peuvent être différentes. C'est notamment le cas pour les méthodes de krigeage des observations avec le modèle et les émissions de NO_x ou le taux d'urbanisation en dérive externe ou des innovations avec les émissions de NO_x en dérive externe: la correction apportée par le krigeage a pour effet de diminuer de façon importante les concentrations de dioxyde d'azote autour de certaines grandes agglomérations.

2. INTRODUCTION

La cartographie des champs de pollution atmosphérique est une priorité pour la surveillance de la qualité de l'air, celle-ci étant un support idéal de l'évaluation de la qualité de l'air sur l'ensemble du territoire telle que demandée par la loi sur l'air de 1996. Or la surveillance par la mesure fixe est coûteuse en équipement et en maintenance, de sorte qu'il existe en France, selon les polluants, de grandes régions peu couvertes par les observations de routine des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA)

Par ailleurs, la dernière décennie a vu le développement de modèles de simulation de la qualité de l'air - géostatistiques ou déterministes -, qui permettent une estimation spatialisée des champs de polluants. Néanmoins, le développement et la mise en œuvre de tels modèles peut être coûteuse en moyens humains.

Depuis le printemps 2003, le système PREV'AIR¹ de modélisation déterministe de la qualité de l'air délivre quotidiennement des prévisions - à trois jours d'échéance - et des simulations - pour la veille - des concentrations de polluants atmosphériques (ozone, dioxyde d'azote, particules) à grande échelle sur l'Europe de l'Ouest. En plus des cartes diffusées sur Internet, les données numériques des concentrations calculées par le modèle Chimère sont téléchargeables par les organismes qui en font la demande. Ainsi, plus d'une vingtaine d'AASQA dispose aujourd'hui d'un compte sur PREV'AIR et accèdent quotidiennement aux prévisions et simulations obtenues à l'INERIS. Depuis l'été 2004, le système fournit également une information à plus haute résolution (de l'ordre de 10 km) sur la France, relative aux concentrations d'ozone et de dioxyde d'azote.

L'objet de cette étude est double. La première partie explore les possibilités offertes par les méthodes d'analyse de PREV'AIR pour la cartographie de l'ozone. Le dernier chapitre est une étude de faisabilité sur la cartographie du dioxyde d'azote.

Cartographie de l'ozone (partie 1)

Chaque jour, une carte analysée des concentrations maximales d'ozone est élaborée pour la France ; elle est actualisée en début et en fin d'après-midi ainsi qu'au matin du jour suivant². Elle résulte de l'intégration dans les simulations des observations transmises en temps réel à la base de données BASTER (ADEME). L'approche mise en œuvre est le *krigeage des innovations*. Fondée sur la technique géostatistique du krigeage, elle consiste à ajouter au modèle une combinaison linéaire des erreurs calculées aux stations de mesure (*i.e.* des différences entre les concentrations observées et modélisées). La Figure 1 rappelle le principe général de l'analyse.

¹ mis en place à l'INERIS en collaboration avec le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) du CNRS et l'ADEME

² Ces analyses ont un délai de mise à jour de trois jours, afin de prendre en compte d'éventuelles corrections des observations.

D'autres procédures de krigeage, qui ne sont pas encore opérationnelles dans PREV'AIR, permettent d'introduire des variables externes comme les émissions, l'occupation du sol ou l'altitude. Elles ont été étudiées par le Laboratoire de Statistique d'Orsay et le CNRS et appliquées à la région Grand Ouest³ [1]. Des programmes informatiques ont été développés à cette fin à l'aide du logiciel R, outil de programmation statistique en libre accès sur Internet. Un guide de prise en main de ces programmes, rédigé par l'INERIS [2], est disponible sur le site Internet du LCSQA.

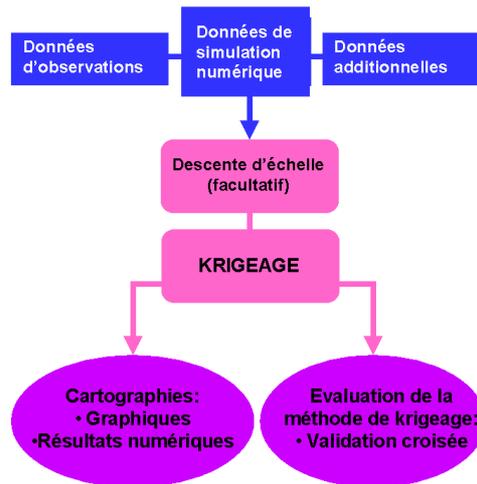


Figure 1 – Principe de l'analyse

Le but de ce travail est d'améliorer le traitement cartographique réalisé dans PREV'AIR en affinant le choix des paramètres de krigeage et en introduisant si nécessaire des variables auxiliaires. Une analyse de sensibilité est conduite à cette fin. Des indicateurs statistiques de performance calculés à l'issue de chaque test fournissent des critères de comparaison entre les différents jeux de paramètres ou les différents types de krigeage. La qualité des estimations est examinée de façon globale, à l'échelle de la France, et par zone géographique (par AASQA).

³ i.e. la Vendée, le Poitou, les Pays de la Loire, la Basse-Normandie et l'Est de la région Centre. Etude LCSQA, conduite en collaboration avec AIR PL, ATMO PC, LIG'AIR, AIRCOM et AIR BREIZH.

Cartographie du dioxyde d'azote (partie 2)

Malgré l'augmentation de la résolution spatiale du modèle CHIMERE⁴, la qualité des simulations des champs de polluants tels que le dioxyde d'azote, fortement influencé par les sources locales, reste inférieure à celle d'un polluant comme l'ozone, dont les concentrations sont certes dépendantes des émissions, mais dont les niveaux de fond sont plutôt influencés par les processus de transformations physico-chimiques et de transport à longue distance.

Une approche pragmatique consisterait à utiliser l'ensemble des informations disponibles - observations de routine des AASQA et résultats de simulation tels que ceux issus de PREV'AIR - pour cartographier les champs de dioxyde d'azote avec une résolution relativement fine. Néanmoins, le caractère "local" des concentrations de dioxyde d'azote rend impossible une simple transposition à ce polluant des méthodes d'adaptation statistique – dites « de krigeage » - développées pour la cartographie des concentrations d'ozone. A la demande du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA), une étude de faisabilité a donc été menée, avec pour objectif de répondre à la question suivante: **moyennant une adaptation statistique basée sur l'utilisation des observations de routine des AASQA, est-il possible d'utiliser les sorties d'un modèle de simulation de la qualité de l'air à relativement haute résolution – le modèle CHIMERE-Régional - pour cartographier les champs de dioxyde d'azote à l'échelle de la France?**

⁴ Le système PREV'AIR met en œuvre les versions "continentale" (i.e. sur l'Europe) et "régionale" (i.e. sur la France) du modèle CHIMERE développé depuis 1996 par l'IPSL/CNRS.

Première partie : cartographie de l'ozone

3. PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES

3.1 DONNEES MODELE

Les données modèle utilisées dans cette étude sont les sorties du modèle CHIMERE, version V200402D, mis en œuvre dans une configuration « régionale » :

- à l'échelle de la France (domaine horizontal de 5° Ouest à 10° Est, et de 41° Nord à 52° Nord)
- à une résolution spatiale de 0.15° en longitude et de 0.10° en latitude, soit environ 10km dans les deux directions. Il y a donc $101^2=11211$ points de grille modèle
- Seule la chimie gazeuse a été activée.

Nous utilisons les données modèles issues d'une simulation de la période estivale 2003, effectuée à l'aide des analyses météorologiques globales du NCEP (National Centers for Environmental Prediction⁵).

Une description détaillée du modèle est disponible sur Internet à l'adresse suivante :

<http://euler.lmd.polytechnique.fr/chimere>.

3.2 DONNEES D'OBSERVATION

Les données d'observation d'ozone proviennent de la base de données en temps réel BASTER (ADEME).

Les concentrations maximales journalières d'ozone, calculées à partir des valeurs horaires de concentration, ont été exploitées en priorité.

Les mesures utilisées ont été effectuées sur des stations rurales, périurbaines et urbaines. On n'a pas retenu, sauf cas exceptionnel, les stations de mesure de type trafic et industriel.

Critère de choix des stations d'analyse

La liste des stations servant effectivement à corriger les concentrations d'ozone calculées par le modèle CHIMERE a été mise à jour en juin 2004, après consultation de l'ensemble des AASQA. Ces stations doivent fournir une information dont l'échelle de représentativité spatiale est comparable à celle du modèle. Aussi les stations de type rural ont-elles été sélectionnées prioritairement. Etant donné la résolution du modèle (environ 10 km), des stations périurbaines ont été également considérées.

Afin d'obtenir une couverture satisfaisante du domaine d'étude, ce jeu de stations a été complété par des sites urbains représentatifs de certains phénomènes de panache et par quelques stations industrielles qui, pour l'ozone, réagissent comme des stations rurales. Le choix de ces sites repose sur l'expérience de terrain des AASQA.

La figure ci-dessous présente l'ensemble des stations utilisées pour la cartographie de l'ozone.

⁵ <http://wwwt.ncep.noaa.gov/>

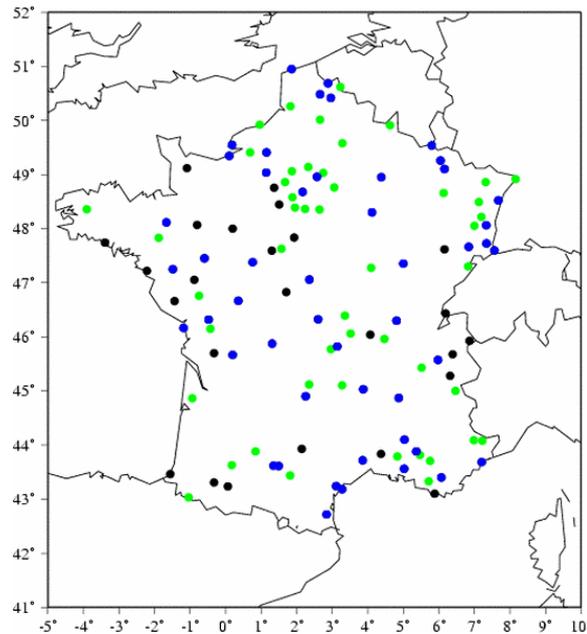


Figure 3-1 Stations utilisées pour la cartographie de l’ozone. Les stations rurales sont en vert, les périurbaines en bleu, les urbaines en noir.

3.3 DONNEES ADDITIONNELLES

Plusieurs variables secondaires, susceptibles d’influencer les concentrations de dioxyde d’ozone ont été considérées.

3.3.1 Données d’occupation du sol

Elles sont issues de la base de données GLCF (Global Land Cover Facility⁶). Elles représentent la fraction de sol (comprise entre 0 et 1) occupée par chacune des classes suivantes :

- cultures ;
- prairies ;
- sol nu ;
- sol urbanisé ;
- arbustes ;
- forêts (2 catégories)
- mers, océans

Les données de départ ont une résolution de 1 km ; pour chaque classe, on en a déduit un taux moyen d’occupation sur chacune des cellules de la grille modèle.

3.3.2 Données d’altitude

On a utilisé les données de terrain produites par la version 3 (release 3-6) du programme de terrain associé au système de modélisation météorologique mésoéchelle MM5 Version 3, développé par le NCAR (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5v3.html>). Ce programme a généré des données de terrain sur une grille recouvrant la France, avec une résolution approximative de 10 km x 10 km. Ces données d’altitude ont été interpolées sur la grille modèle.

⁶ <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>

3.3.3 Données d'émissions de NOx

Elles sont issues de la base de données EMEP⁷ pour l'année 2001. Ce sont ces données qui sont fournies pour l'ensemble des polluants en entrée du modèle CHIMERE-Régional pour la simulation de l'année 2003.

Les données de départ sont disponibles sur la grille « EMEP » de résolution 50 km x 50 km. Il s'agit de données annuelles, fournies par secteur d'activité SNAP. Elles ont été redistribuées en espace (résolution spatiale de 1 km x 1 km) et en temps (résolution horaire), et regroupées en données d'émission d'espèces modèles, de façon cohérente avec les exigences du modèle.

⁷ <http://www.emep.int/>

4. DEMARCHE

N.B. : Le principe des techniques de krigeage mises en œuvre dans cette étude est rappelé succinctement dans ce rapport. Pour une description plus détaillée, on peut se rapporter au guide d'utilisation [2].

4.1 TESTS REALISES

L'essentiel du travail est consacré à la cartographie du pic d'ozone. L'usage de certaines variables secondaires (émissions, concentrations de NO₂) dont les valeurs varient dans le temps, semble mieux adapté à une cartographie horaire. Ce point, qui a fait l'objet de calculs complémentaires, est mentionné en conclusion.

a) Tests pour la cartographie du pic

- **Krigeage des innovations - analyse de sensibilité aux paramètres du variogramme** : on fait varier **un par un** les paramètres de calcul du variogramme expérimental et les paramètres d'ajustement du modèle variographique ;
- **Krigeage des innovations - analyse de sensibilité aux variables auxiliaires** : on introduit une par une, en tant que dérive externe, des variables potentiellement explicatives ;
- **Analyse de sensibilité à la méthodes de krigeage** : le krigeage des innovations est remplacé par un krigeage des observations avec le modèle Chimère en dérive externe.

b) Tests pour la cartographie à une heure donnée

L'analyse porte sur les relations entre les observations d'ozone ou les innovations à une heure précise de la journée (16hTU choisie ici comme exemple) et des variables auxiliaires potentiellement explicatives : émissions de NO_x, concentrations de NO₂. Elle est conduite dans l'optique d'un krigeage avec dérive externe ou d'un cokrigeage.

Les calculs font appel à deux fichiers de stations de mesure :

- un **fichier d'analyse**, qui contient la liste des stations effectivement utilisées dans le krigeage.
- un **fichier de vérification**, complémentaire du précédent, qui contient la liste des stations rurales, périurbaines et urbaines non retenues dans le krigeage et réservées à l'évaluation.

L'ensemble du travail est réalisé avec R (version 1.9.1), logiciel de statistique librement téléchargeable sur Internet (<http://cran.cict.fr/>), et avec plusieurs librairies associées (akima, chron, geoR, gstat, splancs).

4.2 CRITERES DE COMPARAISON

Afin de mesurer l'incidence de la modification d'un paramètre, chaque test donne lieu à deux évaluations :

- La première est la méthode de **validation croisée**. Elle consiste à éliminer temporairement une station du fichier d'analyse puis à estimer par krigeage la concentration en ce point l'aide des stations restantes. Cette opération est répétée pour toutes les stations du fichier.

Ainsi, on dispose pour chacune d'elles d'une concentration estimée \hat{Z}_i^a et d'une valeur observée Z_i^a .

Remarque : deux validations croisées sont en fait réalisées. Dans la première, le variogramme expérimental est systématiquement recalculé sur le jeu de stations restantes et un nouveau modèle est réajusté. Dans la seconde, le modèle de variogramme établi pour l'ensemble des stations est conservé.

- La seconde est une **vérification sur un jeu de stations indépendant**. Le krigeage des innovations est effectué aux stations exclues de l'analyse. Pour chacune d'elles, on dispose comme précédemment d'une concentration estimée \hat{Z}_i^y et d'une valeur observée Z_i^y .

Le variogramme utilisé est le modèle défini sur les stations d'analyse.

A l'issue de chaque évaluation, différents indicateurs statistiques, encore appelés scores, sont calculés. Soient $Z_i, i=1 \dots N$, un ensemble d'observations et \hat{Z}_i les concentrations estimées aux mêmes points, les indicateurs considérés sont :

Biais normalisé (BN)	$BN = \frac{1}{N} \cdot \sum \frac{\hat{Z}_i - Z_i}{Z_i} \cdot 100\%$
Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum (\hat{Z}_i - Z_i)^2}$
Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (NMSE)	$NMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \cdot \sum (\hat{Z}_i - Z_i)^2}{\left(\frac{1}{N} \sum \hat{Z}_i\right) \left(\frac{1}{N} \sum Z_i\right)}}$
Coefficient de corrélation (ρ)	$\rho = \frac{\text{cov}(\hat{Z}_i, Z_i)}{\sqrt{\text{var}(\hat{Z}_i)} \cdot \sqrt{\text{var}(Z_i)}}$

Les statistiques présentées dans la suite du rapport sont calculées :

- jour par jour, sur l'ensemble des stations (statistiques spatiales)
- sur l'ensemble des jours et des stations (statistiques spatio-temporelles) ;
- sur l'ensemble des jours et des stations, par zone géographique (statistiques spatio-temporelles) ;
- sur l'ensemble des jours, station par station (statistiques temporelles).

5. CARTOGRAPHIE DU PIC - RESULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE

Deux quinzaines estivales ont été sélectionnées pour ces tests :

- période du 14 juin 2003 au 29 juin 2003 ;
- période du 31 juillet 2003 au 14 août 2003.

N.B. : les fichiers d'analyse et de vérification, mis à jour en juin 2004, ont fait l'objet de quelques modifications ultérieures (ajout de stations, corrections de coordonnées). L'analyse de sensibilité aux paramètres du variogramme a été réalisée avec les fichiers de juin 2004. En revanche, tous les autres calculs utilisent les fichiers de novembre 2004. Afin de permettre la comparaison entre les différents tests, les calculs pour le cas de référence ont été effectués avec les deux versions de fichiers.

5.1 KRIGEAGE DES INNOVATIONS : SENSIBILITE AUX PARAMETRES DU VARIOGRAMME

Rappel :

Dans le krigeage des innovations, l'estimateur de la concentration d'ozone en un point s de la grille s'écrit

$$\hat{Z}(s) = \text{mod}(s) + \sum_i \lambda_i \tilde{Z}(s_i)$$

- $\text{mod}(s)$ est la valeur du modèle Chimère au point s .
- $\tilde{Z}(s_k)$ est l'innovation à la station de mesure s_k , calculée par la relation :

$$\tilde{Z}(s_k) = Z(s_k) - \text{mod}(s_k)$$

$Z(s_k)$: observation au point s_k

$\text{mod}(s_k)$: valeur du modèle interpolée au point s_k

- Les poids λ_i sont solutions des équations de krigeage associées à la variable \tilde{Z} . Leur calcul fait appel au modèle de variogramme, qui décrit la structure de corrélation spatiale des innovations. Celui-ci est ajusté sur le variogramme expérimental établi à partir des stations d'analyse.

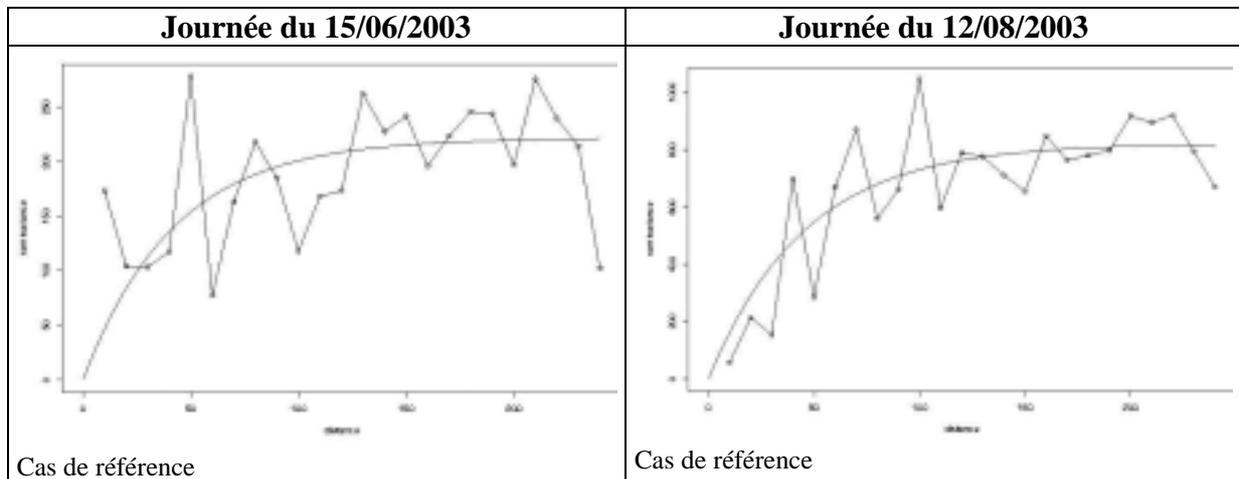
5.1.1 Paramètres testés

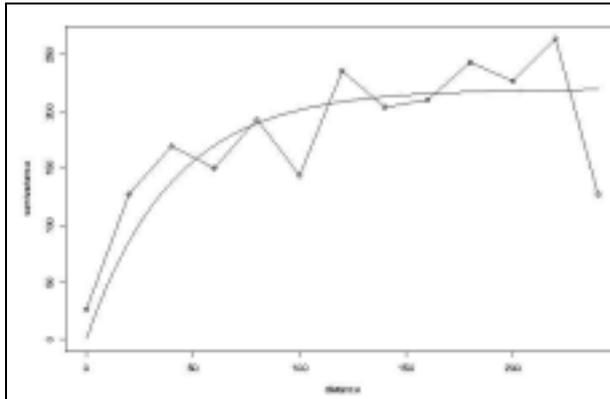
Pour chaque essai (Tableau 1), **tous les paramètres sauf un sont ceux du cas de référence.** Ne sont présentés ici que les tests les plus significatifs pour cette étude.

Tableau 1 – Paramètres variographiques testés

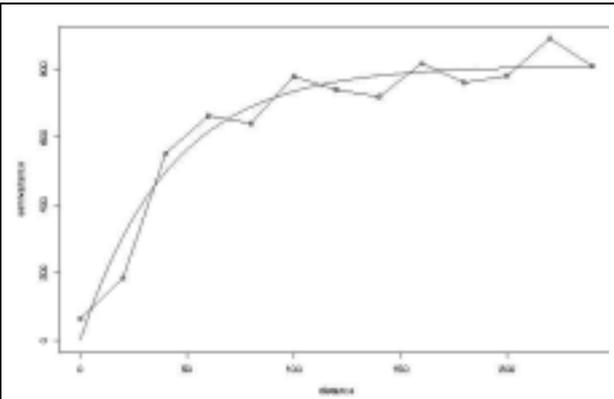
Type de paramètre	Paramètre	Cas de référence (test n°0)	Tests réalisés
Paramètres du variogramme expérimental	Pas de calcul du variogramme expérimental	10 km	20 km (test n°1)
Paramètres du modèle de variogramme	Distance maximale d'ajustement	240 km	140 km (test n°2)
	Effet de pépité	0	Ajustement automatique de l'effet de pépité (test n°3)
	Structure variographique	Exponentielle	Sphérique (test n°4) Gaussienne (ici, l'effet de pépité est fixé à 10 et non 0 pour éviter les instabilités numériques) (test n°5)

Les figures suivantes sont fournies à titre d'exemple. Elles représentent le variogramme expérimental et le modèle de variogramme obtenus à chaque test pour les journées du 15/06/2003 et du 12/08/2003.

