



Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



Adaptation des plans d'échantillonnage aux objectifs des campagnes

Décembre 2007

André Wroblewski (EMD),
Véronique Riffault (EMD),
Laure Malherbe (INERIS).





PREAMBULE

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

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

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

ECOLE DES MINES DE DOUAI

DEPARTEMENT CHIMIE ET ENVIRONNEMENT

**ADAPTATION DES PLANS D'ECHANTILLONNAGE
AUX OBJECTIFS DES CAMPAGNES