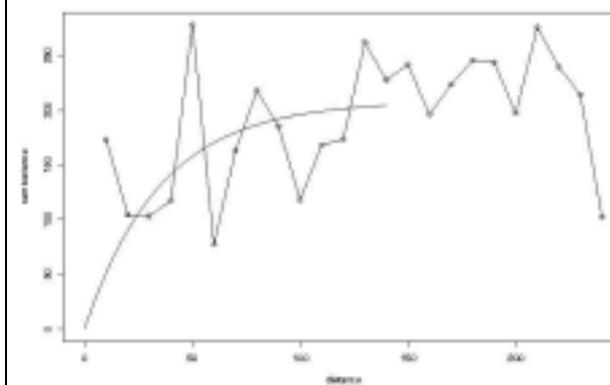




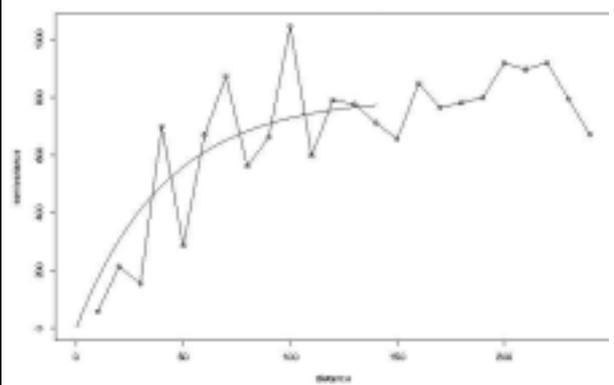
Pas de 20 km



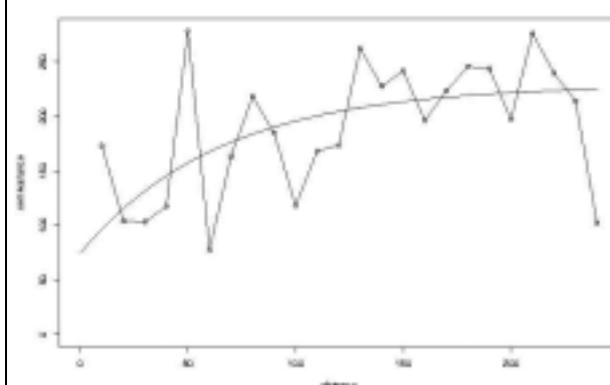
Pas de 20 km



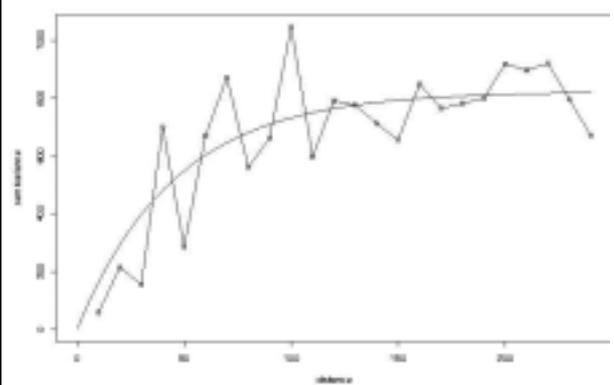
Ajustement jusqu'à 140 km



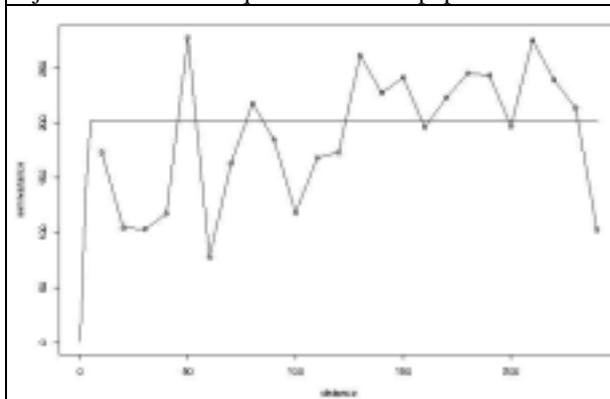
Ajustement jusqu'à 140 km



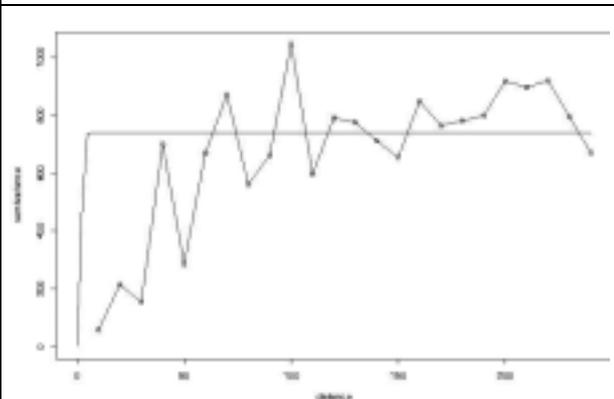
Ajustement automatique de l'effet de pépité



Ajustement automatique de l'effet de pépité



Modèle sphérique



Modèle sphérique

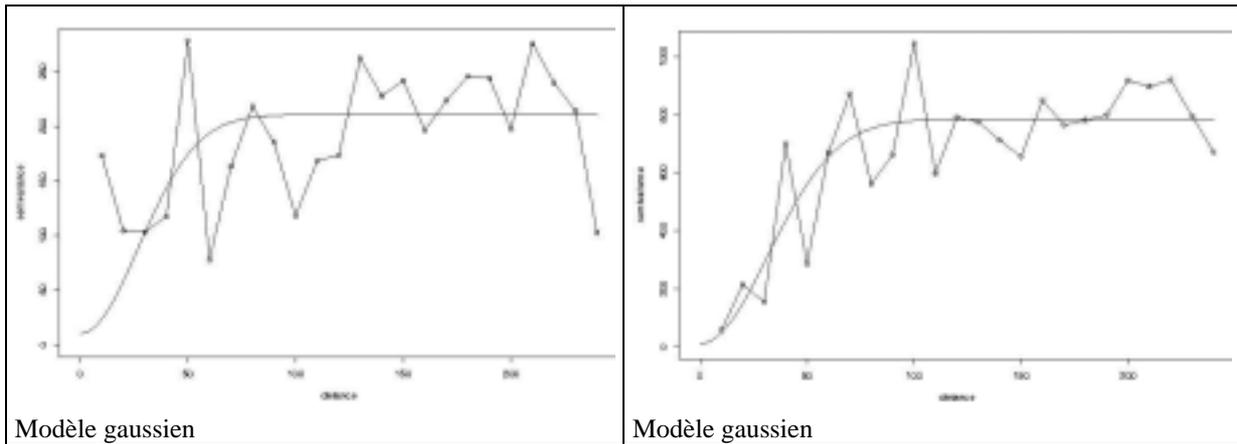


Figure 2 – Analyse de sensibilité aux paramètres du variogramme. Exemples de variogrammes expérimentaux et ajustés.

Pour ces deux journées, le modèle de variogramme s’ajuste correctement sur les données expérimentales, sauf lorsqu’une fonction sphérique est utilisée. Il est dans ce cas peu adéquat, en particulier sur les cent premiers kilomètres.

5.1.2 Résultats toutes stations confondues

Les valeurs des indicateurs statistiques de performance pour la validation croisée et la vérification, calculés jour par jour et sur l’ensemble de la période, sont fournies en annexe. Les deux types de validation croisée – l’une avec, l’autre sans nouveau calcul de variogramme- produisent des résultats très similaires. Pour ne pas alourdir le rapport, seuls sont présentés les résultats de la première validation croisée.

5.1.2.1 Comparaison entre les jeux de paramètres

Pour chaque critère, les jeux de paramètres sont classés par ordre décroissant, des plus satisfaisants aux moins satisfaisants (Tableau 2).

Tableau 2 – Comparaison entre les tests

Indicateur global sur la période (14-29 juin 2003, 31 juillet-14 août 2003)	Classement pour la validation croisée	Classement pour la vérification – toutes stations de vérification confondues	Classement pour la vérification – stations rurales	Classement pour la vérification – stations périurbaines	Classement pour la vérification – stations urbaines
BN	3, 0, 1, 2, 5, 4	5, 0, 3, 1, 2, 4	3, 5, 0, 2, 1, 4	3, 5, 0, 1, 2, 4	5, 0, 1, 3, 2, 4
RMSE	3, 0, 2, 1, 5, 4	2, 0, 3, 5, 1, 4	4, 1, 3, 0, 2, 5	3, 2, 0, 1, 5, 4	2, 0, 3, 5, 1, 4
NMSE	3, 0, 2, 1, 5, 4	2, 0, 3, 5, 1, 4	4, 1, 3, 0, 2, 5	3, 2, 0, 1, 5, 4	2, 0, 3, 5, 1, 4
ρ	3, 0, 2, 1, 5, 4	2, 0, 3, 1, 5, 4	0, 1, 2, 3, 5, 4	3, 2, 0, 1, 5, 4	2, 0, 3, 5, 1, 4
Effectif	3060	5750	62	1261	4427
Nb de stations avec données disponibles	95 à 103	178 à 193	2	39 à 42	137 à 150

Aucun jeu de paramètres ne l’emporte systématiquement. Le classement dépend principalement du type de station et, dans une moindre mesure, de l’indicateur statistique considéré. **Le cas de référence fournit des résultats satisfaisants pour l’ensemble des stations et des critères.** Comme le laissait supposer l’examen des variogrammes (Figure 2), la modélisation de ce dernier par une fonction sphérique conduit la plupart du temps aux moins bons résultats.

5.1.2.2 Comparaison avec le modèle

Jour par jour et sur toute la période, le rapport des scores obtenus respectivement pour l’analyse et le modèle permet de quantifier l’amélioration globale sur la France apportée par le krigeage.

Un rapport inférieur à 100% pour le biais normalisé, la RMSE et la NMSE, et supérieur à 100% pour le coefficient de corrélation indique une amélioration par rapport au modèle (diminution des statistiques d’erreur, augmentation de la corrélation).

Validation croisée

Période de calcul des scores		BN_a/BN_m^\bullet (%)	$RMSE_a/RMSE_m^\bullet$ (%)	$NMSE_a/NMSE_m^\bullet$ (%)	ρ_a/ρ_m^\bullet (%)
Jour par jour	Min	6.1 (min des valeurs absolues)	45.4	40.8	99.5
	Max	237.9 (max des valeurs absolues)	97.5	97.1	210.1
	Centile 80 (BN, RMSE, NMSE) Centile 20 (ρ)	73.0* (centile des valeurs absolues)	80.8*	77.4*	105.3**
Toute la période		39.3	73.2	70.5	109.8

• : a : analyse, m : modèle

* : dans 80% des cas, la statistique d'erreur issue de l'analyse est inférieure d'au moins 27% (BN), 19,2% (RMSE) et 22,6% (NMSE) à celle du modèle.

** : dans 80% des cas, le coefficient de corrélation entre les concentrations mesurées et analysées est supérieur d'au moins 5,3% au coefficient de corrélation entre les mesures et le modèle.

Le gain représenté par l'analyse est donc significatif pour l'ensemble des indicateurs. Seul le biais normalisé se dégrade les 25, 26, 27 juin, 6, 7 et 14 août. Un examen des concentrations mesurées, modélisées et analysées montre que cette dégradation est le fait d'un petit nombre de stations (différentes selon les dates) pour lesquelles le biais du modèle est quasi nul tandis que l'analyse sur ou sous-estime la concentration.

Vérification

Stations rurales (2 stations)

Période de calcul des scores		BN_a/BN_m^\bullet (%)	$RMSE_a/RMSE_m^\bullet$ (%)	$NMSE_a/NMSE_m^\bullet$ (%)	ρ_a/ρ_m^\bullet (%)
Jour par jour	Min	7.7 (min des valeurs absolues)	6.3	6.8	/
	Max	6935.9 (max des valeurs absolues)	308.9	286.4	/
	Centile 80 (BN, RMSE, NMSE) Centile 20 (ρ)	154.2 (centile des valeurs absolues)	118.8	118.3	/
Toute la période		115.7	94.9	93.4	109.6

• : a : analyse, m : modèle

Stations périurbaines (39 à 42 stations)

Période de calcul des scores		BN_a/BN_m^\bullet (%)	$RMSE_a/RMSE_m^\bullet$ (%)	$NMSE_a/NMSE_m^\bullet$ (%)	ρ_a/ρ_m^\bullet (%)
Jour par jour	Min	5.1 (min des valeurs absolues)	47.3	43.3	86.7
	Max	1435.1 (max des valeurs absolues)	110.8	107.7	444.6
	Centile 80 (BN, RMSE, NMSE) Centile 20 (ρ)	99.0 (centile des valeurs absolues)	89.5	87.5	157.7
Toute la période		-48.9	77.5	75.5	108.0

• : a : analyse, m : modèle

Stations urbaines (137 à 151 stations selon les jours)

Période de calcul des scores		BN_a/BN_m^\bullet (%)	$RMSE_a/RMSE_m^\bullet$ (%)	$NMSE_a/NMSE_m^\bullet$ (%)	ρ_a/ρ_m^\bullet (%)
Jour par jour	Min	9.6 (min des valeurs absolues)	37.9	39.5	99.4
	Max	5996.0 (max des valeurs absolues)	105.2	103.4	215.3
	Centile 80 (BN, RMSE, NMSE) Centile 20 (ρ)	517.4 (centile des valeurs absolues)	92.9	88.8	154.5
Toute la période		828.5	83.9	81.3	111.0

• : a : analyse, m : modèle

- Pour les deux stations de vérification rurales (stations n°2024 et 18039), le gain par rapport au modèle est limité. La détérioration parfois importante des indicateurs statistiques journaliers est due à la station Saintes-Maries de la Mer (AIRFOBEP), située en bord de mer.
- Pour les stations de vérification périurbaines, les scores journaliers s'améliorent généralement avec l'analyse. Les 4, 8 et 9 août, le biais est toutefois très supérieur à celui du modèle. Comme dans la validation croisée, ce résultat est dû à quelques stations, différentes selon les jours, pour lesquelles la concentration mesurée est correctement approchée par le modèle mais mal estimée (le plus souvent surestimée) par l'analyse. Par exemple, le krigeage à la station 8018 (Périurbaine-Nord, AIR Languedoc-Roussillon) surestime, modérément le 4 août et très fortement le 8, la concentration d'ozone mais l'estime parfaitement le 9. Sur l'ensemble de la période, l'analyse corrige efficacement le modèle.
- Pour les stations de vérification urbaines, l'analyse tend également à réduire l'erreur quadratique et à augmenter la corrélation. En revanche, l'accroissement du biais pose problème. Le krigeage des innovations, tel qu'il est pratiqué, n'est pas apte à corriger finement les concentrations en milieu urbain. Ce résultat était attendu puisque la méthode exploite des données de type rural.

5.1.3 Résultats par AASQA

Les indicateurs statistiques sont calculés AASQA par AASQA sur la **période entière** avant et après adaptation. La comparaison permet d’identifier les zones dans lesquelles la correction du modèle est globalement efficace, et celles dans lesquelles l’adéquation aux observations se dégrade. Elle est faite **pour le cas de référence** en utilisant les fichiers d’analyse et de vérification mis à jour.

Validation croisée

Tableau 3 – Indicateurs statistiques par AASQA calculés sur les stations d’analyse ; comparaison entre analyse et modèle.

BN		RMSE		NMSE		ρ	
AASQA*	BN _a /BN _m ** (%)	AASQA*	RMSE _a /RMSE _m ** (%)	AASQA*	NMSE _a /NMSE _m ** (%)	AASQA*	ρ _a /ρ _m ** (%)
32	57.42	32	74.17	10	100.03	24	117.95
5	60.08	3	72.93	32	71.00	33	140.02
10	126.15	24	76.78	3	69.07	31	97.77
36	42.21	10	102.28	24	72.15	10	106.76
7	19.81	36	57.35	31	105.07	32	110.62
29	14.36	2	58.64	29	65.15	3	109.57
26	27.21	8	63.27	7	53.85	29	107.37
24	5.48	26	73.93	35	70.03	12	117.95
3	13.25	29	69.08	26	70.58	26	102.57
21	107.95	7	57.21	5	85.69	8	112.28
16	14.26	31	107.85	36	54.79	7	110.08
2	-26.30	16	61.51	8	60.27	2	112.70
25	71.55	35	73.61	25	84.03	36	113.50
8	-2.36	5	84.33	2	54.91	25	107.78
34	8.13	34	59.96	34	57.58	16	106.83
35	-30.71	25	83.95	16	58.62	1	103.77
18	111.95	4	67.63	18	95.82	19	106.07
14	19.60	1	95.95	19	83.00	18	104.60
31	209.41	18	97.10	4	65.89	21	104.76
23	2.03	12	64.78	21	96.86	30	109.20
19	134.85	14	69.69	33	78.23	5	104.07
12	-28.59	19	84.67	23	66.73	34	107.78
9	-59.59	21	98.30	12	62.66	9	106.43
1	175.26	23	68.80	1	94.68	4	108.23
4	-91.50	33	81.41	14	67.81	23	105.67
33	-274.07	30	78.73	9	70.84	14	104.50
30	-395.70	9	74.17	30	75.13	35	102.00

* classées par ordre croissant de performance du modèle selon le critère considéré

** m : modèle ; a : analyse

En général, la correction apportée au modèle par le krigeage améliore toujours les indicateurs statistiques. Il en est ainsi dans la plupart des zones où le modèle était en moyenne le plus éloigné des observations. Citons notamment ATMOSF’AIR Bourgogne Sud (32), AIRMARAIX (3), QUALITAIR (24).

Les cases grisées mettent en évidence les AASQA pour lesquelles les indicateurs statistiques, au contraire, se détériorent :

- OPALAIR (10) : légère dégradation de tous les indicateurs
- AIRAQ (31) : dégradation sensible (multiplication par 2) du biais normalisé, légère dégradation des autres indicateurs
- AIR C.O.M. (21), ATMO Picardie (18), AIR BREIZH (19), AERFOM (1), AIR DE L'AIN (33), AIRLOR (30) : dégradation plus ou moins importante du biais normalisé, amélioration des autres indicateurs.

Vérification

Tableau 4 – Indicateurs statistiques par AASQA calculés sur les stations de vérification de type rural ; comparaison entre analyse et modèle.

BN		RMSE		NMSE		ρ	
AASQA*	BN _a /BN _m ** (%)	AASQA*	RMSE _a /RMSE _m ** (%)	AASQA*	NMSE _a /NMSE _m ** (%)	AASQA*	ρ _a /ρ _m ** (%)
2	177.91	18	70.71	18	71.22	2	108.02
18	38.63	2	116.42	2	112.45	18	114.42

* classées par ordre croissant de performance du modèle selon le critère considéré

** m : modèle ; a : analyse

Tableau 5 – Indicateurs statistiques par AASQA calculés sur les stations de vérification de type périurbain ; comparaison entre analyse et modèle.

BN		RMSE		NMSE		ρ	
AASQA*	BN _a /BN _m ** (%)	AASQA*	RMSE _a /RMSE _m ** (%)	AASQA*	NMSE _a /NMSE _m ** (%)	AASQA*	ρ _a /ρ _m ** (%)
7	22.68	7	40.38	7	36.62	24	94.07
29	9.94	3	82.49	24	117.07	3	117.89
24	178.56	24	121.97	3	79.17	32	110.86
16	35.78	22	81.57	29	56.58	7	109.71
8	22.07	29	60.32	22	79.58	22	104.06
34	-1.89	16	68.34	32	64.20	9	111.99
25	38.25	32	68.63	6	82.87	18	105.44
5	-9.13	34	48.71	34	46.64	5	107.46
21	59.43	8	79.32	5	73.62	34	109.56
32	-78.56	6	84.38	16	65.63	6	103.60
22	38.69	5	71.60	8	75.95	4	108.64
30	138.02	1	75.40	25	40.10	8	100.04
14	14.60	18	81.82	18	81.42	29	102.61
3	-75.41	4	78.04	21	95.15	30	103.36
4	216.92	25	39.64	4	76.29	21	102.48
1	68.20	30	96.21	9	56.86	25	109.97
18	73.53	21	94.75	30	96.69	1	104.52
9	0.73	9	57.99	1	74.34	16	100.09
6	38.18	14	62.23	14	60.45	14	104.55

* classées par ordre croissant de performance du modèle selon le critère considéré

** m : modèle ; a : analyse

Tableau 6 – Indicateurs statistiques par AASQA calculés sur les stations de vérification de type urbain ; comparaison entre analyse et modèle.

BN		RMSE		NMSE		ρ	
AASQA*	BN _a /BN _m ** (%)	AASQA*	RMSE _a /RMSE _m ** (%)	AASQA*	NMSE _a /NMSE _m ** (%)	AASQA*	ρ _a /ρ _m ** (%)
21	86.94	2	96.50	2	92.64	24	151.18
36	33.35	3	94.87	21	98.70	33	152.04
29	14.01	36	40.12	29	67.82	3	105.88
26	272.81	29	71.97	36	37.73	2	112.23
25	63.20	4	93.53	3	90.62	7	118.90
7	-10.63	24	80.32	4	90.95	35	116.58
5	20.01	21	98.74	7	52.13	8	121.19
33	16.43	22	104.15	24	78.07	12	124.87
22	168.23	7	56.00	19	85.76	30	108.69
19	88.52	31	76.57	31	76.54	31	114.04
31	77.04	30	99.67	35	63.54	22	105.04
30	159.64	25	60.27	22	101.57	36	120.31
34	-19.92	16	63.08	25	60.72	21	104.07
16	-68.90	6	89.00	30	97.31	9	112.37
9	157.35	35	66.20	23	56.44	19	107.03
1	126.15	12	51.65	6	87.45	16	110.52
23	35.56	19	86.97	5	71.26	4	107.28
24	214.25	34	47.89	12	50.58	26	108.96
12	25.13	23	58.10	34	45.85	34	111.62
35	-56.46	5	69.16	26	186.39	18	108.67
4	229.17	1	95.88	33	51.64	23	109.39
3	-152.21	26	203.47	16	59.72	1	105.12
2	440.09	8	74.99	9	85.49	6	103.41
6	219.33	33	53.95	8	72.57	25	110.01
18	-586.63	18	71.27	1	94.84	29	98.90
14	1300.77	9	87.52	18	69.30	5	105.20
8	-1232.39	14	86.86	14	83.98	14	107.03

* classées par ordre croissant de performance du modèle selon le critère considéré

** m : modèle ; a : analyse

De manière générale, l’analyse représente un gain par rapport aux sorties brutes du modèle. Selon les quatre critères choisis, et plus spécialement l’erreur quadratique moyenne - normalisée ou non- et la corrélation, les concentrations obtenues par krigeage sont en meilleur accord avec les données de mesure (on rappelle que ces dernières n’ont pas servi à construire le variogramme).

Dans quelques régions cependant, l'analyse agit défavorablement sur l'un ou l'autre des indicateurs :

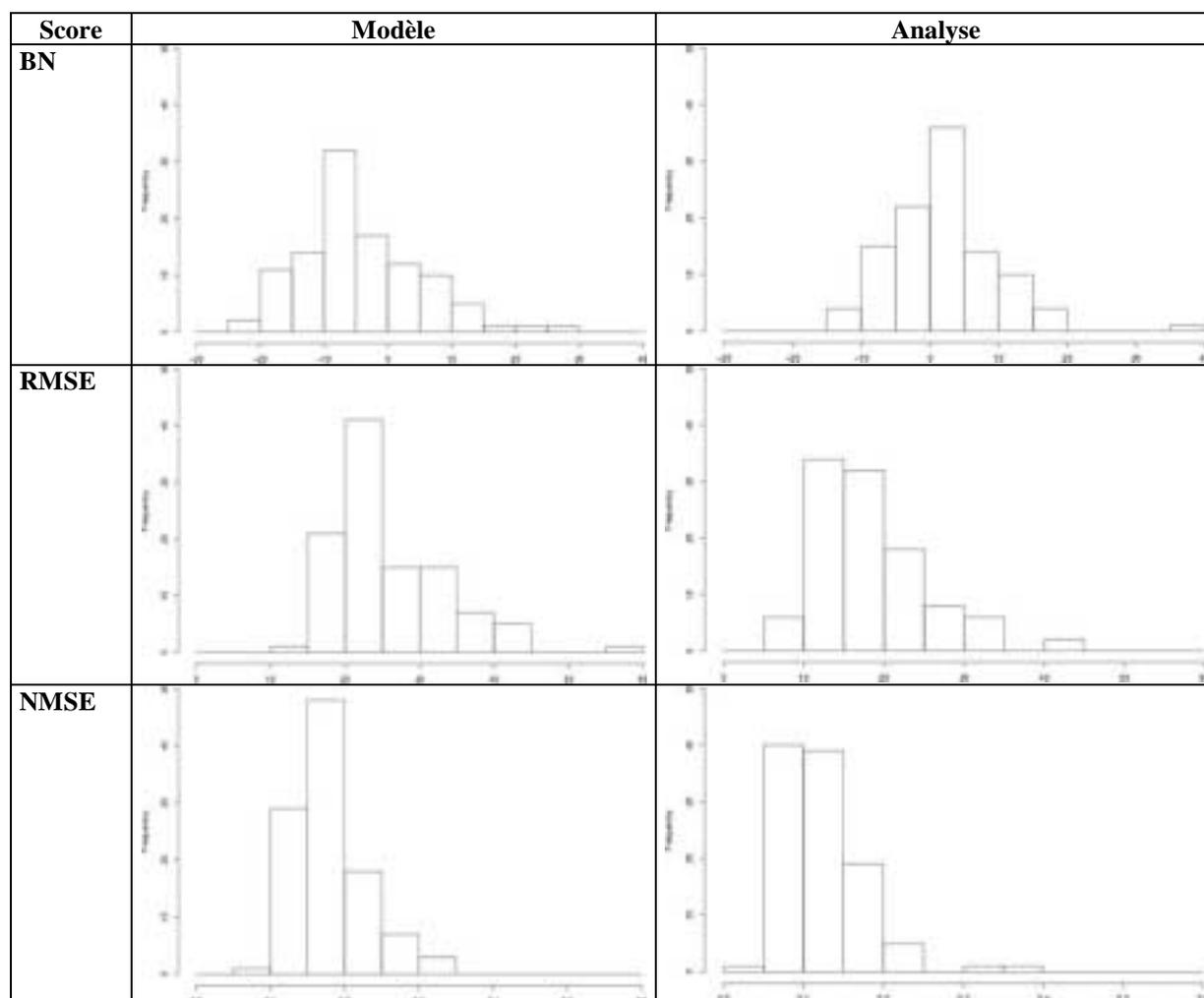
- *Stations rurales* : dégradation du biais normalisé et de l'erreur quadratique moyenne (normalisée ou non) pour la station de Saintes-Maries de la Mer, située en bord de mer (AIRFOBEP) ;
- *Stations périurbaines* : dégradation des quatre indicateurs pour QUALITAIR (24) (une station, Blausasc, située dans une vallée :) ; dégradation du biais normalisé pour ATMO Champagne-Ardenne (30) (une station) et AIRPARIF (4) (deux stations) ;
- *Stations urbaines* : dégradation du biais normalisé pour 13 sur 27 AASQA ; dégradation de l'erreur quadratique moyenne pour ESPOL (22) (deux stations) et ATMOSFAIR Bourgogne Centre Nord (26) (une station) ; légère dégradation de la corrélation pour AMPASEL (29)(deux stations).

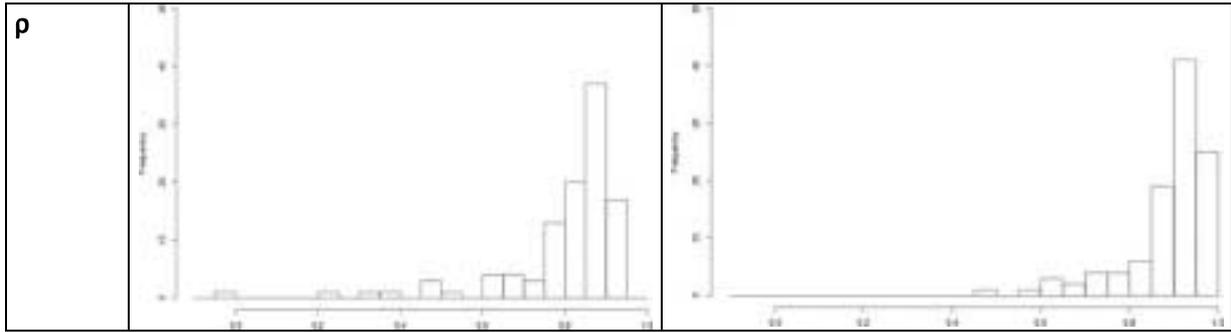
Si, pour l'erreur quadratique moyenne et la corrélation, cet effet contraire reste localisé, l'augmentation (en valeur absolue) du biais normalisé dans plusieurs zones urbaines constitue une limite de la méthode et confirme la remarque faite en 5.1.2.2.

5.1.4 Résultats par station

Les figures suivantes représentent les distributions statistiques des scores calculés par station sur la période étudiée. Elles confirment les précédentes observations.

Validation croisée





Vérification : stations périurbaines

Score	Modèle	Analyse
BN		
RMSE		
NMSE		
p		

Vérification : stations urbaines

Score	Modèle	Analyse
BN		
RMSE		
NMSE		
ρ		

5.1.5 Remarque sur les zones urbaines

Les statistiques d'erreur ont mis en évidence une augmentation du biais normalisé sur près de la moitié des stations urbaines de vérification. Pour résoudre ce problème, il a été envisagé d'effectuer, en complément de l'analyse fondée sur des mesures de stations rurales (ou assimilées comme telles), un krigeage des innovations spécifique aux zones urbaines. L'objectif est de voir si dans ces zones, l'utilisation exclusive d'un variogramme urbain et de données urbaines rend plus satisfaisante l'analyse.

Afin d'évaluer la pertinence de cette démarche, on a :

- constitué des fichiers d'analyse et de vérification ne contenant que des stations urbaines. Les stations urbaines isolées n'ont pas été incluses dans ces fichiers de façon que le plus proche voisinage d'une station compte un nombre suffisant de données expérimentales lors de la validation croisée et de la vérification.
- réduit la distance maximale d'ajustement du variogramme dans le programme de krigeage (plusieurs distances ont été testées, de 20 km à 50 km), de manière à ne modéliser que des phénomènes locaux ;
- mis en œuvre comme précédemment le krigeage des innovations sur toute la période.

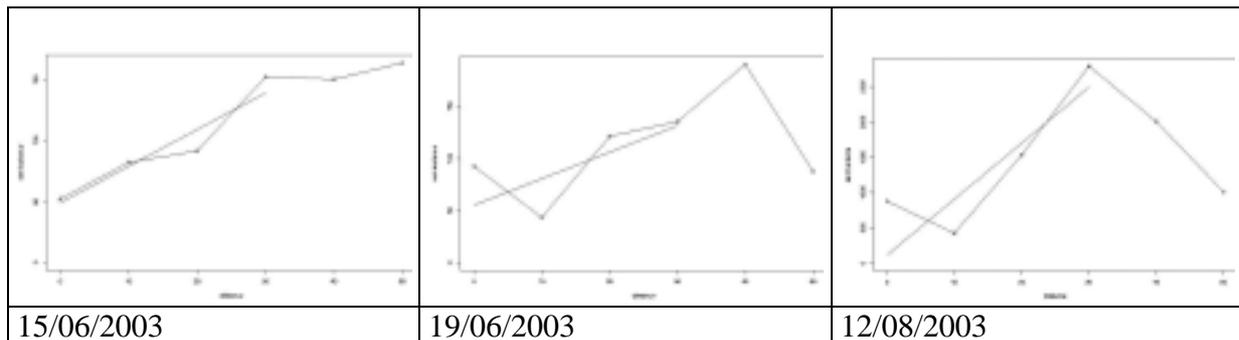


Figure 3 – Exemples de variogrammes urbains calculés et modélisés sur de courtes distances. Ajustement automatique entre 0 et 30 km par un effet de pépite et un modèle exponentiel.

Cette approche ne donne pas satisfaction à ce stade de l'étude. En effet, les statistiques de validation croisée et de vérification ne montrent pas d'amélioration, voire même se dégradent. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour que l'adaptation du modèle en zone urbaine reproduise correctement les phénomènes.

5.2 KRIGEAGE DES INNOVATIONS : INTRODUCTION DE VARIABLES AUXILIAIRES

Dans cette étude, trois types de variables auxiliaires sont disponibles à l'échelle de la France :

- les émissions de différents polluants, données en moyenne sur chaque maille de la grille modèle. Elles diffèrent selon le mois, le type de jour et l'heure ;
- l'occupation des sols : parts (comprises entre 0 et 1) représentées dans chaque maille de la grille modèle par huit classes d'occupation des sols ;
- l'altitude, donnée en chaque point de la grille modèle. (N.B. : Deux grilles d'altitude, issues de deux modes d'interpolation différents, sont en réalité disponibles).

Pour la cartographie du pic qui, selon les endroits, correspond à différentes heures de la journée, seules sont considérées l'occupation des sols et l'altitude.

5.2.1 Etude des corrélations

Une étude des corrélations est réalisée afin de mesurer le caractère explicatif de ces variables et de déterminer s'il est pertinent de les introduire dans le krigeage. Le coefficient de corrélation entre les variables auxiliaires et les observations/les innovations est calculé jour par jour sur l'ensemble des stations d'analyse.

Ce calcul suppose d'attribuer préalablement à chaque station une valeur de variable auxiliaire.

- pour les huit classes d'occupation du sol, on identifie la maille dans laquelle est implantée la station et on affecte à cette dernière la valeur prise par la classe sur cette maille;
- pour l'altitude, on effectue une interpolation linéaire au point de la station.

Les corrélations sont examinées avec les variables auxiliaires brutes Z_{aux} ou transformées logarithmiquement : $\ln(1 + Z_{aux})$ ou $\ln(1 + \frac{Z_{aux}}{Z_{aux}})$. Le passage au logarithmique a l'avantage d'étaler les faibles valeurs, ce qui se révèle utile si les effectifs correspondants sont importants et les non linéarités marquées pour ces classes de valeurs [3].

5.2.1.1 Occupation des sols

C'est avec la classe *sol agricole* et avec les deux classes de forêt que sont obtenus les coefficients de corrélation les plus élevés. Toutefois, que l'on considère les observations ou les innovations, ces coefficients restent faibles. Voisins certains jours de zéro, et de signe tantôt positif tantôt négatif, ils n'excèdent pas 0,37 (en valeur absolue) pour les innovations et 0,44 (en valeur absolue) pour les observations.

Aucune corrélation n'est mise en évidence avec l'urbanisation (coefficients inférieurs à 0,11 pour les innovations et 0,18 pour les observations).

Les variables d'occupation du sol ne sont pas retenues comme variables auxiliaires pour le krigeage.

5.2.1.2 Altitude

Avec l'altitude, la corrélation est plus élevée et généralement positive (cf tableau de l'annexe 1), en particulier pour les observations. La variable altitude sera donc retenue dans le krigeage des observations avec Chimère en dérive externe (cf. §5.5). Pour les innovations, le coefficient de corrélation est plus fluctuant mais il dépasse régulièrement 0,25. (Figure 4). **Le logarithme translaté de l'altitude $-\ln(1+altitude)$ est introduit à titre d'essai comme dérive externe dans le krigeage des innovations.** Les résultats obtenus pour les deux grilles d'altitude étant très proches, seule l'une des deux est conservée dans la suite de l'étude.

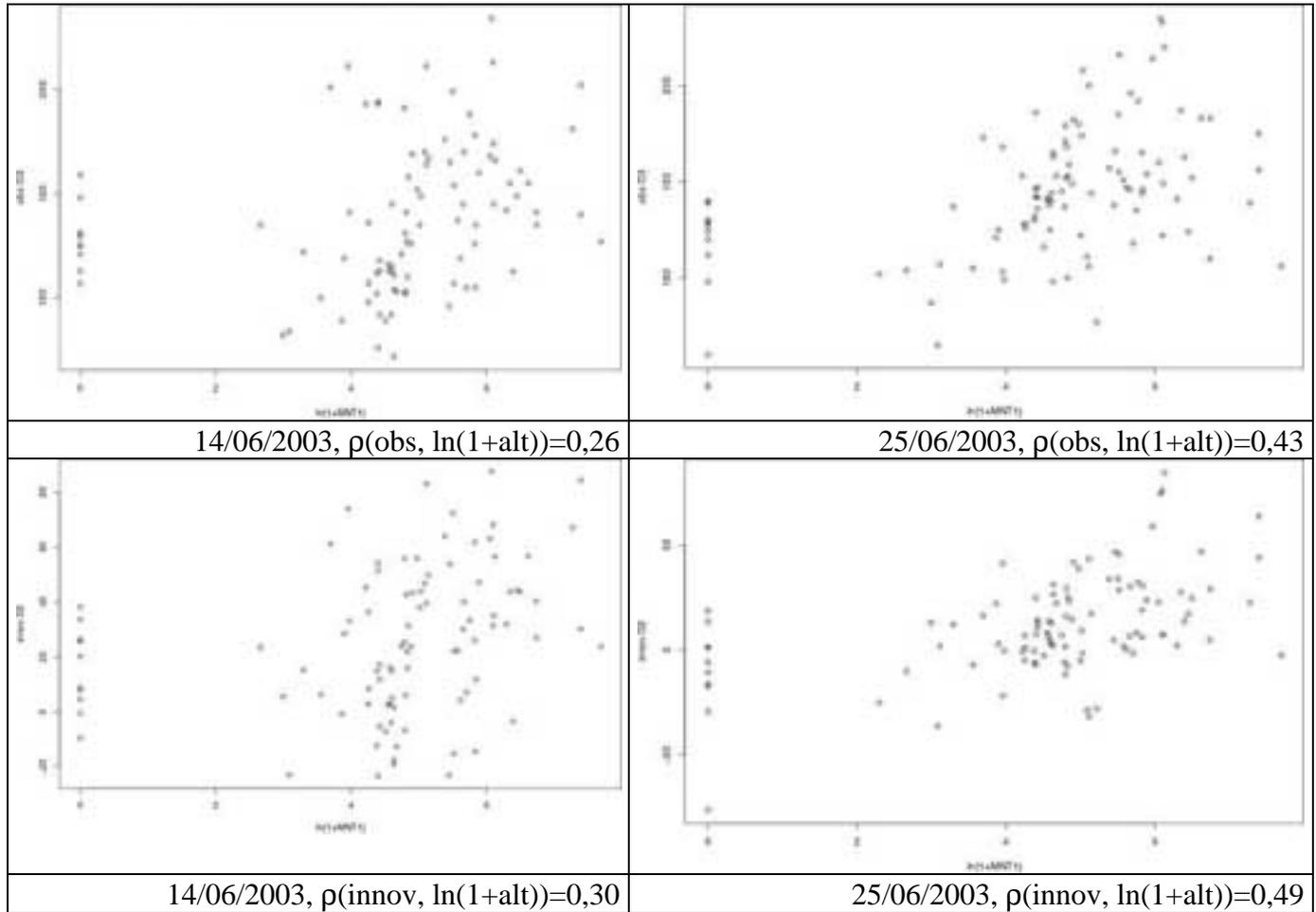


Figure 4 – Exemples de nuages de corrélation entre les observations ou les innovations et le logarithme translaté de l'altitude. Bien qu'ils soient relativement dispersés, ces nuages confirment la corrélation positive entre ces variables.

5.2.2 Krigeage des innovations avec l'altitude en dérive externe

Rappel :

Dans le krigeage des innovations avec dérive externe, l'estimateur de la concentration d'ozone en un point s de la grille s'écrit comme précédemment :

$$\hat{Z}(s) = \text{mod}(s) + \sum_i \lambda_i \tilde{Z}(s_i)$$

- $\text{mod}(s)$ est la valeur du modèle Chimère au point s .
- $\tilde{Z}(s_k)$ est l'innovation à la station de mesure s_k , calculée par la relation :

$$\tilde{Z}(s_k) = Z(s_k) - \text{mod}(s_k)$$

$Z(s_k)$: observation au point s_k

$\text{mod}(s_k)$: valeur du modèle interpolée au point s_k

- Les poids λ_i sont solutions des équations de krigeage associées à la variable \tilde{Z} , auxquelles s'ajoute la condition supplémentaire de dérive externe :

$$\sum_i \lambda_i \Phi(s_i) = \Phi(s), \text{ avec } \Phi, \text{ variable auxiliaire. Ici } \Phi = \ln(1 + \text{altitude}).$$

Dans le programme de krigeage, le variogramme expérimental est celui des résidus de la régression entre les innovations et la variable Φ .

5.2.2.1 Résultats toutes stations confondues

Validation croisée

Jour par jour et sur toute la période, la comparaison des quatre indicateurs statistiques de validation croisée, obtenus avec et sans dérive, ne montre pas d'influence significative de l'altitude. Néanmoins, ces indicateurs sont très légèrement favorables au krigeage des innovations avec l'altitude en dérive externe.

Vérification

Les différences sont là encore peu sensibles, avec cependant, quel que soit le type de station, un léger avantage pour le krigeage des innovations avec l'altitude en dérive externe. Notons que pour la station rurale Saintes-Maries de la Mer (AIRFOBEP), la dégradation du biais normalisé et de l'erreur quadratique, signalée en 5.1.2.2, est nettement moins importante que dans le cas de référence.

5.2.2.2 Résultats par AASQA

Comme en 5.1.3, les indicateurs statistiques sont calculés toutes journées confondues, AASQA par AASQA. Le tableau suivant présente les scores associés à quelques régions plus montagneuses (7 : ATMO Auvergne, 16 : ASPA, 33 : AIR de l'Ain et des Pays de Savoie) et aux zones géographiques pour lesquelles le krigeage des innovations sans dérive se révèle moins performant que le modèle, au vu d'un ou plusieurs critères.

Tableau 7 – Comparaison entre les krigeages avec et sans l'altitude en dérive

	AASQA	BN sans altitude	BN avec altitude	RMSE sans altitude	RMSE avec altitude	NMSE sans altitude	NMSE avec altitude	ρ sans altitude	ρ avec altitude
Validation croisée	1	4.44	4.80	21.69	22.11	0.14	0.14	0.88	0.87
	7	-2.60	-1.86	16.61	16.24	0.12	0.11	0.87	0.87
	10	17.32	16.04	33.72	33.68	0.31	0.31	0.67	0.65
	16	-1.48	-1.05	17.23	16.77	0.10	0.10	0.90	0.90
	18	7.71	7.60	21.48	20.95	0.16	0.16	0.89	0.90
	19	6.17	6.39	17.17	17.57	0.14	0.14	0.90	0.90
	21	11.78	12.39	19.74	19.97	0.16	0.17	0.90	0.90
	30	7.13	7.85	15.36	15.82	0.10	0.10	0.94	0.95
	31	10.27	7.13	31.17	30.89	0.24	0.24	0.57	0.56
	33	5.47	7.21	16.07	16.83	0.12	0.13	0.72	0.72
Vérification R	2	17.20	13.66	31.04	27.63	0.21	0.19	0.79	0.80
Vérification PU	4	6.69	5.72	16.34	13.36	0.11	0.09	0.95	0.97
	7	-4.74	-4.01	16.53	15.36	0.11	0.10	0.91	0.92
	16	-4.35	-4.33	18.75	18.82	0.11	0.11	0.91	0.91
	24	23.60	25.26	39.34	39.65	0.25	0.25	0.50	0.59
	30	-7.90	-7.93	19.74	19.76	0.13	0.13	0.92	0.92
Vérification U	1	6.71	6.37	20.62	19.56	0.14	0.13	0.91	0.92
	2	11.15	10.71	34.76	33.83	0.21	0.21	0.69	0.71
	3	5.64	5.86	33.10	33.27	0.19	0.19	0.63	0.63
	4	8.75	7.28	29.64	27.27	0.19	0.18	0.90	0.91
	6	2.42	1.93	20.93	21.28	0.15	0.16	0.90	0.89
	7	1.22	2.06	15.19	14.81	0.11	0.10	0.85	0.86
	8	4.89	4.85	15.68	15.57	0.11	0.11	0.92	0.92
	9	9.45	9.52	17.05	17.56	0.13	0.14	0.91	0.91
	14	6.51	6.35	13.52	12.79	0.10	0.09	0.96	0.96
	16	4.34	4.33	15.36	15.32	0.09	0.09	0.93	0.93
	18	3.34	3.02	14.00	11.96	0.10	0.08	0.94	0.95
	22	12.03	12.18	28.43	28.03	0.19	0.18	0.81	0.82
	26	34.94	35.24	42.88	43.32	0.30	0.31	0.93	0.94
	29	-1.85	-0.66	23.23	22.21	0.15	0.14	0.88	0.87
	30	10.88	11.29	24.58	24.94	0.17	0.18	0.83	0.83
33	-1.52	-0.95	11.19	10.18	0.08	0.07	0.79	0.82	

Ce tableau ne met pas en évidence de modification significative des scores lorsque l'altitude est introduite en dérive externe. On a déjà mentionné l'amélioration de ces derniers pour la station de vérification rurale. L'usage de la variable altitude a également un petit impact positif dans les zones montagneuses, pour les stations de vérification périurbaines et urbaines.

5.2.2.3 Résultats par station

Les distributions statistiques des scores calculés par station sont comparées à celles du krigeage des innovations (cas de référence). Il est peu aisé, à l'examen de ces graphes, de trancher en faveur d'une méthode.

Validation croisée

Score	Krigeage des innovations avec l'altitude en dérive externe	Krigeage des innovations Cas de référence
BN		
RMSE		
NMSE		
ρ		

Vérification : stations périurbaines

Score	Krigage des innovations avec l'altitude en dérive externe	Krigage des innovations Cas de référence
BN		
RMSE		
NMSE		
ρ		

Vérification : stations urbaines

Score	Krigeage des innovations avec l'altitude en dérive externe	Krigeage des innovations Cas de référence
BN		
RMSE		
NMSE		
ρ		

5.3 KRIGEAGE DES OBSERVATIONS AVEC LE MODELE EN DERIVE EXTERNE

Rappel :

Dans le krigeage des observations avec le modèle Chimère en dérive externe, on suppose que la concentration d'ozone est la somme d'une dérive, définie comme une fonction linéaire du modèle, et d'un résidu aléatoire : $Z(s) = \alpha \text{mod}(s) + \beta + R(s)$

L'estimateur de la concentration d'ozone en un point s de la grille s'écrit :

$$\hat{Z}(s) = \sum_i \lambda_i Z(s_i)$$

- $Z(s_k)$ est la concentration observée à la station de mesure s_k
- Les poids λ_i sont solutions des équations de krigeage associées à la variable Z , auxquelles s'ajoute la condition supplémentaire de dérive externe : $\sum_i \lambda_i \text{mod}(s_i) = \text{mod}(s)$, où mod désigne le modèle.

Dans le programme de krigeage, on fait l'hypothèse que les coefficients α et β sont constants dans le domaine. Le variogramme expérimental est calculé sur les résidus de la régression entre les observations et le modèle Chimère.

5.3.1 Résultats toutes stations confondues

Validation croisée

Par rapport au krigeage des innovations sans et avec dérive, les statistiques montrent une légère augmentation du biais normalisé mais une petite diminution de l'erreur quadratique et un accroissement de la corrélation.

Vérification

A l'exception du biais calculé sur les stations rurales et urbaines, les différences, bien que peu marquées, sont néanmoins en faveur du krigeage des observations avec le modèle CHIMERE en dérive.

5.3.2 Résultats par AASQA

Comme en 5.1.3, les indicateurs statistiques sont calculés toutes journées confondues, AASQA par AASQA. Le tableau suivant présente les scores associés aux zones géographiques pour lesquelles le krigeage des innovations se révèle moins performant que le modèle, au vu d'un ou plusieurs critères. Les chiffres en gras font ressortir les améliorations les plus sensibles apportées par le krigeage avec dérive externe ; les valeurs soulignées indiquent les augmentations les plus importantes du biais normalisé ou de l'erreur quadratique.

Tableau 8 – Comparaison entre le krigeage des innovations et des observations

	AASQA	BN – krigeage des innov.	BN krigeage des obs. avec Chimère en dérive	RMSE krigeage des innov.	RMSE krigeage des obs. avec Chimère en dérive	NMSE krigeage des innov.	NMSE krigeage des obs. avec Chimère en dérive	ρ krigeage des innov.	ρ krigeage des obs. avec Chimère en dérive
Validation croisée	1	4.44	2.80	21.69	18.57	0.14	0.12	0.88	0.89
	10	17.32	<u>22.68</u>	33.72	<u>35.27</u>	0.31	0.31	0.67	0.69
	18	7.71	8.74	21.48	19.39	0.16	0.15	0.89	0.91
	19	6.17	<u>9.57</u>	17.17	<u>19.17</u>	0.14	<u>0.16</u>	0.90	0.89
	21	11.78	<u>14.81</u>	19.74	<u>22.32</u>	0.16	<u>0.18</u>	0.90	0.89
	30	7.13	6.94	15.36	14.48	0.10	0.09	0.94	0.95
	31	10.27	<u>13.06</u>	31.17	29.70	0.24	0.22	0.57	0.64
Vérification R	2	17.20	16.61	31.04	29.31	0.21	0.19	0.79	0.82
Vérification PU	4	6.69	4.96	16.34	12.24	0.11	0.08	0.95	0.96
	24	23.60	23.45	39.34	37.73	0.25	0.24	0.50	0.58
	30	-7.90	-7.74	19.74	19.80	0.13	0.13	0.92	0.92
Vérification U	1	6.71	4.84	20.62	16.54	0.14	0.11	0.91	0.93
	2	11.15	10.50	34.76	33.65	0.21	0.20	0.69	0.70
	3	5.64	3.94	33.10	30.69	0.19	0.18	0.63	0.64
	4	8.75	5.70	29.64	20.80	0.19	0.14	0.90	0.93
	6	2.42	2.36	20.93	20.56	0.15	0.15	0.90	0.90
	8	4.89	4.91	15.68	15.30	0.11	0.10	0.92	0.92
	9	9.45	10.14	17.05	17.74	0.13	0.14	0.91	0.92
	14	6.51	7.06	13.52	12.65	0.10	0.09	0.96	0.97
	18	3.34	3.39	14.00	12.18	0.10	0.08	0.94	0.95
	22	12.03	9.65	28.43	24.81	0.19	0.16	0.81	0.83
	26	34.94	36.40	42.88	45.07	0.30	0.32	0.93	0.93
	29	-1.85	-2.62	23.23	23.62	0.15	0.15	0.88	0.88
	30	10.88	11.61	24.58	24.52	0.17	0.17	0.83	0.83

Comparé au krigeage des innovations, le krigeage des observations avec Chimère en dérive externe conduit, en validation croisée, à :

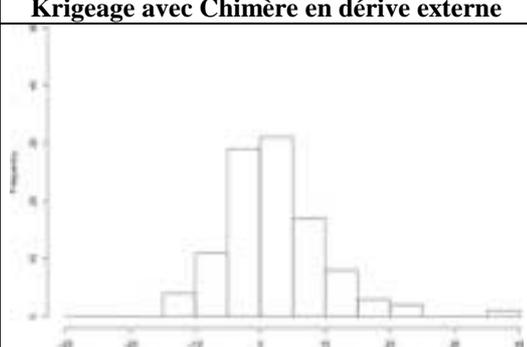
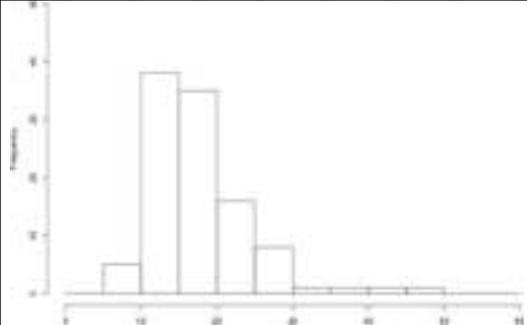
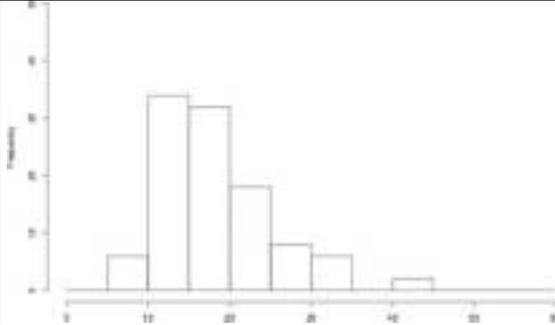
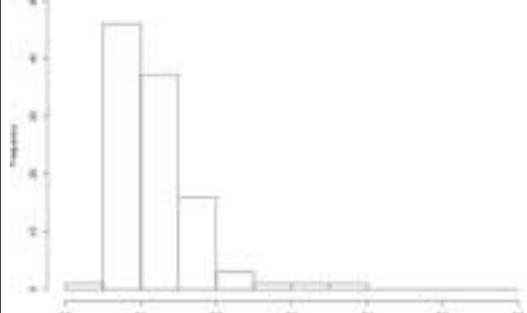
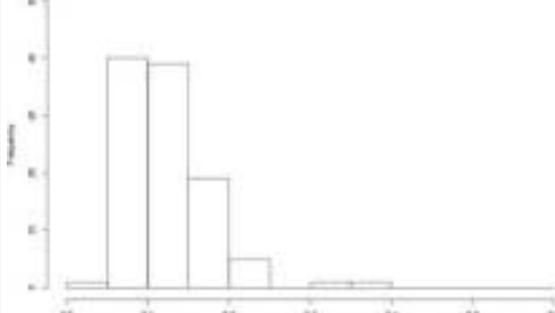
- un biais normalisé généralement supérieur, en particulier pour OPAL' AIR, AIR COM et AIRAQ ;
- une erreur quadratique moyenne (normalisée ou non) tantôt inférieure, tantôt supérieure ;
- un coefficient de corrélation plus élevé.

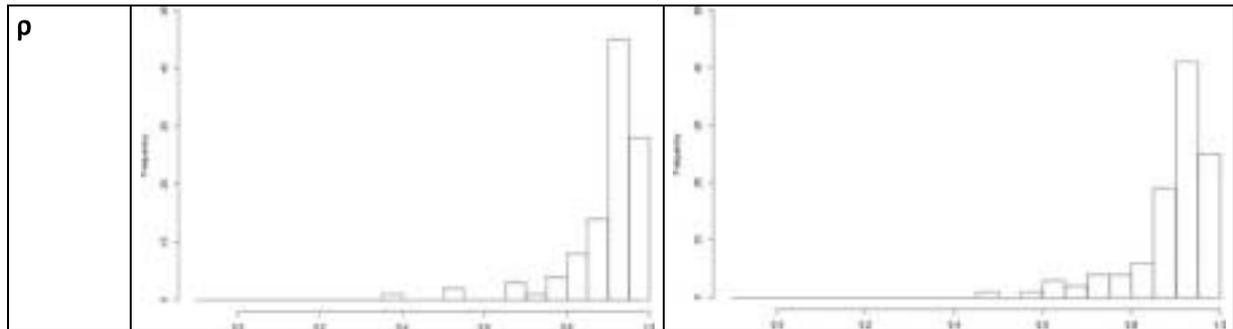
En vérification, le krigeage des observations avec Chimère en dérive externe est en général légèrement plus performant que le krigeage des innovations. Ce résultat est plus marqué pour les stations périurbaines et urbaines d'AIRMARAIX et pour les stations urbaines d'AERFOM, AIRFOBEP et ESPOL.

5.3.3 Résultats par station

Les distributions statistiques des scores calculés station par station sont comparées à celles du krigeage des innovations (cas de référence). On présente ici les distributions associées aux stations d'analyse. Le resserrement de l'histogramme de l'erreur moyenne quadratique -brute ou normalisée- autour de valeurs plus faibles et le plus grand pourcentage de coefficients de corrélation supérieurs à 0,9 concordent avec les résultats obtenus toutes stations confondues. Les histogrammes du biais normalisé diffèrent entre eux mais conformément à ces mêmes résultats, ils ne mettent pas en évidence de réduction du biais quand le modèle est employé comme dérive.

Validation croisée

Score	Krigeage avec Chimère en dérive externe	Krigeage des innovations – cas de référence
BN		
RMSE		
NMSE		



5.4 KRIGEAGE DES OBSERVATIONS AVEC LE MODELE ET L'ALTITUDE EN DERIVE EXTERNE

5.4.1 Résultats toutes stations confondues

L'utilisation de l'altitude comme seconde variable auxiliaire agit favorablement sur les indicateurs statistiques.

Validation croisée

Les résultats sont très proches de ceux obtenus sans l'altitude en dérive mais le biais normalisé décroît légèrement. Comparée aux trois tests précédents, cette méthode est la plus efficace selon les critères de l'erreur moyenne quadratique brute ou normalisée et du coefficient de corrélation. Selon le critère du biais normalisé, le krigeage des innovations avec l'altitude en dérive occupe la première place.

Vérification

Les différences entre les tests sont parfois minimes. Néanmoins, quel que soit le type de station, le krigeage des observations avec le modèle et l'altitude en dérive se classe en première position.

5.4.2 Résultats par AASQA

Comme en 5.1.3, les indicateurs statistiques sont calculés toutes journées confondues, AASQA par AASQA. Le tableau suivant présente les scores associés aux régions montagneuses et aux zones géographiques pour lesquelles le krigeage des innovations sans dérive se révélait moins performant que le modèle, au vu d'un ou plusieurs critères.

Tableau 9 – Comparaison entre les krigeages avec et sans l'altitude en dérive

	AAS QA	BN KI	BN Kobs+ mod	BN Kobs+ mod + alt.	RMSE KI	RMSE Kobs+ mod	RMSE Kobs+ mod + alt.	NMSE KI	NMSE Kobs+ mod	NMSE Kobs+ mod + alt.	ρ KI	ρ Kobs +mod	ρ Kobs +mod +alt.
Validation croisée	1	4.44	2.80	3.84	21.69	18.57	19.80	0.14	0.12	0.13	0.88	0.89	0.88
	7	-2.60	-1.19	0.20	16.61	14.69	14.11	0.12	0.10	0.10	0.87	0.89	0.90
	10	17.32	22.68	<u>21.43</u>	33.72	35.27	<u>35.78</u>	0.31	0.31	0.32	0.67	0.69	0.67
	16	-1.48	-2.64	<u>-2.24</u>	17.23	16.82	<u>16.29</u>	0.10	0.10	0.10	0.90	0.91	0.91
	18	7.71	8.74	8.97	21.48	19.39	19.88	0.16	0.15	0.15	0.89	0.91	0.90
	19	6.17	9.57	<u>10.16</u>	17.17	19.17	<u>20.18</u>	0.14	0.16	<u>0.16</u>	0.90	0.89	<u>0.88</u>
	21	11.78	14.81	<u>15.37</u>	19.74	22.32	<u>23.34</u>	0.16	0.18	<u>0.19</u>	0.90	0.89	<u>0.88</u>
	30	7.13	6.94	8.12	15.36	14.48	15.31	0.10	0.09	0.10	0.94	0.95	0.95
	31	10.27	13.06	9.10	31.17	29.70	29.06	0.24	0.22	0.22	0.57	0.64	0.61
	33	5.47	5.46	<u>7.52</u>	16.07	17.03	<u>17.63</u>	0.12	0.13	<u>0.14</u>	0.72	0.67	<u>0.68</u>
Vérification R	2	17.20	16.61	11.43	31.04	29.31	23.67	0.21	0.19	0.16	0.79	0.82	0.84
Vérification PU	4	6.69	4.96	4.75	16.34	12.24	12.12	0.11	0.08	0.08	0.95	0.96	0.96
	7	-4.74	-3.43	-2.93	16.53	13.15	11.93	0.11	0.08	0.08	0.91	0.94	0.95
	16	-4.35	-5.49	-5.39	18.75	20.03	20.00	0.11	0.12	0.12	0.91	0.92	0.92
	24	23.60	23.45	24.23	39.34	37.73	38.08	0.25	0.24	0.24	0.50	0.58	0.61
	30	-7.90	-7.74	-7.65	19.74	19.80	20.03	0.13	0.13	0.13	0.92	0.92	0.92
Vérification U	1	6.71	4.84	5.02	20.62	16.54	16.78	0.14	0.11	0.11	0.91	0.93	0.92
	2	11.15	10.50	9.44	34.76	33.65	32.18	0.21	0.20	0.20	0.69	0.70	0.72
	3	5.64	3.94	4.23	33.10	30.69	30.75	0.19	0.18	0.18	0.63	0.64	0.64
	4	8.75	5.70	5.14	29.64	20.80	20.42	0.19	0.14	0.13	0.90	0.93	0.93
	6	2.42	2.36	1.62	20.93	20.56	21.12	0.15	0.15	0.16	0.90	0.90	0.89
	7	1.22	2.70	3.44	15.19	14.36	14.24	0.11	0.10	0.10	0.85	0.87	0.88
	8	4.89	4.91	4.62	15.68	15.30	14.98	0.11	0.10	0.10	0.92	0.92	0.92
	9	9.45	10.14	9.93	17.05	17.74	17.76	0.13	0.14	0.14	0.91	0.92	0.91
	14	6.51	7.06	7.32	13.52	12.65	12.84	0.10	0.09	0.09	0.96	0.97	0.97
	16	4.34	3.43	3.51	15.36	13.62	13.36	0.09	0.08	0.08	0.93	0.94	0.94
	18	3.34	3.39	4.06	14.00	12.18	12.56	0.10	0.08	0.09	0.94	0.95	0.95
	22	12.03	9.65	10.18	28.43	24.81	24.99	0.19	0.16	0.17	0.81	0.83	0.84
	26	34.94	36.40	36.70	42.88	45.07	45.42	0.30	0.32	0.32	0.93	0.93	0.94
29	-1.85	-2.62	-1.20	23.23	23.62	21.83	0.15	0.15	0.14	0.88	0.88	0.89	
30	10.88	11.61	12.35	24.58	24.52	25.13	0.17	0.17	0.18	0.83	0.83	0.83	
33	-1.52	-1.63	-1.00	11.19	10.19	9.30	0.08	0.07	0.07	0.79	0.83	0.86	

L'ajout de l'altitude en dérive externe n'a pas d'action notable sur les indicateurs statistiques. Ceux-ci varient peu, voire même, à l'inverse de ce que laissent penser les statistiques globales sur la France, tendent à se dégrader légèrement. Ils s'améliorent cependant pour quelques AASQA, notamment AIRFOBEP/station de vérification rurale/stations urbaines, ATMO

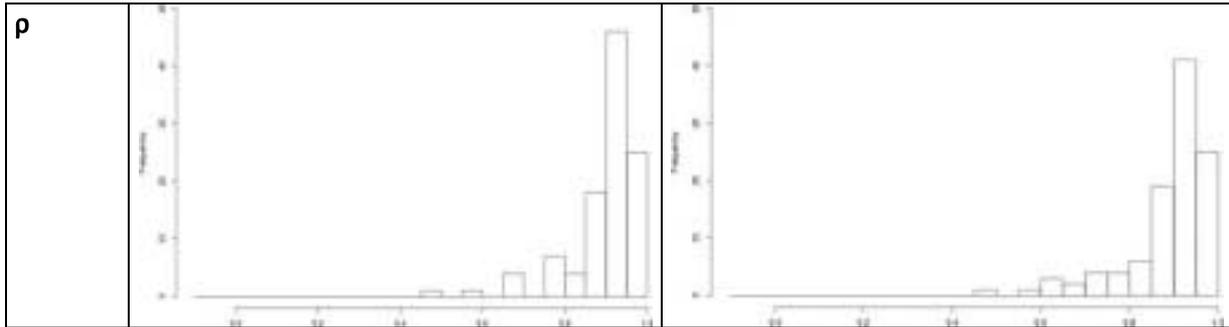
Auvergne/stations d'analyse/stations périurbaines/stations urbaines (sauf biais), l'ASPA/stations urbaines. Pour l'AIR de l'Ain et des Pays de Savoie, l'introduction de l'altitude a un effet défavorable en validation croisée mais favorable en vérification (stations urbaines).

5.4.3 Résultats par station

Les histogrammes des scores calculés par station mettent en évidence, sur l'ensemble de la période, une augmentation du pourcentage des plus faibles valeurs de l'erreur quadratique et des plus fortes valeurs de corrélation. Pour le biais, les différences sont moins nettes.

Validation croisée

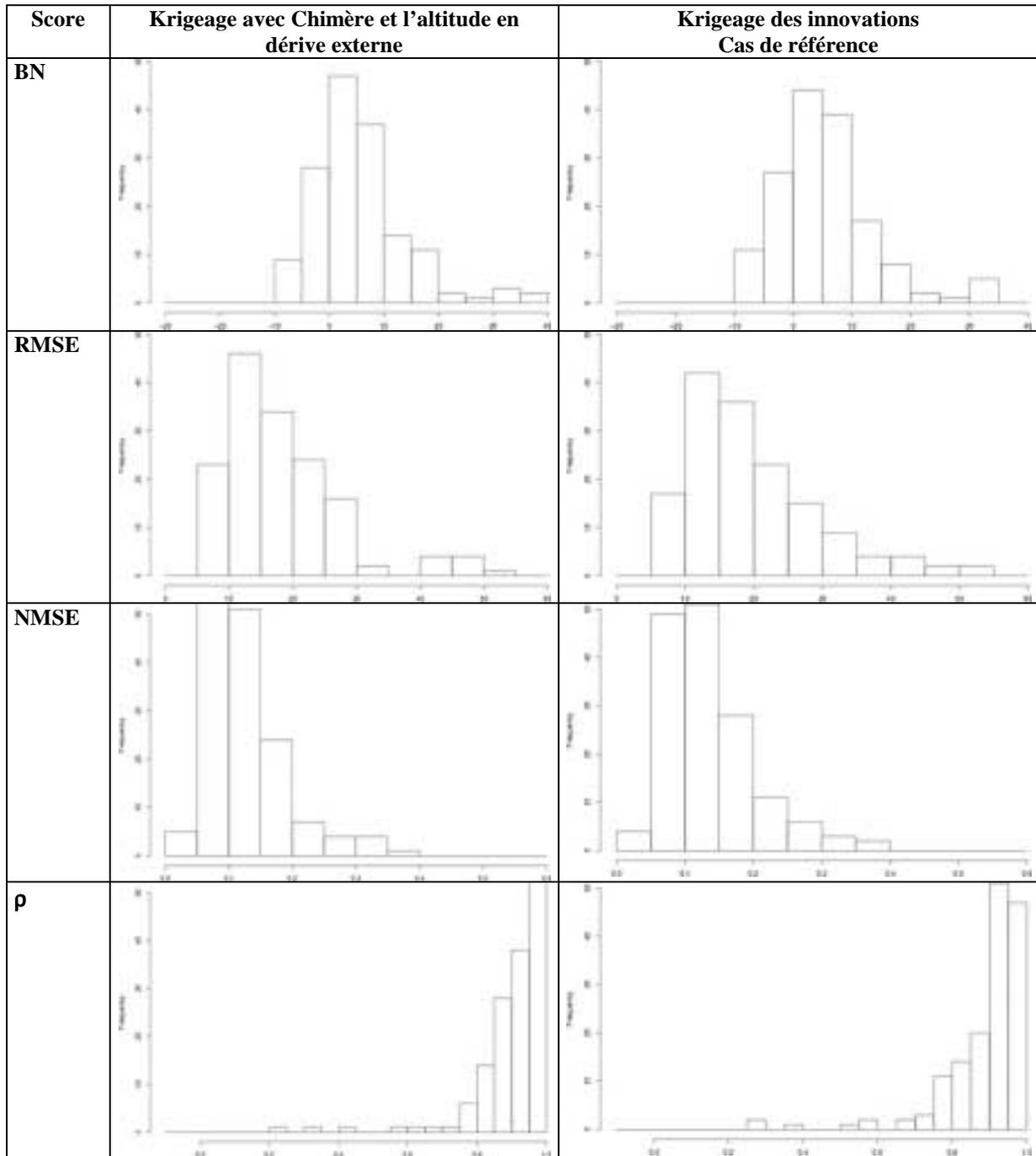
Score	Krigeage avec Chimère et l'altitude en dérive externe	Krigeage des innovations Cas de référence
BN		
RMSE		
NMSE		



Vérification : stations périurbaines

Score	Krigeage avec Chimère et l'altitude en dérive externe	Krigeage des innovations Cas de référence
BN		
RMSE		
NMSE		
p		

Vérification : stations urbaines



5.5 EXEMPLES DE CARTOGRAPHIES

Une comparaison des cartographies obtenues par les quatre méthodes testées (krigeage des innovations monovariante, krigeage des innovations avec l'altitude en dérive externe, krigeage des observations avec le modèle en dérive externe, krigeage des observations avec le modèle et l'altitude en dérive externe) complète l'étude des scores.

Trois journées sont choisies pour illustration :

- le 15 juin, journée pour laquelle la corrélation avec l'altitude est quasi nulle ;
- le 25 juin, journée pour laquelle la corrélation entre les observations ou les innovations et l'altitude est assez élevée (0,4-0,5) ;
- le 12 août, journée pendant laquelle de très fortes concentrations d'ozone ont été enregistrées et pour laquelle la corrélation entre les observations et l'altitude est assez élevée (~0,5).

Le variogramme des innovations et le variogramme des résidus de la régression entre les observations et Chimère se ressemblent (Figure 5). Ils sont également peu modifiés lorsqu'on soustrait à la variable d'étude une dérive fonction de l'altitude.

Méthode	15/06/2003	25/06/2003	12/08/2003
Krigeage des innovations			
Krigeage des innovations avec le logarithme translaté de l'altitude en dérive externe	 $cor^{SA}[innov, \ln(1 + alt)] = 0,057$ SA : stations d'analyse	 $cor^{SA}[innov, \ln(1 + alt)] = 0,492$ SA : stations d'analyse	 $cor^{SA}[innov, \ln(1 + alt)] = 0,252$ SA : stations d'analyse
Krigeage des observations avec le modèle Chimère en dérive externe	 $cor^{SA}[obs, mod] = 0,479$ SA : stations d'analyse	 $cor^{SA}[obs, mod] = 0,708$ SA : stations d'analyse	 $cor^{SA}[obs, mod] = 0,595$ SA : stations d'analyse

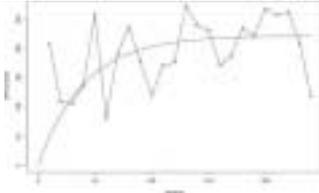
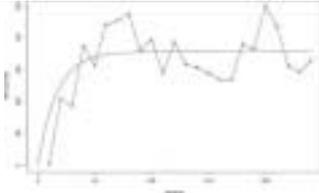
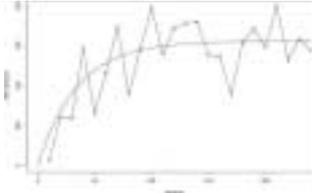
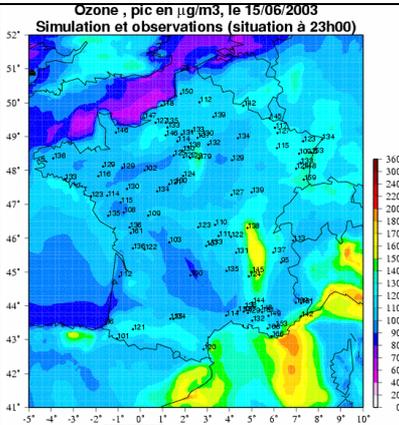
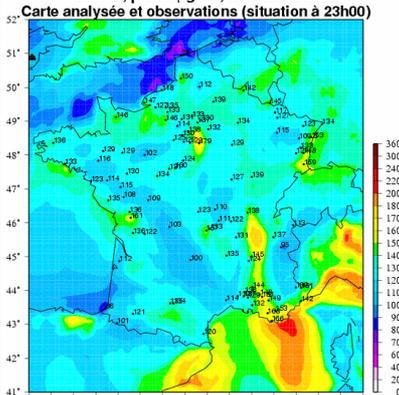
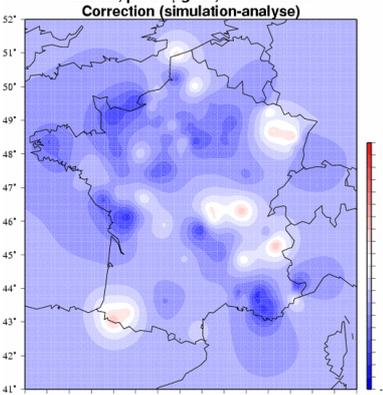
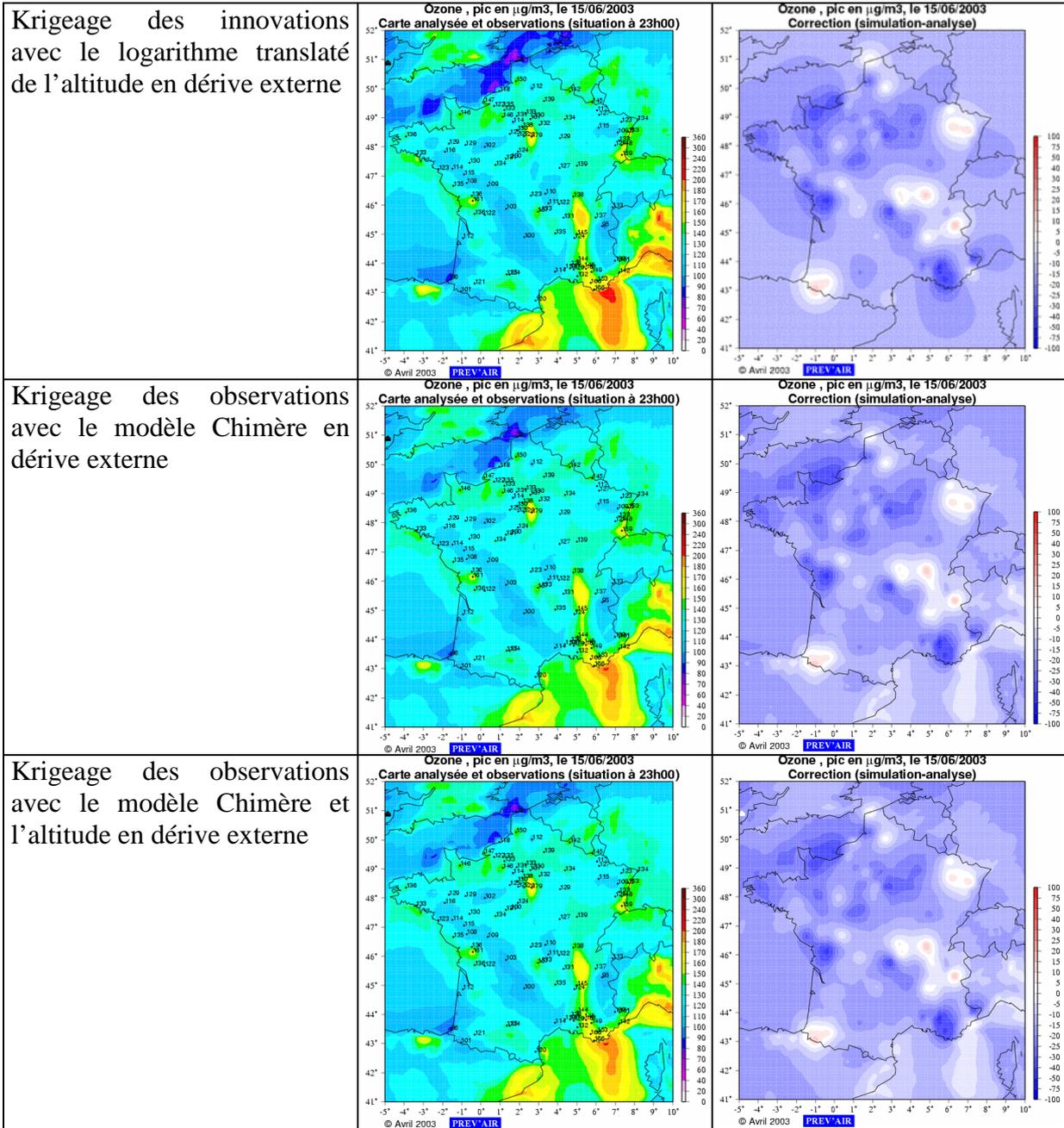
<p>Krigeage des observations avec le modèle Chimère et l'altitude en dérive externe</p>	 <p>$cor^{SA}[obs, \ln(1 + alt)] = 0,144$ SA : stations d'analyse</p>	 <p>$cor^{SA}[obs, \ln(1 + alt)] = 0,432$ SA : stations d'analyse</p>	 <p>$cor^{SA}[obs, \ln(1 + alt)] = 0,456$ SA : stations d'analyse</p>
---	---	--	---

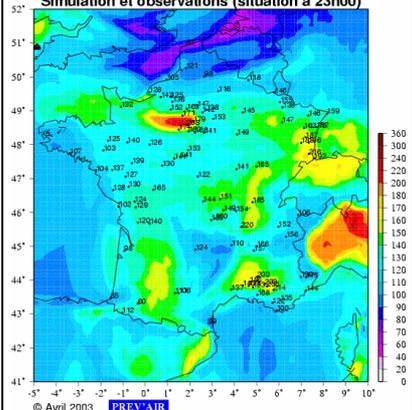
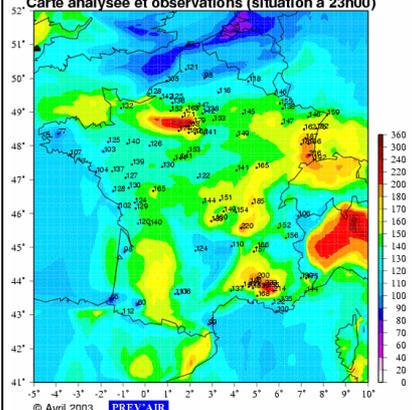
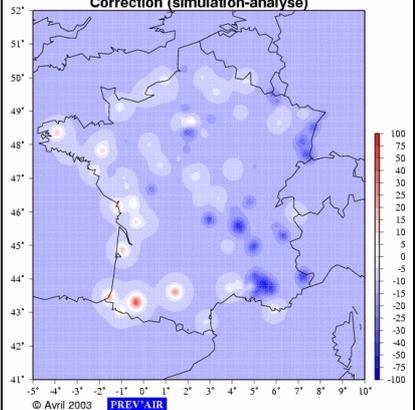
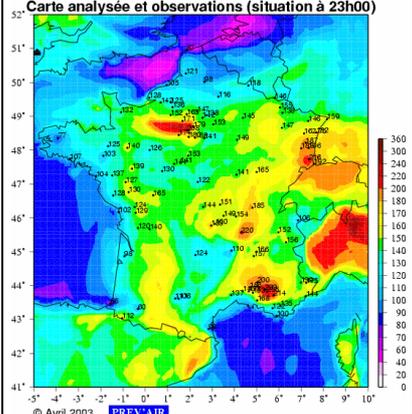
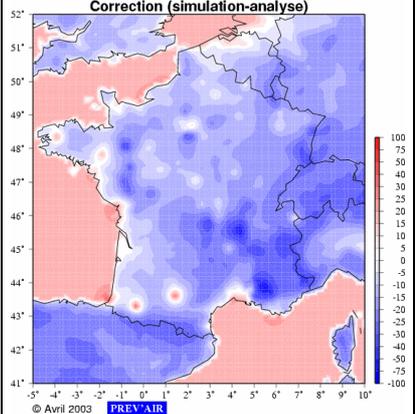
Figure 5 – Variogrammes calculés et modélisés dans chacune des approches testées.

Les cartes de concentration produites par les quatre méthodes sont similaires. Une étude plus attentive des cartes de correction montre que :

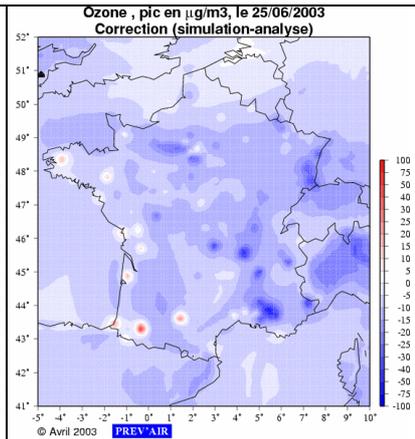
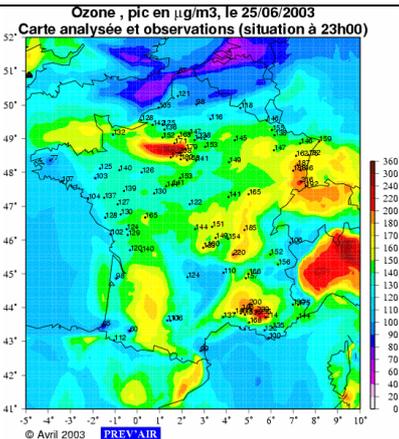
- l'usage de l'altitude n'a d'effet que lorsque cette variable présente une certaine corrélation avec les innovations ou les observations. Ainsi le 15 juin, l'influence de l'altitude n'est pas visible tandis que le 25 juin et le 12 août, le modèle est corrigé de façon plus détaillée.
- par rapport au krigeage des innovations, le krigeage des observations avec CHIMERE en dérive externe ne modifie pas la structure du champ de pollution ni la répartition des zones de correction positive, nulle ou négative. La correction apportée au modèle est cependant moins lisse.

<p>15/06/2003</p>	<p>Simulation</p>  <p>Ozone , pic en µg/m3, le 15/06/2003 Simulation et observations (situation à 23h00)</p>	
	<p>Carte analysée</p>	<p>Carte des écarts modèle-analyse</p>
<p>Krigeage des innovations</p>	 <p>Ozone , pic en µg/m3, le 15/06/2003 Carte analysée et observations (situation à 23h00)</p>	 <p>Ozone , pic en µg/m3, le 15/06/2003 Correction (simulation-analyse)</p>

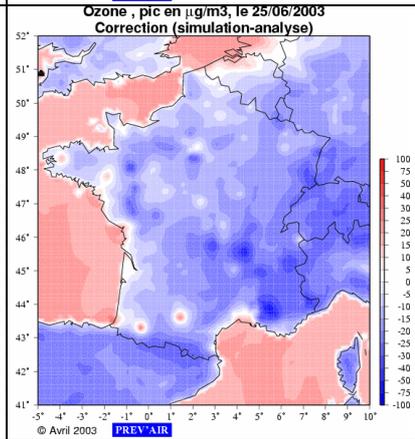
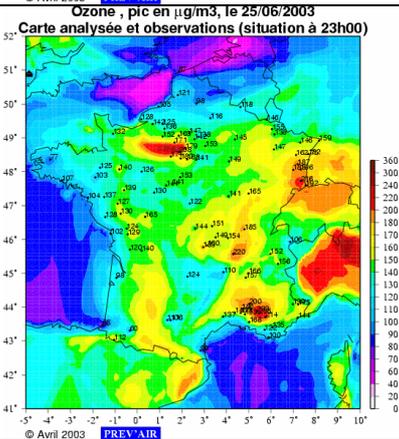


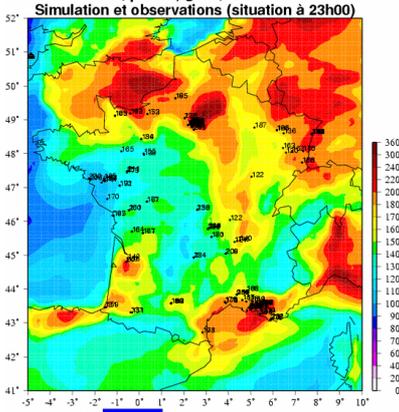
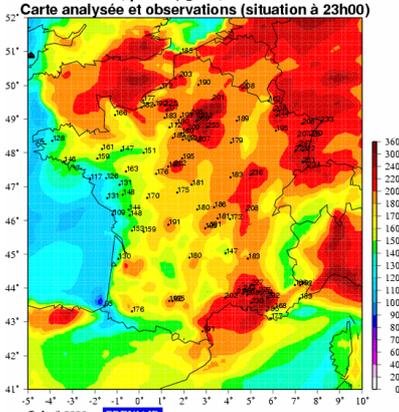
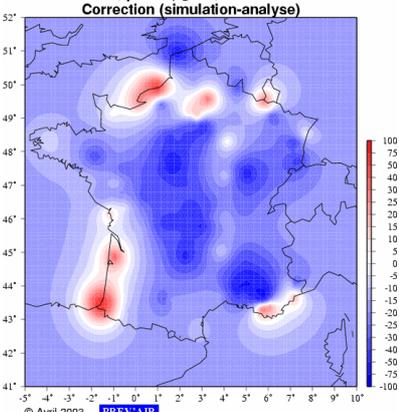
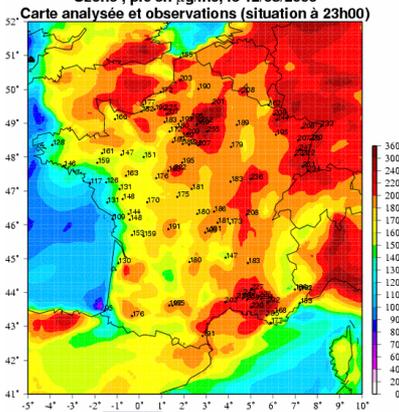
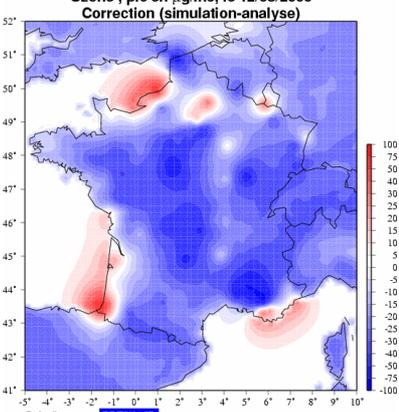
<p>25/06/2003</p>	<p>Simulation</p>	
	<p>Ozone , pic en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 25/06/2003 Simulation et observations (situation à 23h00)</p> 	
	<p>Carte analysée</p>	<p>Carte des écarts modèle-analyse</p>
<p>Krigeage des innovations</p>	<p>Ozone , pic en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 25/06/2003 Carte analysée et observations (situation à 23h00)</p> 	<p>Ozone , pic en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 25/06/2003 Correction (simulation-analyse)</p> 
<p>Krigeage des innovations avec le logarithme translaté de l'altitude en dérive externe</p>	<p>Ozone , pic en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 25/06/2003 Carte analysée et observations (situation à 23h00)</p> 	<p>Ozone , pic en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 25/06/2003 Correction (simulation-analyse)</p> 

Krigeage des observations avec le modèle Chimère en dérive externe

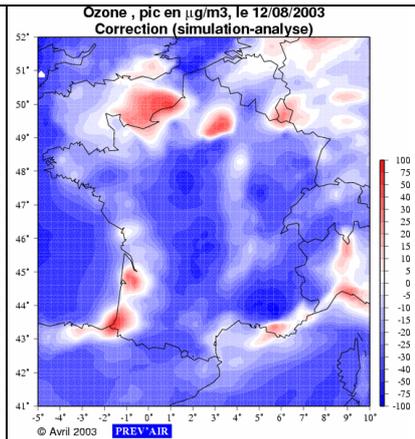
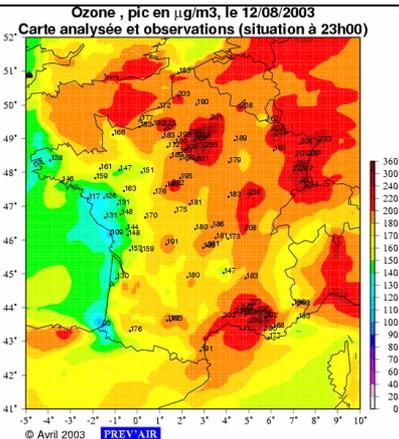


Krigeage des observations avec le modèle Chimère et l'altitude en dérive externe

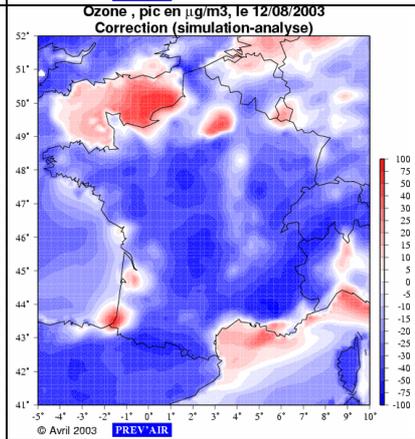
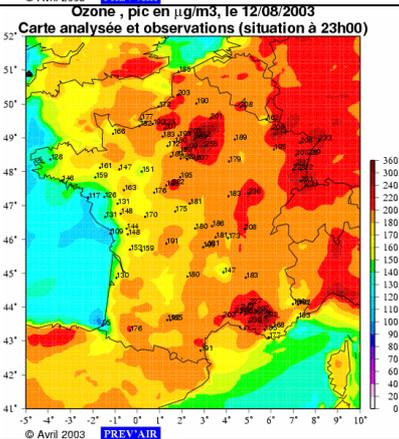


<p>12/08/2003</p>	<p>Simulation</p>	
	<p>Ozone , pic en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 12/08/2003 Simulation et observations (situation à 23h00)</p>  <p>© Avril 2003 PREVAIR</p>	
	<p>Carte analysée</p>	<p>Carte des écarts modèle-analyse</p>
<p>Krigeage des innovations</p>	<p>Ozone , pic en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 12/08/2003 Carte analysée et observations (situation à 23h00)</p>  <p>© Avril 2003 PREVAIR</p>	<p>Ozone , pic en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 12/08/2003 Correction (simulation-analyse)</p>  <p>© Avril 2003 PREVAIR</p>
<p>Krigeage des innovations avec le logarithme translaté de l'altitude en dérive externe</p>	<p>Ozone , pic en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 12/08/2003 Carte analysée et observations (situation à 23h00)</p>  <p>© Avril 2003 PREVAIR</p>	<p>Ozone , pic en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 12/08/2003 Correction (simulation-analyse)</p>  <p>© Avril 2003 PREVAIR</p>

Krigeage des observations avec le modèle Chimère en dérive externe



Krigeage des observations avec le modèle Chimère et l'altitude en dérive externe



6. CONCLUSION DE LA PARTIE 1

Dans cette étude consacrée à la cartographie du pic d'ozone, différentes méthodes d'adaptation statistique, fondées sur la technique du krigeage, ont été mises en œuvre sur le domaine français. Le but était :

- d'évaluer la sensibilité des résultats aux paramètres de calcul et de modélisation ainsi qu'à l'introduction de données secondaires;
- de comparer l'efficacité de ces méthodes.

Ce travail d'évaluation et de comparaison s'est appuyé sur l'examen d'indicateurs statistiques qui, pour chaque test réalisé, mesurent la proximité entre les valeurs estimées et observées.

Ces statistiques ont été calculées :

- dans l'espace, pour chaque jour de la période étudiée ;
- dans le temps, station par station, AASQA par AASQA et sur toute la France.

Pour certains jours en particulier, on a également comparé les cartographies obtenues et les cartes des écarts entre analyse et modèle.

En ressortent les points suivants :

- L'analyse, telle qu'elle est aujourd'hui pratiquée dans PREV'AIR (la méthode employée est le krigeage des innovations), corrige de façon efficace le modèle en zone rurale et généralement aussi en zone périurbaine. En zone urbaine en revanche, elle donne moins de satisfaction. Si elle réduit globalement l'erreur quadratique et améliore la corrélation aux points des stations urbaines, elle y augmente souvent le biais.
- Les résultats du krigeage des innovations ne sont pas très sensibles aux paramètres du variogramme expérimental ni aux paramètres d'ajustement du modèle variographique (quand ces paramètres, bien entendu, sont choisis dans des plages de valeurs cohérentes avec les dimensions du domaine d'étude et les caractéristiques du phénomène). Le choix actuel de paramètres est satisfaisant.
- La corrélation avec l'occupation du sol est faible ; les données de cette variable n'ont pas été exploitées pour l'analyse.
- La corrélation avec l'altitude, bien que variable dans le temps, est en général plus élevée ; cette variable a été introduite dans le krigeage.
- A l'issue de l'analyse de sensibilité aux paramètres du variogramme, on a effectué les quatre tests suivants :
 - Krigeage des innovations monovariante ;
 - Krigeage des innovations avec l'altitude en dérive externe ;
 - Krigeage des observations avec le modèle en dérive externe ;
 - Krigeage des observations avec le modèle et l'altitude en dérive externe.

La structure du champ de pollution est conservée d'un test à un autre et les cartographies se ressemblent. Quand une variable (modèle et/ou altitude) corrélée avec la variable d'étude (innovations ou observations) est introduite en dérive, la correction apportée au modèle est plus détaillée. En revanche, les jours où l'altitude ne présente pas de corrélation avec la variable krigée (innovations ou observations), son influence est quasi nulle.

Du point de vue de l'efficacité des méthodes, les indicateurs statistiques n'évoluent pas tous de la même manière quand on prend en compte une dérive, ce qui rend la comparaison délicate. Les statistiques sur la France et les histogrammes des statistiques par station donnent plutôt l'avantage au krigeage des observations avec le modèle et l'altitude en dérive externe. Vient en seconde position le krigeage des innovations avec l'altitude en dérive. Les statistiques spatio-temporelles par AASQA et par type de station permettent moins aisément de classer les méthodes. Le krigeage des observations avec dérive externe semble plus efficace en zone urbaine.

Afin de compléter cette analyse, il sera intéressant d'évaluer la méthode du krigeage non paramétrique, abordée dans le projet Chimère Ouest. Dans cette méthode, la variabilité entre deux sites n'est plus modélisée jour par jour ou heure par heure en fonction de la distance qui les sépare mais elle est estimée à partir des corrélations calculées dans le temps entre paires de points de la grille modèle.

- Des calculs complémentaires ont été réalisés afin d'évaluer si l'utilisation des émissions de NOx et des concentrations de NO₂ pouvait améliorer l'efficacité de l'analyse. Ces deux variables étant connues selon un pas de temps horaire, les relations avec l'ozone ont été étudiées sur cette même base temporelle : on ne s'est pas intéressé à la cartographie du pic mais à celle des concentrations heure par heure. L'heure choisie à titre d'exemple est 16hTU.

La corrélation des observations ou des innovations avec les émissions de NOx (NO ou NO₂) dépend du type de station ; elle est même différente selon qu'il s'agit de stations périurbaines ou urbaines. Cependant, quel que soit le type de station, les observations comme les innovations sont peu corrélées aux émissions. Celles-ci n'ont donc pas été retenues comme variables auxiliaires pour un krigeage avec dérive externe.

Le coefficient de corrélation entre les concentrations ou les innovations d'ozone et les concentrations de NO₂ est également faible voire nul, ce qui compromet un cokrigeage. Ponctuellement, il excède 0,2 en valeur absolue et atteint -0,37 et -0,40 pour les innovations les 17 et 24 juin. Ces deux journées ont été sélectionnées à titre d'essai pour un cokrigeage. Aucun modèle convenable pour le variogramme croisé et les variogrammes simples des deux polluants n'a pu toutefois être obtenu à l'aide des fonctions R. Cette approche n'a pas été étudiée plus avant dans ce travail.

Partie 2 : Cartographie du dioxyde d'azote

7. PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES

On s'intéresse à la cartographie des concentrations de dioxyde d'azote, sur la France pendant l'été 2003, du 15 juin au 15 septembre. La période hivernale fera l'objet d'une étude complémentaire.

7.1 DONNEES MODELE

Les données modèle utilisées dans cette étude sont les sorties du modèle CHIMERE, version V200402D, mis en œuvre dans une configuration « régionale » :

- à l'échelle de la France (domaine horizontal de 5° Ouest à 10° Est, et de 41° Nord à 52° Nord)
- à une résolution spatiale de 0.15° en longitude et de 0.10° en latitude, soit environ 10km dans les deux directions. Il y a donc 101=11211 points de grille modèle
- Seule la chimie gazeuse a été activée.

Nous utilisons les données modèles issues d'une simulation de la période estivale 2003, effectuée en utilisant les analyses météorologiques globales du NCEP (National Centers for Environmental Prediction⁸).

Une description détaillée du modèle est disponible sur Internet à l'adresse suivante :

<http://euler.lmd.polytechnique.fr/chimere>

7.2 DONNEES D'OBSERVATION

Les données d'observation de dioxyde d'azote utilisées proviennent de la BDQA. Ce sont donc des données validées par les AASQA.

La cartographie porte sur les concentrations moyennes journalières de dioxyde d'azote, calculées à partir des données horaires de concentration de ce polluant.

Les mesures utilisées ont été effectuées sur des stations rurales, périurbaines et urbaines. Les stations de mesure de types trafic et industriel ne sont pas prises en compte pour cette étude.

On a considéré pour cette étude deux jeux successifs de stations :

1. Un jeu de 87 stations, dont 14 rurales et 73 périurbaines (cf. Figure 7-1) ;
2. Un jeu de 108 stations, constitué des mêmes que pour le jeu 1, augmenté de 22 stations urbaines (cf. Figure 7-2).

Nous avons utilisé l'ensemble des stations rurales et périurbaines disponibles – à l'exception de la station 07015 « Sommet du Puy de Dôme », rurale et marquée par des événements de forte concentrations de NO₂ de très petite échelle. Il faut remarquer que le nombre de stations rurales mesurant le dioxyde d'azote est très faible, surtout en comparaison du nombre de stations de mesure d'ozone (53 stations). Ce point rend la « validation » des méthodes de krigeage en zone rurale particulièrement délicat.

Les stations urbaines sélectionnées pour la construction du jeu 2 mesurent toutes également l'ozone – à l'exception des stations 12025 et 12026. Elles ont été choisies sur la base de la sélection des stations effectuée pour la cartographie des concentrations d'ozone. Notons que l'on dispose au total de 232 stations urbaines mesurant le dioxyde d'azote.

⁸ <http://wwwt.ncep.noaa.gov/>

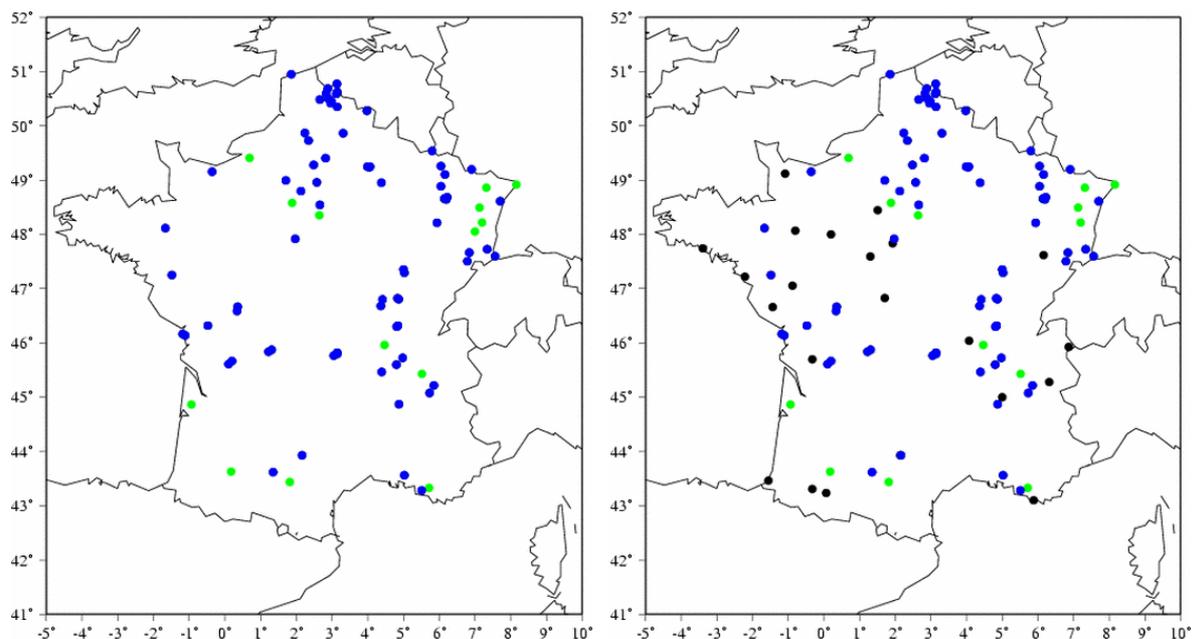


Figure 7-1 Stations utilisées pour la cartographie de NO₂, jeu 1. Les stations rurales sont en vert, les périurbaines en bleu, les stations urbaines apparaissent en noir.

Figure 7-2 Stations utilisées pour la cartographie de NO₂, jeu 2. Les stations rurales sont en vert, les périurbaines en bleu, les stations urbaines apparaissent en noir.

7.3 DONNEES ADDITIONNELLES

Pour cartographier à l'échelle locale les concentrations atmosphériques de dioxyde d'azote, on cherche à "mixer" les sorties à relativement haute résolution du modèle CHIMERE et les observations, complétées éventuellement de données additionnelles susceptibles d'avoir un impact sur les concentrations de dioxyde d'azote (émissions, taux d'urbanisation).

7.3.1 Données de taux d'urbanisation

Elles proviennent de la base de données GLCF (Global Land Cover Facility⁹). Les données de départ sont à 1 km de résolution ; on en a déduit un taux d'urbanisation moyen sur chacune des cellules de la grille modèle.

7.3.2 Données d'émissions de NO_x

Elles sont issues de la base de données EMEP¹⁰ pour l'année 2001. Ce sont d'ailleurs ces données qui sont fournies pour l'ensemble des polluants en entrée du modèle CHIMERE-Régional pour la simulation de l'année 2003.

Les données de départ sont disponibles sur la grille « EMEP » de résolution 50 km x 50 km. Ils s'agit de données annuelles, fournies par secteurs d'activité SNAP. Elles ont été redistribuées en espace (résolution spatiale de 1 km x 1 km) et en temps (résolution horaire), et regroupées en données d'émission d'espèces modèles, de façon cohérente avec les exigences du modèle.

⁹ <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>

¹⁰ <http://www.emep.int/>

8. EVALUATION STATISTIQUE DES METHODES DE KRIGEAGE

N.B. : Le principe des techniques de krigeage mises en œuvre dans cette étude n'est pas décrit dans cette partie. Pour une description détaillée, on peut se rapporter au guide d'utilisation [2].

8.1 TESTS REALISES

Le travail présenté ci-après est consacré à la cartographie de la moyenne journalière du dioxyde d'azote. Les expériences suivantes ont été :

- **Krigeage des innovations - analyse de sensibilité aux paramètres du variogramme** : on fait varier certains paramètres de calcul du variogramme expérimental et les paramètres d'ajustement du modèle variographique (cf. partie 9) ;
- **Krigeage des innovations - analyse de sensibilité aux variables auxiliaires** : on introduit une par une, en tant que dérive externe, des variables potentiellement explicatives (cf. partie 10) ;
- **Analyse de sensibilité à la méthode de krigeage** : le krigeage des innovations est remplacé par un krigeage des observations avec le modèle CHIMERE en dérive externe (cf. partie 10).

Les calculs font appel à deux fichiers de stations de mesure :

- un **fichier d'analyse**, qui contient la liste des stations effectivement utilisées dans le krigeage. (cf. paragraphe 7.2)
- un **fichier de vérification**, complémentaire du précédent, qui contient la liste des stations rurales, périurbaines et urbaines non retenues dans le krigeage et réservées à l'évaluation.

L'ensemble du travail est réalisé avec R (version 1.9.1), logiciel de statistique librement téléchargeable sur Internet (<http://cran.cict.fr/>), et avec des bibliothèques associées (akima, chron, geoR, gstat, splancs).

8.2 VALIDATION CROISEE

La première méthode d'évaluation de l'incidence sur le krigeage d'une modification d'un paramètre est la méthode de **validation croisée**. Elle consiste à éliminer temporairement une station du fichier d'analyse puis à estimer par krigeage la concentration en ce point à l'aide des stations restantes. Cette opération est répétée pour toutes les stations du fichier. Ainsi, on dispose pour chacune d'elles d'une concentration estimée \hat{Z}_i^a et d'une valeur observée Z_i^a .

8.3 VERIFICATION SUR UN JEU DE STATIONS INDEPENDANTES

La seconde méthode d'évaluation de l'incidence sur le krigeage d'une modification d'un paramètre consiste en une **vérification sur un jeu de stations indépendant**. Le krigeage des innovations est effectué aux stations exclues de l'analyse. Pour chacune d'elles, on dispose comme précédemment d'une concentration estimée \hat{Z}_i^v et d'une valeur observée Z_i^v .

Le variogramme utilisé est le modèle défini sur les stations d'analyse.

8.4 INDICATEURS STATISTIQUES CALCULES

A l'issue de chaque évaluation, différents indicateurs statistiques, encore appelés scores, sont calculés. Soient $Z_i, i=1 \dots N$, un ensemble d'observations et \hat{Z}_i les concentrations estimées aux mêmes points, les indicateurs considérés sont :

Biais absolu (BA)	$BA = \frac{1}{N} \cdot \sum \hat{Z}_i - Z_i$
Biais normalisé (BN)	$BN = \frac{1}{N} \cdot \sum \frac{\hat{Z}_i - Z_i}{Z_i} \cdot 100\%$
Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum (\hat{Z}_i - Z_i)^2}$
Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (NMSE)	$NMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum \left(\frac{\hat{Z}_i - Z_i}{Z_i} \right)^2} \cdot 100\%$
Coefficient de corrélation (ρ)	$\rho = \frac{\text{cov}(\hat{Z}_i, Z_i)}{\sqrt{\text{var}(\hat{Z}_i)} \cdot \sqrt{\text{var}(Z_i)}}$

Les statistiques ont été calculées :

- jour par jour, sur l'ensemble des stations (statistiques spatiales)
- sur l'ensemble des jours et des stations (statistiques spatio-temporelles) ;
- sur l'ensemble des jours, station par station (statistiques temporelles);
- sur l'ensemble des jours et pour chaque type (urbain / rurale / périurbaine) de stations.

9. KRIGEAGE DES INNOVATIONS: INFLUENCE DES PARAMETRES DE KRIGEAGE

9.1 EXPERIENCES REALISEES

Dans un premier temps, les cartographies de NO₂ ont été générées en utilisant la méthode de krigeage des innovations, avec les paramètres qui figurent dans le tableau ci-dessous (expérience 1b). Le modèle de variogramme utilisé pour toutes les expériences est exponentiel.

Ex p.	Méthode de krigeage	Jeu de stations	Effet de pépite	Distance max / taille des « bins » (km)
1b	Innovations	1	Fixé à zéro	240 / 10

Dans l'expérience 1b, les variogrammes obtenus expérimentalement sont très irréguliers. Même à courte distance, la variabilité des données peut être importante (cf. Figure 9-1).

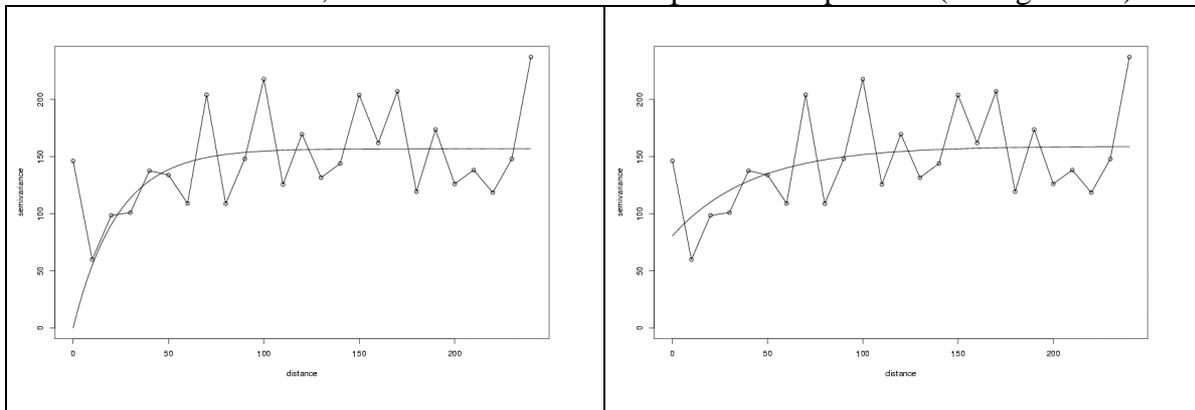


Figure 9-1 Variogrammes modèle et expérimentaux établis pour le 07/08/2003, expériences 1b à gauche et 1c à droite.

On a tenté de mieux ajuster le modèle de variogramme au variogramme expérimental en prenant en compte un "effet de pépite" (expérience 1c): le paramètre "pépite" est calculé lors de l'ajustement du variogramme modèle sur le variogramme expérimental; lorsque ce paramètre est différent de zéro, sa valeur s'interprète comme une variance, somme de la variance des données à petite échelle proprement dite et de la variance des données due à l'erreur de mesure.

Certains variogrammes sont marqués par un « saut » pour une distance de séparation de 80 à 100 km (cf. Figure 9-2).

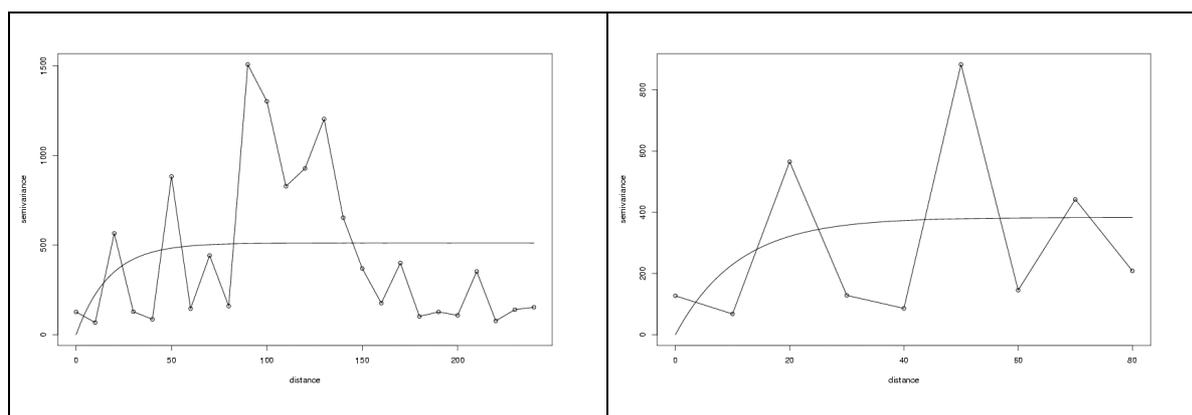


Figure 9-2 Variogrammes modèle et expérimentaux établis pour le 10/08/2003, expériences 1b et 1d.

On a réduit la "portée" du modèle de variogramme, c'est-à-dire la distance maximale entre deux points, prise en compte lors de l'ajustement du variogramme modèle sur le variogramme expérimental (expérience 1d).

Les expériences réalisées sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Ex p.	Méthode de krigeage	Jeu de stations	Effet de pépite	Distance max / taille des « bins » (km)
1b	Innovations	1	Fixé à zéro	240 / 10
1c	Innovations	1	Calculé lors de l'ajustement du variogramme	240 / 10
1d	Innovations	1	Fixé à zéro	80 / 10
2	Innovations	2	Fixé à zéro	240 / 10
2b	Innovations	2	Calculé lors de l'ajustement du variogramme	80 / 10

9.2 RESULTATS STATISTIQUES

Le tableau ci-dessous présente les résultats statistiques obtenus pour l'expérience 1b.

Type stations	Nobs	BAa	BAm	RMSEa	RMSEm	Corra	Corrm
Rurales (VC1)	900	5.6	0.5	9.5	5.4	0.41	0.59
Périurbaines (VC1)	6303	-0.5	-5.9	10.4	13.2	0.51	0.36
Urbaines (VIND)	19779	-4.7	-8.8	13.2	16.5	0.55	0.44

VC1: indicateurs calculés par validation croisée

VIND: indicateurs calculés sur un jeu indépendant de stations

Le krigeage a pour effet de détériorer tous les indicateurs - absolus et relatifs (non montrés) - calculés sur les stations rurales. En effet, comme on l'a mentionné précédemment, les concentrations de dioxyde d'azote sont fortement influencées par des phénomènes locaux. Dans le krigeage des innovations, des concentrations modèles en des points de grille ruraux sont parfois corrigées des innovations associées à des points de grille de type plus urbain, en lesquels le modèle a tendance à sous-estimer les concentrations (innovations positives). Par conséquent, les concentrations modèles aux points de grille ruraux sont corrigées d'innovations positives, ce qui explique le biais positif obtenu après krigeage sur ces stations. Remarquons d'ailleurs que la quantité BAa-BAm vaut respectivement: 5.1 et 5.4 pour les stations rurales et périurbaines.

En revanche, sur les stations périurbaines, les indicateurs absolus (biais, RMSE et corrélation) sont améliorés (de 92, 21 et 42% respectivement). Ceci est vrai également pour les stations urbaines: le biais, la RMSE et la corrélation sont améliorés en moyenne respectivement de 47, 20 et 25%.

Pour ces deux derniers types de stations, les indicateurs relatifs ne sont pas toujours améliorés par le krigeage des innovations: celui-ci a un effet différent selon les niveaux des concentrations moyennes journalières de dioxyde d'azote.

Les tableaux ci-dessous présentent les résultats statistiques obtenus pour les expériences 1b, 1c, 1d, 2 et 2b, sous forme de « gain » en % :

- $\text{abs}(\text{biais analyse} / \text{biais modèle}) * 100$
- $\text{abs}(\text{RMSE analyse} / \text{RMSE modèle}) * 100$
- $\text{abs}(\text{corrélation analyse} / \text{corrélation modèle}) * 100$

Pour les deux premiers indicateurs, une amélioration de l'indicateur se traduit par une valeur inférieure à 100% ; une amélioration de la corrélation, par une valeur supérieure à 100%.

Dans les expériences 1c et 2b (dans lesquels l'effet de pépite est calculé lors de l'ajustement du variogramme), la matrice de covariance n'est pas toujours inversible, ce qui explique que le nombre de données sur lesquelles sont calculés les scores soit quelquefois plus faible.

Dans toutes les expériences réalisées, le krigeage a pour effet de détériorer les différents indicateurs calculés sur les stations rurales, cette détérioration étant comparable d'une expérience à une autre. Le biais en particulier est fortement dégradé.

Exp.	Type stations	Nobs	BAa/BAm	RMSEa/RMSEm	Corra/Corrm
1b	Rurales	900	1120	176	69
1c	Rurales	871	1080	167	71
1d	Rurales	900	1100	167	83
2	Rurales	900	1240	180	76
2b	Rurales	860	1550	163	90

Les indicateurs calculés sur les stations périurbaines sont relativement stables, et les gains sont importants sur tous: le gain sur le biais varie entre 86 et 98%; celui sur la RMSE, entre 20 et 25%; celui sur la corrélation, entre 36 et 50%. Pour les expériences 2 et 2b, le biais est pratiquement nul.

Exp.	Type stations	Nobs	Baa/Bam	RMSEa/RMSEm	Corra/Corrm
1b	Périurbaines	6303	8	79	142
1c	Périurbaines	6099	14	75	150
1d	Périurbaines	6303	8	80	136
2	Périurbaines	6303	2	78	144
2b	Périurbaines	6030	3	77	142

Les gains calculés sur les stations urbaines sont calculés de deux manières différentes:

- en validation croisée pour les expériences 2 et 2b dans lesquelles des stations urbaines sont prises en compte lors du krigeage;
- en vérification sur les stations urbaines indépendantes pour toutes les expériences.

Dans les expériences 2 et 2b, les gains - calculés en validation croisée - sur les RMSE et les corrélations sont plus élevés sur les stations urbaines que sur les stations périurbaines: de l'ordre de 40% sur la RMSE et plus de 100% sur la corrélation. Le gain sur le biais est de l'ordre de 75%. Les gains sont peu différents d'une expérience à l'autre.

Les gains - calculés en vérification sur les stations urbaines indépendantes - sont stables: le gain sur le biais varie entre 47 et 59%; celui sur la RMSE vaut approximativement 20%; celui sur la corrélation varie entre 23 et 31%.

VCI

Exp.	Type stations	Nobs	BAa/BAm	RMSEa/RMSEm	Corra/Corrm
2	Urbaines	1960	24	64	230
2b	Urbaines	1873	27	61	250

VIND

Exp.	Type stations	Nobs	BAa/BAm	RMSEa/RMSEm	Corra/Corrm
1b	Urbaines	19779	53	80	125
1c	Urbaines	19143	48	79	123
1d	Urbaines	19779	52	80	123
2	Urbaines	17819	47	78	131
2b	Urbaines	17058	41	78	126

9.3 RESULTATS CARTOGRAPHIQUES

Le tableau suivant présente les corrections apportées dans les différentes expériences de krigeage: corrections minimale, maximale et moyenne; percentiles 5, 25, 75 et 95 des corrections.

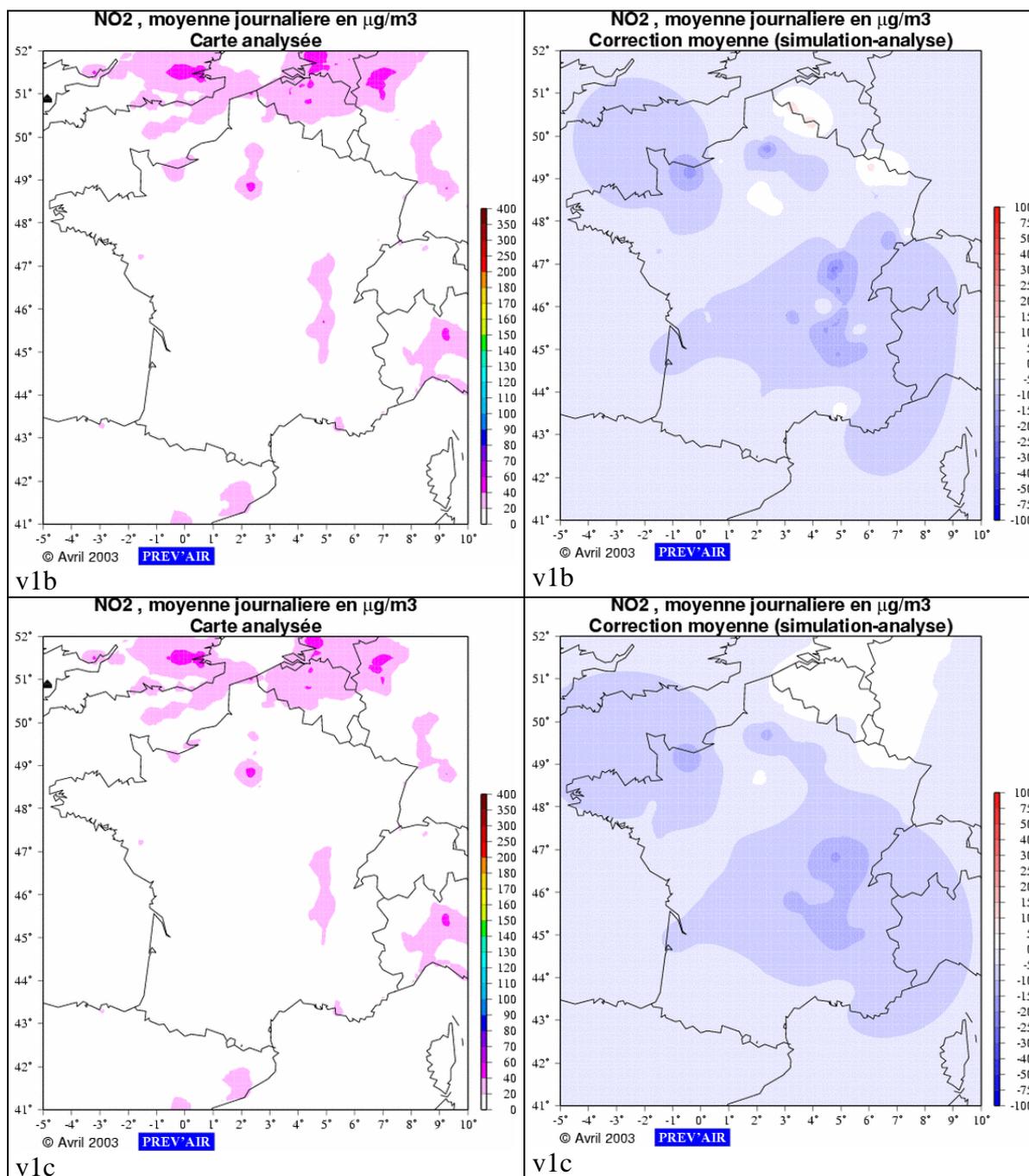
Remarque: le terme "correction" désigne la quantité "concentration modèle - concentration analysée".

Exp.	Correction min.	P05 des corrections	P25 des corrections	P75 des corrections	P95 des corrections	Correction max.	Correction moyenne
1b	-24.2	-8.2	-5.2	-3.9	-1.4	8.0	-4.6
1c	-16.5	-9.1	-5.5	-2.9	0.4	4.9	-4.3
1d	-21.8	-5.9	-4.8	-4.5	-3.1	6.6	-4.6
2	-23.6	-9.2	-6.2	-5.0	-2.5	7.5	-5.7
2b	-13.9	-7.8	-6.1	-5.3	-3.9	1.9	-5.7

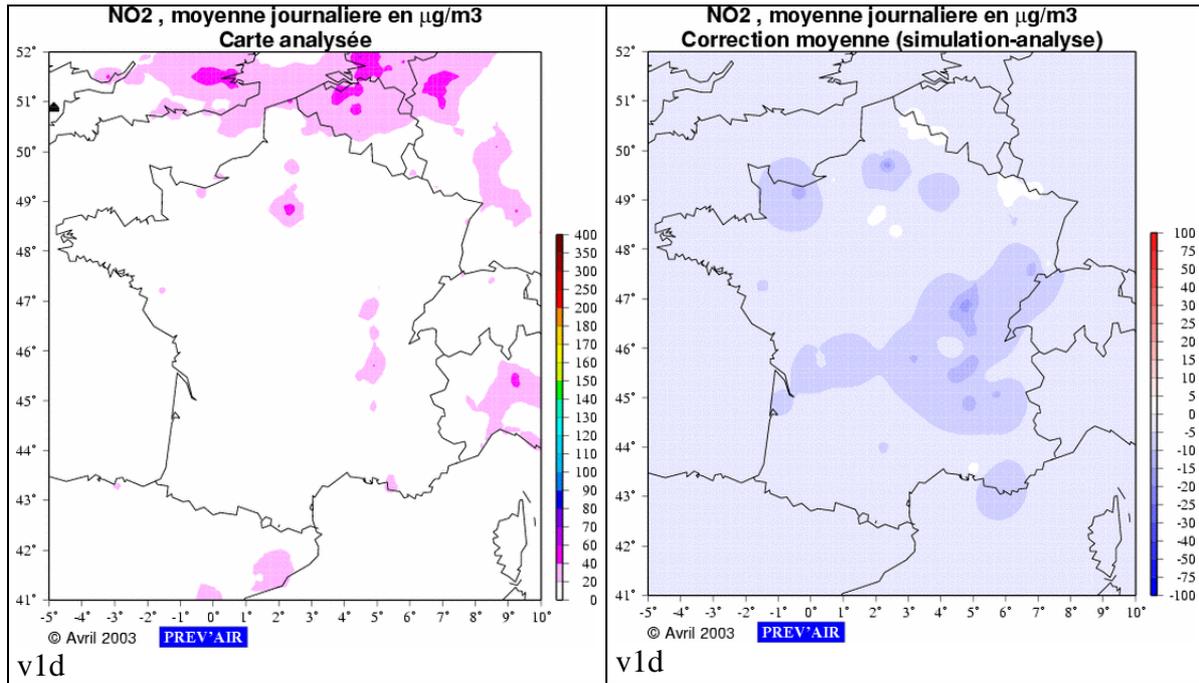
Les quantités ci-dessus sont calculées sur les corrections moyennes sur toute la période estivale; ces corrections moyennes sont représentées, pour chacune des expériences considérées, dans les cartes ci-dessous (cartes de droite). Les cartes de gauche représentent les concentrations moyennes de NO2 obtenues après krigeage.

On retrouve, dans la carte des corrections associée à l'expérience v1b, le fait que la correction apportée par le krigeage est *en moyenne* négative (-4.6 µg/m3): les concentrations analysées sont *en moyenne* plus élevées que les concentrations modèle initiales. Mais cette carte montre aussi qu'il existe des zones dans lesquelles la correction apportée par le krigeage est positive: c'est le cas autour de l'agglomération parisienne, dans la région de Metz, de Lille et autour de Marseille (de façon très localisée). A l'exception de l'expérience v2b, toutes les expériences réalisées conduisent à des corrections positives des concentrations de dioxyde d'azote dans les régions citées ci-dessus.

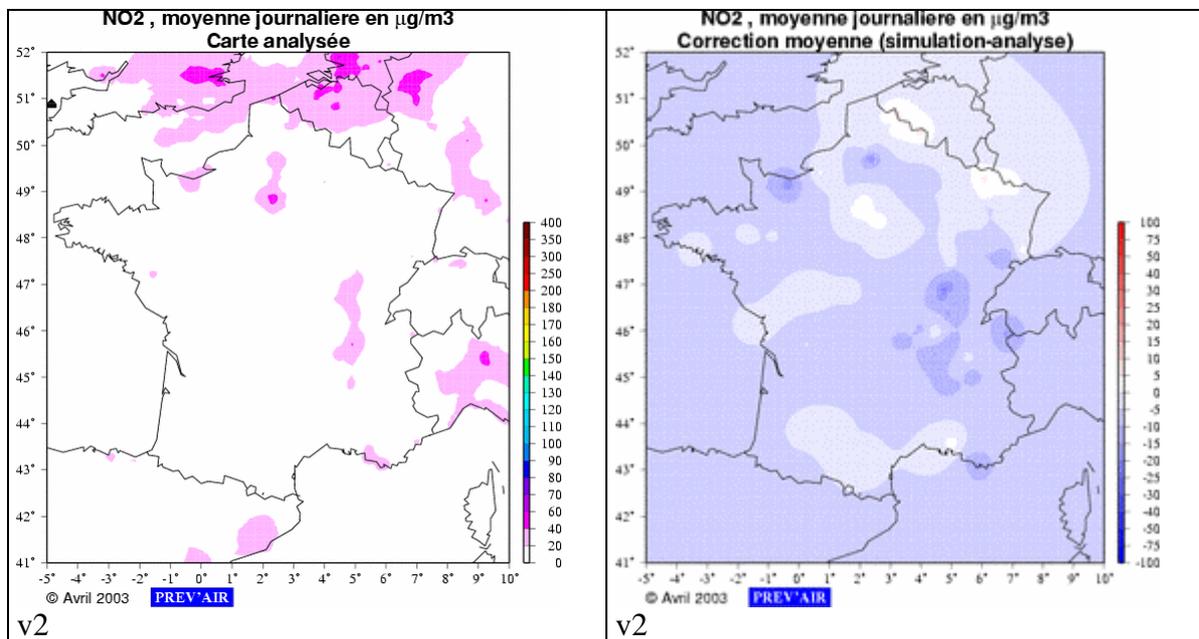
Les cartes des expériences v1b et v1c présentent des structures identiques; les valeurs extrêmes des corrections sont plus faibles (en valeur absolue) lorsque l'effet de pépité est ajusté (expérience 1c); les valeurs moyennes des corrections sont identiques dans les deux expériences (-4.6 µg/m3).



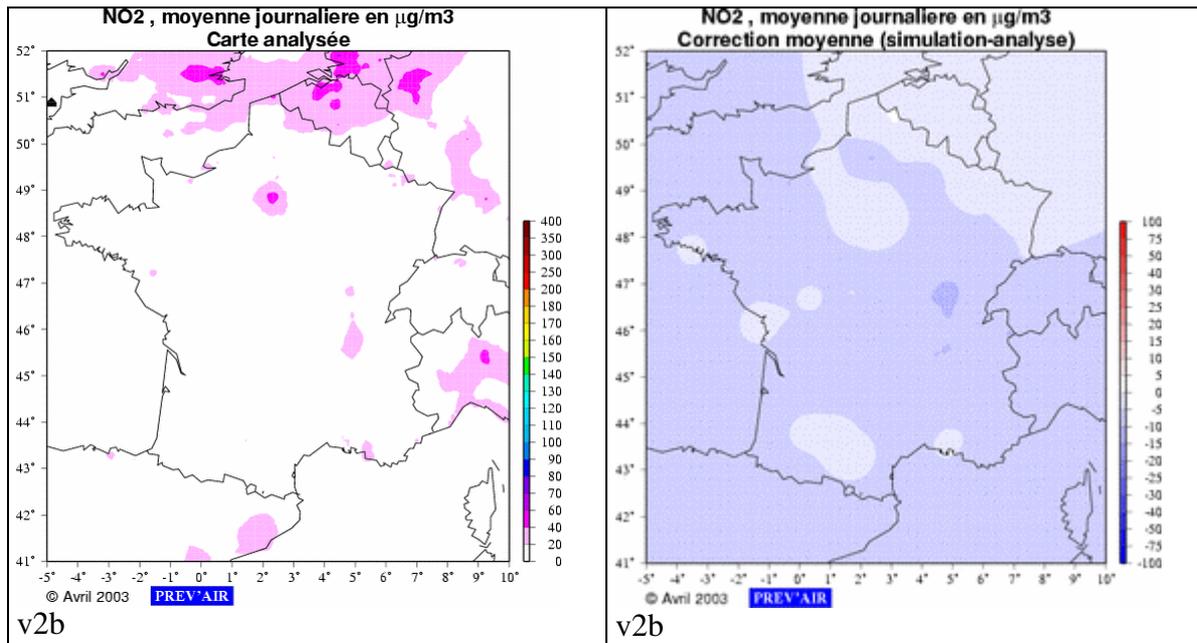
La carte des corrections de l'expérience v1d présente des structures plus morcelées que la carte 1b; néanmoins, on retrouve dans les deux expériences la même répartition spatiale des corrections les plus fortement négatives. Les valeurs extrêmes des corrections sont légèrement plus faibles (en valeur absolue) lorsque la portée est réduite à 80km (expérience 1d); les valeurs moyennes des corrections sont identiques dans les deux expériences (-4.6 et -4.3 µg/m3).



La carte des corrections de l'expérience v2 présente également des structures plus morcelées que la carte 1b et plus de détails - ceci étant lié au fait que l'on prend en compte plus de stations lors du krigeage; on retrouve dans les deux expériences la même répartition spatiale des corrections. Les valeurs extrêmes des corrections sont identiques; la valeur moyenne des corrections est plus élevée dans l'expérience v2 que dans l'expérience v1b (-5.7 contre -4.6 µg/m³).



Enfin, dans la carte des corrections de l'expérience v2b, les structures des corrections ont pratiquement disparu. Les valeurs extrêmes des corrections sont plus faibles (en valeur absolue) dans l'expérience 2b; les valeurs moyennes des corrections sont identiques dans les deux expériences (-5.7 µg/m³).



Enfin, il faut noter que, si les cartes des corrections présentent un certain nombre de différences notables, celles des concentrations de NO₂ sont relativement robustes d'une expérience à l'autre.

10. RESULTATS POUR LES AUTRES METHODES DE KRIGEAGE

10.1 EXPERIENCES REALISEES

Des expériences supplémentaires ont été réalisées, en introduisant des données additionnelles susceptibles d'avoir un impact sur les concentrations de dioxyde d'azote; les données additionnelles prises en compte sont les émissions de NOx (flux moyens journaliers) et le taux d'urbanisation associé à chaque point de grille.

Les méthodes de krigeage qui ont été mises en œuvre avec ces données additionnelles sont :

- Le krigeage des innovations avec le taux d'urbanisation ou les émissions de NOx en dérive externe (DE) dans les expériences v2.1 et 2.2;
- Le krigeage des observations avec le modèle et le taux d'urbanisation ou les émissions de NOx en dérive externe (DE) dans les expériences v2.3 et 2.4.

E xp .	Méthode de krigeage	Jeu de stations	Nugget	Distance max / taille des « bins » (km)
2	Innovations	2	Fixé à zéro	240 / 10
2.1	Innovations + émissions en DE	2	Fixé à zéro	240 / 10
2.2	Innovations + urbanisation en DE	2	Fixé à zéro	240 / 10
2.3	Observations + modèle et émissions en DE	2	Fixé à zéro	240 / 10
2.4	Observations + modèle et urbanisation en DE	2	Fixé à zéro	240 / 10

La prise en compte de données additionnelles n'est pertinente que si celles-ci sont corrélées avec la quantité que l'on cherche à estimer (innovation ou concentration). Si la corrélation est faible, la prise en compte de données additionnelles n'influe pas sur le résultat du krigeage. Les corrélations ont donc été estimées, pour chaque type de stations, entre les données additionnelles et les observations de NO2 d'une part; les données additionnelles et les innovations d'autre part.

Les résultats ne sont pas uniformes:

- pour les stations rurales, les corrélations les plus élevées sont obtenues entre les émissions de NOx et les observations de NO2; les corrélations des taux d'urbanisation avec les observations de NO2 sont également assez élevées;

Données.	Type stations	Nobs	MI	CorrOBS	CorrI
Emissions de NOx	Rurales	900	-0.5	0.47	-0.05
Taux d'urbanisation	Rurales	900	-0.5	0.41	-0.11

- pour les stations périurbaines, entre les émissions de NOx et les innovations;

Données.	Type stations	Nobs	MI	CorrOBS	CorrI
Emissions de NOx	Périurbaines	6303	5.9	0.17	-0.27
Taux d'urbanisation	Périurbaines	6303	5.9	0.03	-0.17

- pour les stations urbaines, les corrélations obtenues avec chaque type de données additionnelles sont homogènes; elles sont plus élevées avec les innovations.

Données.	Type stations	Nobs	MI	CorrOBS	CorrI
Emissions de NOx	Urbaines	19779	8.8	0.30	-0.40
Taux d'urbanisation	Urbaines	19779	8.8	0.27	-0.40

Notons que les corrélations entre données additionnelles et observations d'une part et données additionnelles et innovations d'autre part sont de signes opposés.

10.2 RESULTATS STATISTIQUES

Dans le tableau ci-dessous, on a mentionné à titre de référence les résultats statistiques obtenus pour l'expérience 2.

Eté

Type stations	Nobs	BAa	BAm	RMSEa	RMSEm	Corra	Corrm
Rurales (VC1)	900	6.2	0.5	9.7	5.4	0.45	0.59
Périurbaines (VC1)	6303	-0.1	-5.9	10.3	13.2	0.52	0.36
Urbaines (VC1)	1960	-2.0	-8.2	7.0	11.0	0.46	0.20
Urbaines (VIND)	17819	-4.2	-8.9	13.2	17.0	0.55	0.42

VC1: indicateurs calculés par validation croisée

VIND: indicateurs calculés sur un jeu indépendant de stations

Les tableaux ci-dessous présentent de nouveau les résultats statistiques obtenus pour les expériences 2 à 2.4, sous forme de « gain » en % :

Comme précédemment, dans toutes les expériences réalisées, le krigeage a pour effet de détériorer les différents indicateurs calculés sur les stations rurales. Cette détérioration, relativement comparable d'une expérience à une autre, est plus marquée pour les méthodes de krigeage avec le modèle en dérive externe (expériences 2.3 et 2.4). Le biais est toujours fortement dégradé.

Exp.	Type stations	Nobs	BAa/BAm	RMSEa/RMSEm	Corra/Corrm
2	Rurales	900	1240	180	76
2.1	Rurales	900	1380	185	80
2.2	Rurales	900	1280	181	75
2.3	Rurales	900	1440	183	64
2.4	Rurales	900	1440	183	64

Les indicateurs calculés sur les stations périurbaines sont relativement stables et les gains sont importants: pour les RMSE, le gain vaut entre 21 et 24% et les corrélations entre 39 et 44%. Le gain sur le biais varie entre 88 et 98%, il est plus faible avec les méthodes de krigeage avec le modèle en dérive externe (expériences 2.3 et 2.4). Pour les expériences 2 et 2.2, le biais est pratiquement nul.

Exp.	Type stations	Nobs	Baa/Bam	RMSEa/RMSEm	Corra/Corrm
2	Périurbaines	6303	2	78	144
2.1	Périurbaines	6303	7	79	139
2.2	Périurbaines	6303	2	78	144
2.3	Périurbaines	6303	10	76	142
2.4	Périurbaines	6303	12	77	139

En validation croisée, les gains sur les RMSE et les corrélations sont plus élevés sur les stations urbaines que sur les stations périurbaines: de l'ordre de 40% sur la RMSE et plus de 100% sur la corrélation. Le gain sur le biais fluctue beaucoup d'une expérience à l'autre.

Toujours en validation croisée, les gains calculés sur les stations urbaines pour les expériences 2.3 et 2.4 sont supérieurs à ceux obtenus pour les autres expériences: le gain sur le biais vaut 93% contre 75-80%; celui sur la RMSE vaut 52% contre 46%; celui sur la corrélation vaut 145% contre entre 110-130%.

Les gains - calculés en validation sur les stations urbaines indépendantes - sont stables: le gain sur le biais varie entre 35 et 53%; celui sur la RMSE vaut approximativement 20%; celui sur la corrélation varie entre 17 et 31%.

VCI

Exp.	Type stations	Nobs	BAa/BAm	RMSEa/RMSEm	Corra/Corrm
2	Urbaines	1960	24	64	230
2.1	Urbaines	1960	21	64	210
2.2	Urbaines	1960	24	64	225
2.3	Urbaines	1960	7	58	245
2.4	Urbaines	1960	7	58	245

VIND

Exp.	Type stations	Nobs	BAa/BAm	RMSEa/RMSEm	Corra/Corrm
2	Urbaines	17819	47	78	131
2.1	Urbaines	17819	65	82	117
2.2	Urbaines	17819	51	78	131
2.3	Urbaines	17819	53	75	131
2.4	Urbaines	17819	54	75	131

10.3 RESULTATS CARTOGRAPHIQUES

Comme précédemment, on présente dans le tableau ci-dessous les corrections apportées dans les différentes expériences de krigeage.

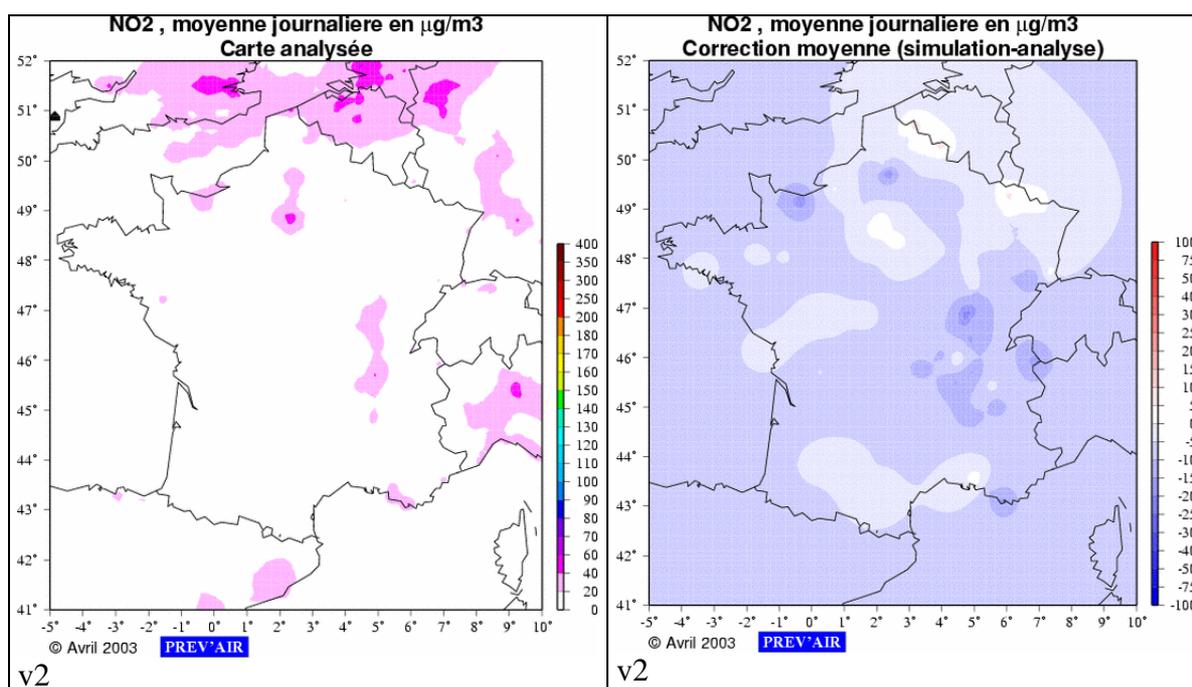
Remarque: comme précédemment, le terme "correction" désigne la quantité "concentration modèle - concentration analysée".

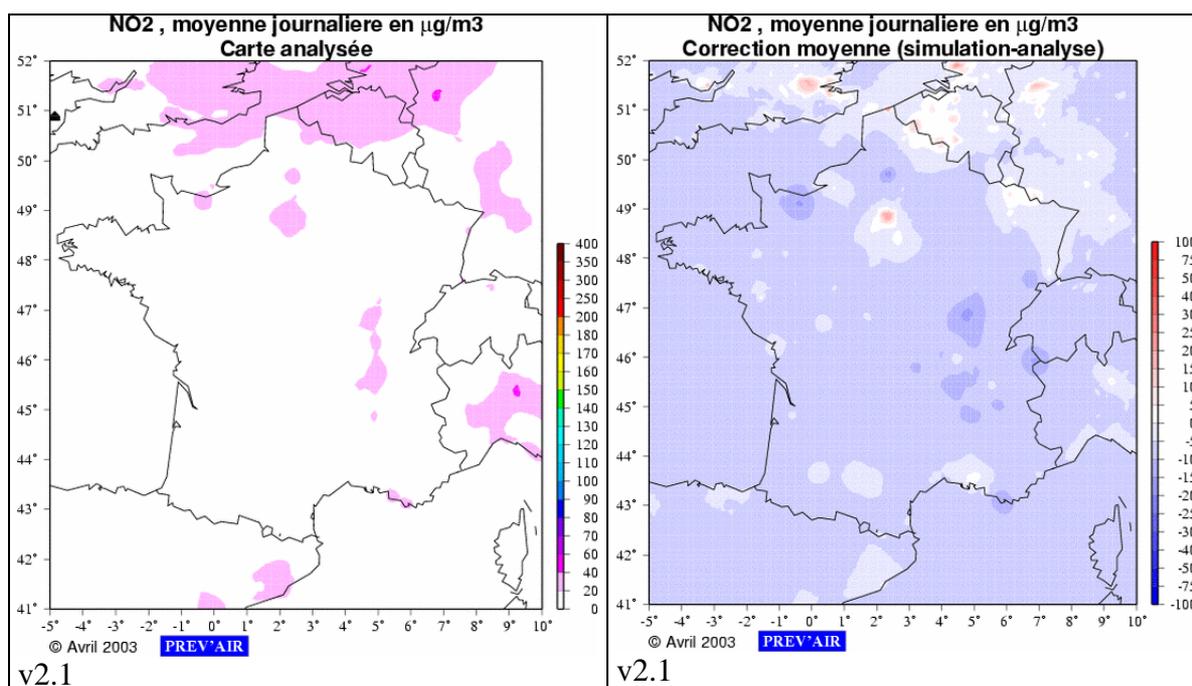
Exp.	Correction min.	P05 des corrections	P25 des corrections	P75 des corrections	P95 des corrections	Correction max.	Correction moyenne
2	-23.6	-9.2	-6.2	-5.0	-2.5	7.5	-5.7
2.1	-21.2	-8.8	-7.3	-5.5	-1.7	26.4	-6.1
2.2	-23.7	-9.2	-6.3	-5.2	-2.7	7.6	-5.8
2.3	-21.7	-10.8	-9.7	-5.5	1.4	12.3	-7.0
2.4	-21.0	-10.6	-9.7	-5.5	1.6	17.6	-6.9

Les quantités ci-dessus sont calculées sur les corrections moyennes sur toute la période estivale; ces corrections moyennes sont représentées, pour chacune des expériences considérées, dans les cartes ci-dessous (cartes de droite). Les cartes de gauche représentent les concentrations moyennes de NO₂ obtenues après krigeage.

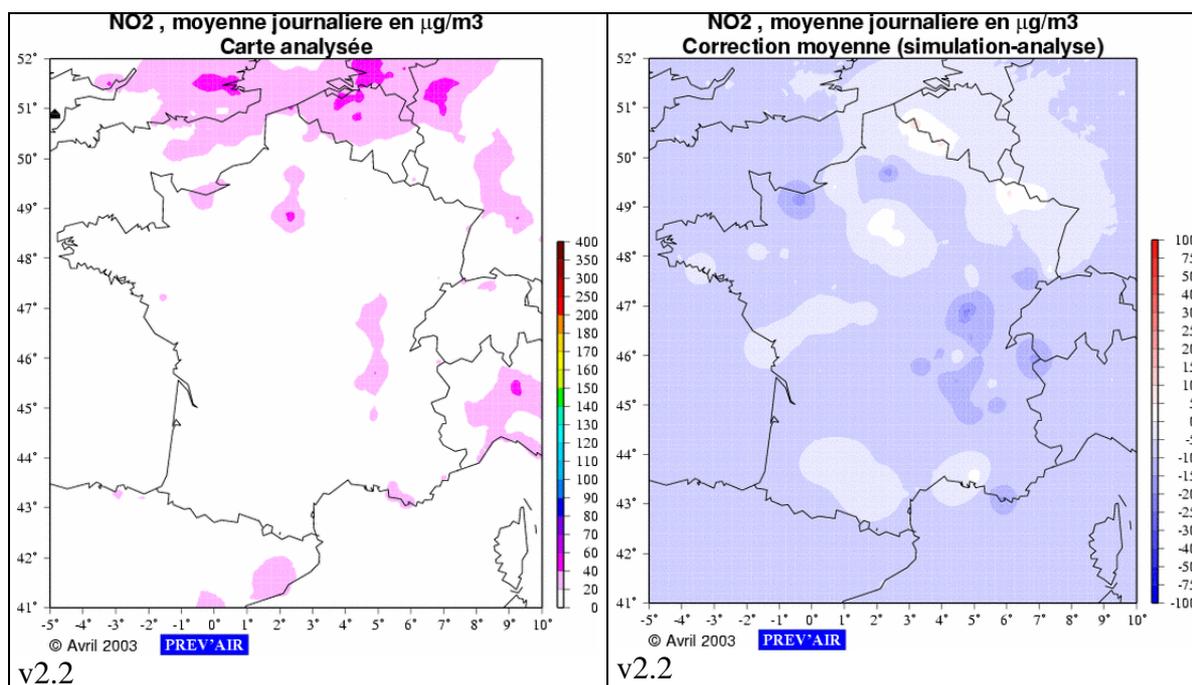
Comme dans les expériences précédentes (cf. paragraphe 9.3), on retrouve, dans la carte des corrections associée à l'expérience v2, le fait que la correction apportée par le krigeage est *en moyenne* négative (-5.7 µg/m³): les concentrations analysées sont *en moyenne* plus élevées que les concentrations modèle initiales. Ceci n'est pas vrai autour de l'agglomération parisienne, dans la région de Metz, de Lille et autour de Marseille (de façon très localisée), zones dans lesquelles les concentrations analysées sont plus faibles que les concentrations modèle initiales. Toutes les expériences réalisées conduisent à des corrections positives des concentrations de dioxyde d'azote dans les régions citées ci-dessus (et quelquefois dans d'autres régions). Cette correction est particulièrement marquée dans les expériences v2.1; elle existe également dans les expériences v2.3 et v2.4.

La carte des corrections de l'expérience v2.1 présente des structures plus réduites et plus morcelées que la carte 2; on retrouve dans ces deux expériences la même répartition spatiale des corrections extrêmes. Les corrections maximales sont plus élevées dans l'expérience v2.1 que dans l'expérience v2: elles atteignent 26.4 µg/m³ (v2.1) contre 7.5 µg/m³ (v2). Les valeurs moyennes des corrections sont peu différentes dans les deux expériences (-5.7 et -6.1 µg/m³).

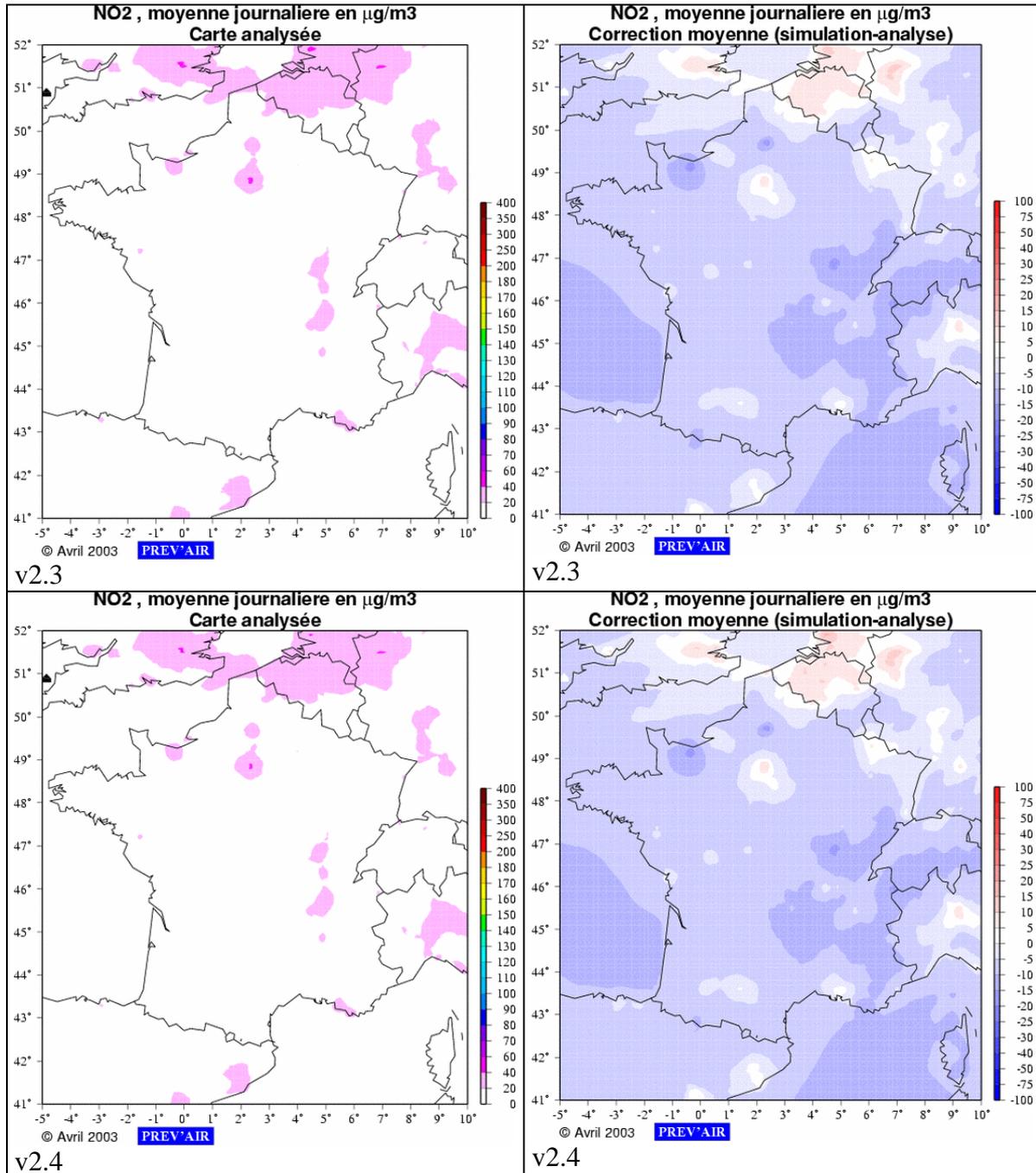




Les cartes des expériences v2 et v2.2 présentent des structures identiques; les valeurs extrêmes ainsi que les valeurs moyennes des corrections sont identiques dans les deux expériences.



Les cartes des corrections des expériences v2.3 et v2.4 présentent des structures identiques. ; les corrections extrêmes et moyennes sont les mêmes dans les deux expériences. Les corrections maximales sont plus élevées dans ces deux expériences que dans l'expérience v2: elles atteignent 12.3 µg/m³ (v2.3) et 17.6 µg/m³ (v2.4) contre 7.5 µg/m³ (v2). Les valeurs moyennes des corrections sont légèrement plus faibles (-7.0 µg/m³ contre -5.7 µg/m³).



Finalement, les cartes des corrections présentent un certain nombre de différences notables, la plus marquante concernant l'existence de corrections assez fortement positives dans les expériences v2.1, v2.3 et v2.4.

11. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE LA PARTIE 2

Dans toutes les expériences réalisées, le krigeage a pour effet de détériorer de façon importante les moyennes journalières des concentrations de dioxyde d'azote évaluées aux *stations rurales*, ceci quelle que soit la valeur des paramètres de krigeage et la méthode de krigeage utilisée. En effet, les concentrations de dioxyde d'azote sont fortement influencées par des phénomènes locaux. Dans le krigeage, des concentrations modèles en des points de grille ruraux peuvent être corrigées par des quantités associées à des points de grille de type plus urbain, en lesquels le modèle a tendance à sous-estimer les concentrations (innovations positives). Par conséquent, les concentrations modèles aux points de grille ruraux sont corrigées d'innovations positives, ce qui explique le biais positif obtenu après krigeage sur les stations rurales.

En revanche, le krigeage améliore les moyennes journalières des concentrations de dioxyde d'azote évaluées aux *stations périurbaines*: les indicateurs calculés sur les stations périurbaines sont relativement stables, et les gains sont importants sur tous. Ainsi, quelle que soit la valeur des paramètres de krigeage et la méthode de krigeage utilisée, le gain sur le biais varie entre 86 et 98%; celui sur la RMSE, entre 20 et 25%; celui sur la corrélation, entre 36 et 50%.

En ce qui concerne les *stations urbaines*, le krigeage améliore les moyennes journalières des concentrations de dioxyde d'azote: les gains - calculés en validation croisée - sur les RMSE et les corrélations sont généralement plus élevés sur les stations urbaines que sur les stations périurbaines: de l'ordre de 40% sur la RMSE et plus de 100% sur la corrélation. Le gain sur le biais est de l'ordre de 75%, et atteint 93% pour la méthode de krigeage des observations avec le modèle et les émissions de NOx ou le taux d'urbanisation en dérive externe.

Si les méthodes de krigeage mises en œuvre ont des performances statistiques à peu près similaires, les cartes de concentrations peuvent être différentes. C'est notamment le cas pour les méthodes de krigeage des observations avec le modèle et les émissions de NOx ou le taux d'urbanisation en dérive externe ou des innovations avec les émissions de NOx en dérive externe: la correction apportée par le krigeage a pour effet de diminuer de façon importante les concentrations de dioxyde d'azote autour de certaines grandes agglomérations.

Les points suivants restent à investiguer:

- A-t-on les mêmes conclusions l'hiver lorsque les concentrations de NO₂ sont plus élevées?
- Arrive-t-on à des résultats plus satisfaisants si l'on construit manuellement un modèle de variogramme adapté au cas qui nous intéresse ? Il s'agit de construire un variogramme calé sur un historique des concentrations.
- Quelles sont les performances du cokrigeage avec les concentrations d'ozone?

12. REFERENCES

- [1] Grancher D., Bel L., Vautard R., 2003. Cartographie et prévision des champs de pollution à l'échelle locale, à partir des résultats de simulation d'un modèle continental.
- [2] Honoré C., Malherbe L., 2003. Application de modèles grande échelle à la problématique régionale : cas de l'ozone. Rapport LCSQA, www.lcsqa.org.
- [3] Fouquet C.(de), Méthodologie de cartographie de la concentration annuelle de NO₂ sur l'agglomération de Mulhouse, Rapport d'avancement N-6/03/G, avril 2003.

13. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation précise	Nb/N° pages
1	Corrélation avec l'altitude	1
2	Analyse de sensibilité – tableaux des scores	6

Annexe 1 :
Corrélation entre les observations ou les innovations d’ozone et l’altitude (variable brute ou transformée logarithmiquement)

Date	cor[O;alt.]	cor[O;ln(1+ alt.)]	cor[O;ln(1+ alt./alt.moy)]	cor[I;alt.]	cor[I;ln(1+ alt.)]	cor[I;ln(1+ alt./alt.moy)]
20030614	0.248	0.258	0.323	0.309	0.298	0.370
20030615	-0.054	0.144	0.041	-0.088	-0.057	-0.085
20030616	-0.060	0.277	0.044	0.121	0.274	0.208
20030617	0.093	0.328	0.239	-0.164	-0.097	-0.100
20030618	0.229	0.290	0.312	0.021	0.188	0.156
20030619	0.318	0.238	0.386	0.371	0.277	0.445
20030620	0.070	0.199	0.133	0.044	0.242	0.121
20030621	-0.115	0.124	0.011	0.002	0.240	0.141
20030622	-0.103	-0.015	-0.018	0.190	0.255	0.294
20030623	0.253	0.416	0.413	-0.119	0.013	-0.043
20030624	0.037	0.226	0.187	0.042	0.250	0.187
20030625	0.186	0.432	0.345	0.340	0.492	0.457
20030626	0.267	0.482	0.415	0.260	0.319	0.347
20030627	0.374	0.473	0.485	0.244	0.250	0.339
20030628	0.241	0.304	0.334	0.125	0.103	0.189
20030629	0.241	0.237	0.356	0.339	0.198	0.418
20030731	0.414	0.238	0.362	0.408	0.247	0.350
20030801	0.306	0.371	0.394	0.325	0.270	0.383
20030802	0.155	0.231	0.235	0.148	0.086	0.167
20030803	0.135	0.249	0.186	0.228	0.123	0.176
20030804	0.264	0.260	0.317	0.246	-0.048	0.182
20030805	0.198	0.290	0.288	0.249	0.061	0.250
20030806	0.158	0.373	0.301	0.301	0.094	0.307
20030807	0.044	0.221	0.155	0.191	0.140	0.225
20030808	-0.141	-0.019	-0.113	0.130	-0.010	0.130
20030809	0.004	-0.021	-0.004	0.212	-0.085	0.141
20030810	0.271	0.183	0.299	0.478	0.168	0.454
20030811	0.265	0.448	0.390	0.344	0.204	0.405
20030812	0.165	0.456	0.298	0.156	0.252	0.226
20030813	0.209	0.308	0.292	0.278	0.261	0.326
20030814	0.282	0.391	0.376	0.332	0.045	0.293

O : observation

I : innovation

alt. : altitude

Annexe 2

Les tableaux qui suivent présentent les scores calculés

- toutes stations d'analyse confondues
- toutes stations de vérification confondues
- toutes stations de vérification rurales confondues
- toutes stations de vérification périurbaines confondues
- toutes stations de vérification urbaines confondues

jour par jour d'une part (pour chaque score, ne sont donnés ici que le minimum, le maximum et le centile 80 (BN, RMSE, NMSE) ou centile 20 (ρ) sur la période),

sur toute la période (14 juin-29 juin, 31 juillet-14 août) d'autre part.

N : nombre de données

a : analyse

m : modèle

BN : biais normalisé

RMSE : racine carrée de l'erreur moyenne quadratique

NMSE : racine carrée de l'erreur moyenne quadratique normalisée

Rho : coefficient de corrélation

Les tests 0 à 5 correspondent à l'analyse de sensibilité aux paramètres du variogramme.

Les quatre tests suivants se rapportent à l'analyse de sensibilité aux variables auxiliaires et au type de krigeage (des innovations ou des observations avec CHIMERE en dérive).

Validation croisée

		N	BNa	BNm	RMSEa	RMSEm	NMSEa	NMSEm	rhoa	rhom
Ref test 0	MIN sur la période	95	0.34	-15.88	10.13	15.60	0.0993	0.1455	0.479	0.243
	MAX sur la période	103	3.81	20.73	31.33	39.38	0.1670	0.3155	0.938	0.847
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		1.91	-1.92	23.40	30.61	0.1377	0.2034	0.639	0.444
	tous les jours confondus	3060	1.66	-4.66	19.20	26.90	0.1293	0.1881	0.890	0.808
Pas20 test 1	MIN sur la période	95	0.61	-15.88	10.12	15.60	0.0992	0.1455	0.456	0.243
	MAX sur la période	103	3.76	20.73	32.82	39.38	0.1762	0.3155	0.938	0.847
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.32	-1.92	24.04	30.61	0.1400	0.2034	0.628	0.444
	tous les jours confondus	3060	1.74	-4.66	19.56	26.90	0.1317	0.1881	0.886	0.808
Maxd140 test 2	MIN sur la période	95	0.63	-15.88	10.08	15.60	0.0981	0.1455	0.477	0.243
	MAX sur la période	103	8.03	20.73	31.86	39.38	0.1912	0.3155	0.913	0.847
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.18	-1.92	23.51	30.61	0.1366	0.2034	0.628	0.444
	tous les jours confondus	3060	1.82	-4.66	19.32	26.90	0.1301	0.1881	0.888	0.808
pepA test 3	MIN sur la période	95	0.58	-15.88	10.15	15.60	0.0999	0.1455	0.477	0.243
	MAX sur la période	103	3.77	20.73	28.91	39.38	0.1578	0.3155	0.943	0.847
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.16	-1.92	23.40	30.61	0.1392	0.2034	0.633	0.444
	tous les jours confondus	3060	1.64	-4.66	19.13	26.90	0.1288	0.1881	0.891	0.808
modsph test 4	MIN sur la période	95	0.59	-15.88	13.14	15.60	0.1082	0.1455	0.234	0.243
	MAX sur la période	103	13.59	20.73	35.36	39.38	0.2865	0.3155	0.843	0.847
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.88	-1.92	27.87	30.61	0.1728	0.2034	0.431	0.444
	tous les jours confondus	3060	2.46	-4.66	23.85	26.90	0.1609	0.1881	0.826	0.808
modgaus test 5	MIN sur la période	95	0.54	-15.88	11.35	15.60	0.0992	0.1455	0.380	0.243
	MAX sur la période	103	3.92	20.73	30.31	39.38	0.1730	0.3155	0.913	0.847
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.30	-1.92	23.71	30.61	0.1474	0.2034	0.596	0.444
	tous les jours confondus	3060	1.86	-4.66	20.28	26.90	0.1365	0.1881	0.879	0.808
Ref2 Kinnov	MIN sur la période	96	0.56	-15.25	10.34	15.36	0.0990	0.1470	0.481	0.248
	MAX sur la période	104	3.55	21.59	34.34	38.26	0.1832	0.2959	0.937	0.847
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.06	-1.29	24.43	30.93	0.1399	0.2059	0.649	0.470
	tous les jours confondus	3091	1.72	-4.39	19.73	26.97	0.1332	0.1888	0.885	0.806
Innov-MNT Kinnov+alt.	MIN sur la période	96	0.50	-15.25	10.33	15.36	0.0998	0.1470	0.468	0.248
	MAX sur la période	104	3.45	21.59	33.87	38.26	0.1811	0.2959	0.934	0.847
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.04	-1.29	24.55	30.93	0.1397	0.2059	0.650	0.470
	tous les jours confondus	3091	1.66	-4.39	19.67	26.97	0.1328	0.1888	0.886	0.806
DEref Kobs+mod	MIN sur la période	96	1.05	-15.25	10.52	15.36	0.0906	0.1470	0.433	0.248
	MAX sur la période	104	5.38	21.59	28.26	38.26	0.1879	0.2959	0.915	0.847
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.59	-1.29	22.35	30.93	0.1325	0.2059	0.638	0.470
	tous les jours confondus	3091	2.09	-4.39	18.66	26.97	0.1259	0.1888	0.896	0.806
DE-MNT Kobs+mod+alt	MIN sur la période	96	1.00	-15.25	10.60	15.36	0.0904	0.1470	0.424	0.248
	MAX sur la période	104	5.34	21.59	27.68	38.26	0.1909	0.2959	0.915	0.847
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.49	-1.29	22.03	30.93	0.1324	0.2059	0.648	0.470
	tous les jours confondus	3091	2.07	-4.39	18.66	26.97	0.1259	0.1888	0.896	0.806

Vérification : tous types de station

		N	BNa	BNm	RMSEa	RMSEm	NMSEa	NMSEm	rhoa	rhom
Ref test 0	MIN sur la période	178	0.665	-12.603	11.304	14.576	0.1037	0.1409	0.468	0.269
	MAX sur la période	193	9.597	32.097	32.078	35.851	0.1946	0.3124	0.958	0.888
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		6.396	4.625	26.428	31.025	0.1517	0.1955	0.602	0.399
	tous les jours confondus	5750	5.037	0.107	21.342	26.447	0.1462	0.1869	0.875	0.786
Pas20 test 1	MIN sur la période	178	0.661	-12.603	11.301	14.576	0.1032	0.1409	0.332	0.269
	MAX sur la période	193	10.629	32.097	32.763	35.851	0.1952	0.3124	0.958	0.888
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		6.329	4.625	27.153	31.025	0.1585	0.1955	0.565	0.399
	tous les jours confondus	5750	5.134	0.107	21.957	26.447	0.1504	0.1869	0.867	0.786
Maxd140 test 2	MIN sur la période	178	0.643	-12.603	11.241	14.576	0.1025	0.1409	0.507	0.269
	MAX sur la période	193	11.274	32.097	32.094	35.851	0.1948	0.3124	0.950	0.888
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		6.609	4.625	26.095	31.025	0.1521	0.1955	0.608	0.399
	tous les jours confondus	5750	5.268	0.107	21.182	26.447	0.1450	0.1869	0.876	0.786
pepA test 3	MIN sur la période	178	0.660	-12.603	11.413	14.576	0.1037	0.1409	0.466	0.269
	MAX sur la période	193	9.597	32.097	32.975	35.851	0.1946	0.3124	0.962	0.888
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		6.542	4.625	26.833	31.025	0.1517	0.1955	0.587	0.399
	tous les jours confondus	5750	5.107	0.107	21.502	26.447	0.1472	0.1869	0.873	0.786
modsph test 4	MIN sur la période	178	0.399	-12.603	13.693	14.576	0.1216	0.1409	0.291	0.269
	MAX sur la période	193	22.675	32.097	36.153	35.851	0.2974	0.3124	0.883	0.888
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		9.228	4.625	30.555	31.025	0.1930	0.1955	0.423	0.399
	tous les jours confondus	5750	7.167	0.107	25.811	26.447	0.1762	0.1869	0.810	0.786
modgaus test 5	MIN sur la période	178	1.174	-12.603	11.274	14.576	0.1048	0.1409	0.324	0.269
	MAX sur la période	193	10.639	32.097	31.458	35.851	0.1993	0.3124	0.954	0.888
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		6.364	4.625	27.059	31.025	0.1568	0.1955	0.581	0.399
	tous les jours confondus	5750	4.922	0.107	21.910	26.447	0.1502	0.1869	0.866	0.786
Ref2 Kinnov	MIN sur la période	179	0.350	-12.666	10.722	14.268	0.0960	0.1389	0.270	0.270
	MAX sur la période	195	9.954	32.199	35.910	35.762	0.1946	0.3112	0.960	0.889
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		6.230	4.488	27.023	30.586	0.1493	0.1945	0.605	0.403
	tous les jours confondus	5763	4.765	0.039	21.742	26.270	0.1490	0.1856	0.869	0.788
Innov-MNT Kinnov+alt.	MIN	179	0.353	-12.666	10.709	14.268	0.0958	0.1389	0.516	0.270
	MAX	195	9.848	32.199	35.588	35.762	0.1943	0.3112	0.961	0.889
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		6.166	4.488	25.658	30.586	0.1460	0.1945	0.612	0.403
	tous les jours confondus	5763	4.644	0.039	21.292	26.270	0.1460	0.1856	0.874	0.788
DEref Kobs+mod	MIN	179	0.335	-12.666	10.821	14.268	0.0956	0.1389	0.313	0.270
	MAX	195	9.476	32.199	32.650	35.762	0.2013	0.3112	0.955	0.889
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		6.209	4.488	25.331	30.586	0.1446	0.1945	0.605	0.403
	tous les jours confondus	5763	4.858	0.039	20.510	26.270	0.1407	0.1856	0.878	0.788
DE-MNT Kobs+mod+alt	MIN	179	0.329	-12.666	10.876	14.268	0.0953	0.1389	0.367	0.270
	MAX	195	9.458	32.199	32.588	35.762	0.2010	0.3112	0.951	0.889
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		6.104	4.488	25.406	30.586	0.1459	0.1945	0.614	0.403
	tous les jours confondus	5763	4.730	0.039	20.286	26.270	0.1392	0.1856	0.881	0.788

Vérification : stations rurales

		N	BNa	BNm	RMSEa	RMSEm	NMSEa	NMSEm	rhoa	rhom
Ref test 0	MIN sur la période	2	-10.563	-16.693	8.323	5.667	0.0586	0.0479	-1.000	-1.000
	MAX sur la période	2	40.094	43.163	63.084	53.110	0.3910	0.3210	1.000	1.000
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		21.682	19.220	39.940	35.833	0.2774	0.2341	-1.000	-1.000
	tous les jours confondus	62	15.885	8.733	33.693	27.546	0.2350	0.2003	0.812	0.772
Pas20 test 1	MIN sur la période	2	-10.566	-16.693	8.315	5.667	0.0554	0.0479	-1.000	-1.000
	MAX sur la période	2	34.659	43.163	63.228	53.110	0.3916	0.3210	1.000	1.000
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		23.056	19.220	39.454	35.833	0.2647	0.2341	-1.000	-1.000
	tous les jours confondus	62	15.913	8.733	32.768	27.546	0.2290	0.2003	0.810	0.772
Maxd140 test 2	MIN sur la période	2	-10.464	-16.693	8.307	5.667	0.0521	0.0479	-1.000	-1.000
	MAX sur la période	2	39.448	43.163	62.713	53.110	0.3981	0.3210	1.000	1.000
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		22.684	19.220	40.362	35.833	0.2770	0.2341	-1.000	-1.000
	tous les jours confondus	62	15.911	8.733	33.748	27.546	0.2355	0.2003	0.809	0.772
pepA test 3	MIN sur la période	2	-9.206	-16.693	8.323	5.667	0.0568	0.0479	-1.000	-1.000
	MAX sur la période	2	40.095	43.163	65.519	53.110	0.3949	0.3210	1.000	1.000
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		21.448	19.220	37.825	35.833	0.2721	0.2341	-1.000	-1.000
	tous les jours confondus	62	15.178	8.733	33.107	27.546	0.2318	0.2003	0.806	0.772
modsph test 4	MIN sur la période	2	-6.297	-16.693	3.643	5.667	0.0263	0.0479	-1.000	-1.000
	MAX sur la période	2	53.029	43.163	74.277	53.110	0.4263	0.3210	1.000	1.000
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		25.725	19.220	34.910	35.833	0.2610	0.2341	-1.000	-1.000
	tous les jours confondus	62	16.549	8.733	30.998	27.546	0.2176	0.2003	0.799	0.772
modgaus test 5	MIN sur la période	2	-3.751	-16.693	3.644	5.667	0.0263	0.0479	-1.000	-1.000
	MAX sur la période	2	30.696	43.163	63.904	53.110	0.4399	0.3210	1.000	1.000
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		23.774	19.220	39.652	35.833	0.2879	0.2341	-1.000	-1.000
	tous les jours confondus	62	15.712	8.733	33.735	27.546	0.2356	0.2003	0.800	0.772
Ref2 Kinnov	MIN sur la période	2	-6.110	-16.693	1.984	5.667	0.0216	0.0479	-1.000	-1.000
	MAX sur la période	2	30.498	43.163	54.403	53.110	0.3356	0.3210	1.000	1.000
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		16.771	19.220	33.298	35.833	0.2157	0.2341	-1.000	-1.000
	tous les jours confondus	62	10.107	8.733	26.144	27.546	0.1872	0.2003	0.846	0.772
Innov-MNT Kinnov+alt.	MIN	2	-7.801	-16.693	2.695	5.667	0.0233	0.0479	-1.000	-1.000
	MAX	2	28.574	43.163	51.224	53.110	0.2733	0.3210	1.000	1.000
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		14.291	19.220	31.456	35.833	0.2219	0.2341	-1.000	-1.000
	tous les jours confondus	62	8.376	8.733	23.429	27.546	0.1690	0.2003	0.868	0.772
Deref Kobs+mod	MIN	2	-5.182	-16.693	3.658	5.667	0.0352	0.0479	-1.000	-1.000
	MAX	2	44.106	43.163	61.432	53.110	0.3637	0.3210	1.000	1.000
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		16.787	19.220	28.141	35.833	0.1913	0.2341	-1.000	-1.000
	tous les jours confondus	62	10.305	8.733	23.669	27.546	0.1695	0.2003	0.871	0.772
DE-MNT Kobs+mod+alt	MIN	2	-6.247	-16.693	2.365	5.667	0.0218	0.0479	-1.000	-1.000
	MAX	2	33.847	43.163	48.217	53.110	0.2970	0.3210	1.000	1.000
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		11.654	19.220	24.657	35.833	0.1792	0.2341	-1.000	-1.000
	tous les jours confondus	62	7.529	8.733	19.932	27.546	0.1447	0.2003	0.892	0.772

Vérification : stations périurbaines

		N	BNa	BNm	RMSEa	RMSEm	NMSEa	NMSEm	rhoa	rhom
Ref test 0	MIN sur la période	39	-3.457	-13.195	10.897	12.925	0.0919	0.1106	0.414	0.073
	MAX sur la période	42	4.681	33.090	31.658	37.589	0.1990	0.3373	0.943	0.894
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.375	2.718	22.797	30.032	0.1422	0.1965	0.530	0.291
	tous les jours confondus	1261	0.782	-2.915	19.290	25.683	0.1294	0.1768	0.894	0.821
Pas20 test 1	MIN sur la période	39	-3.471	-13.195	10.883	12.925	0.0918	0.1106	0.413	0.073
	MAX sur la période	42	5.724	33.090	31.663	37.589	0.1992	0.3373	0.944	0.894
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.681	2.718	23.132	30.032	0.1480	0.1965	0.516	0.291
	tous les jours confondus	1261	0.975	-2.915	19.658	25.683	0.1318	0.1768	0.890	0.821
Maxd140 test 2	MIN sur la période	39	-3.416	-13.195	10.947	12.925	0.0945	0.1106	0.414	0.073
	MAX sur la période	42	9.330	33.090	31.702	37.589	0.2064	0.3373	0.943	0.894
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.676	2.718	22.716	30.032	0.1449	0.1965	0.524	0.291
	tous les jours confondus	1261	0.996	-2.915	19.214	25.683	0.1289	0.1768	0.895	0.821
pepA test 3	MIN sur la période	39	-3.461	-13.195	10.442	12.925	0.0935	0.1106	0.414	0.073
	MAX sur la période	42	4.681	33.090	31.653	37.589	0.1990	0.3373	0.943	0.894
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.089	2.718	22.659	30.032	0.1415	0.1965	0.528	0.291
	tous les jours confondus	1261	0.678	-2.915	19.189	25.683	0.1288	0.1768	0.895	0.821
modsph test 4	MIN sur la période	39	-4.236	-13.195	12.915	12.925	0.1074	0.1106	0.127	0.073
	MAX sur la période	42	21.017	33.090	34.919	37.589	0.3200	0.3373	0.887	0.894
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		5.933	2.718	28.512	30.032	0.1740	0.1965	0.351	0.291
	tous les jours confondus	1261	3.365	-2.915	23.520	25.683	0.1568	0.1768	0.839	0.821
modgaus test 5	MIN sur la période	39	-4.128	-13.195	10.692	12.925	0.0936	0.1106	0.234	0.073
	MAX sur la période	42	6.759	33.090	31.858	37.589	0.2034	0.3373	0.931	0.894
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		3.457	2.718	22.687	30.032	0.1455	0.1965	0.515	0.291
	tous les jours confondus	1261	0.690	-2.915	19.835	25.683	0.1331	0.1768	0.888	0.821
Ref2 Kinnov	MIN sur la période	39	-4.052	-13.153	10.729	13.045	0.0909	0.1112	0.249	0.132
	MAX sur la période	42	6.250	33.699	31.221	36.339	0.1967	0.3316	0.938	0.907
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		3.043	3.073	23.648	29.526	0.1463	0.1925	0.511	0.291
	tous les jours confondus	1261	1.302	-2.661	19.635	25.322	0.1316	0.1743	0.892	0.826
Innov-MNT Kinnov+alt.	MIN	39	-4.287	-13.153	10.754	13.045	0.0894	0.1112	0.447	0.132
	MAX	42	5.977	33.699	31.656	36.339	0.1967	0.3316	0.939	0.907
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		3.065	3.073	23.128	29.526	0.1446	0.1925	0.529	0.291
	tous les jours confondus	1261	1.097	-2.661	19.418	25.322	0.1302	0.1743	0.894	0.826
DEref Kobs+mod	MIN	39	-3.883	-13.153	10.063	13.045	0.0742	0.1112	0.351	0.132
	MAX	42	5.020	33.699	32.074	36.339	0.1992	0.3316	0.945	0.907
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.900	3.073	22.765	29.526	0.1416	0.1925	0.528	0.291
	tous les jours confondus	1261	0.851	-2.661	18.813	25.322	0.1265	0.1743	0.897	0.826
DE-MNT Kobs+mod+alt	MIN	39	-3.832	-13.153	10.117	13.045	0.0739	0.1112	0.432	0.132
	MAX	42	5.043	33.699	32.818	36.339	0.1990	0.3316	0.949	0.907
	CENTILE 80 ou 20 (pour la corrélation)		2.317	3.073	22.513	29.526	0.1418	0.1925	0.559	0.291
	tous les jours confondus	1261	0.743	-2.661	18.653	25.322	0.1255	0.1743	0.899	0.826

Vérification : stations urbaines

		N	BNa	BNm	RMSEa	RMSEm	NMSEa	NMSEm	rhoa	rhom
Ref test 0	MIN sur la période	137	1.477	-12.408	9.788	14.039	0.093	0.135	0.465	0.275
	MAX sur la période	150	10.614	31.666	34.270	36.925	0.194	0.305	0.969	0.902
	CENTILE 80 ou 20 (pour la correl)		7.758	4.631	26.532	32.744	0.158	0.199	0.616	0.398
	tous les jours confondus	4427	6.097	0.847	21.673	26.646	0.149	0.190	0.874	0.777
Pas20 test 1	MIN sur la période	137	1.464	-12.408	9.788	14.039	0.093	0.135	0.275	0.275
	MAX sur la période	150	11.789	31.666	34.314	36.925	0.211	0.305	0.969	0.902
	CENTILE 80 ou 20 (pour la correl)		7.500	4.631	27.171	32.744	0.166	0.199	0.616	0.398
	tous les jours confondus	4427	6.168	0.847	22.384	26.646	0.154	0.190	0.865	0.777
Maxd140 test 2	MIN sur la période	137	1.415	-12.408	9.803	14.039	0.094	0.135	0.516	0.275
	MAX sur la période	150	11.671	31.666	32.882	36.925	0.195	0.305	0.960	0.902
	CENTILE 80 ou 20 (pour la correl)		7.912	4.631	26.338	32.744	0.159	0.199	0.617	0.398
	tous les jours confondus	4427	6.336	0.847	21.486	26.646	0.148	0.190	0.875	0.777
pepA test 3	MIN sur la période	137	1.422	-12.408	9.788	14.039	0.093	0.135	0.465	0.275
	MAX sur la période	150	10.614	31.666	34.477	36.925	0.194	0.305	0.971	0.902
	CENTILE 80 ou 20 (pour la correl)		7.893	4.631	26.532	32.744	0.158	0.199	0.602	0.398
	tous les jours confondus	4427	6.228	0.847	21.916	26.646	0.151	0.190	0.871	0.777
modsph test 4	MIN sur la période	137	0.861	-12.408	13.180	14.039	0.119	0.135	0.311	0.275
	MAX sur la période	150	22.982	31.666	37.348	36.925	0.291	0.305	0.902	0.902
	CENTILE 80 ou 20 (pour la correl)		10.000	4.631	30.945	32.744	0.203	0.199	0.431	0.398
	tous les jours confondus	4427	8.118	0.847	26.349	26.646	0.181	0.190	0.804	0.777
modgaus test 5	MIN sur la période	137	1.894	-12.408	9.800	14.039	0.093	0.135	0.352	0.275
	MAX sur la période	150	11.735	31.666	34.218	36.925	0.211	0.305	0.964	0.902
	CENTILE 80 ou 20 (pour la correl)		7.674	4.631	27.724	32.744	0.164	0.199	0.599	0.398
	tous les jours confondus	4427	5.977	0.847	22.260	26.646	0.153	0.190	0.865	0.777
Ref2 Kinnov	MIN sur la période	137	1.156	-12.666	9.715	13.714	0.093	0.135	0.285	0.276
	MAX sur la période	151	10.865	31.805	37.216	36.895	0.207	0.306	0.968	0.899
	CENTILE 80 ou 20 (pour la correl)		7.131	4.649	28.310	32.397	0.161	0.198	0.619	0.400
	tous les jours confondus	4440	5.674	0.685	22.238	26.515	0.153	0.189	0.864	0.778
Innov-MNT Kinnov+alt.	MIN	137	1.151	-12.666	9.736	13.714	0.093	0.135	0.493	0.276
	MAX	151	10.852	31.805	37.215	36.895	0.209	0.306	0.968	0.899
	CENTILE 80 ou 20 (pour la correl)		7.187	4.649	25.567	32.397	0.155	0.198	0.633	0.400
	tous les jours confondus	4440	5.600	0.685	21.764	26.515	0.150	0.189	0.870	0.778
DEref Kobs+mod	MIN	137	1.152	-12.666	9.585	13.714	0.092	0.135	0.323	0.276
	MAX	151	10.648	31.805	36.127	36.895	0.221	0.306	0.961	0.899
	CENTILE 80 ou 20 (pour la correl)		7.375	4.649	24.341	32.397	0.151	0.198	0.604	0.400
	tous les jours confondus	4440	5.920	0.685	20.921	26.515	0.144	0.189	0.875	0.778
DE-MNT Kobs+mod+alt	MIN	137	1.148	-12.666	9.630	13.714	0.092	0.135	0.349	0.276
	MAX	151	10.627	31.805	36.065	36.895	0.221	0.306	0.959	0.899
	CENTILE 80 ou 20 (pour la correl)		7.217	4.649	24.011	32.397	0.151	0.198	0.619	0.400
	tous les jours confondus	4440	5.824	0.685	20.732	26.515	0.143	0.189	0.877	0.778

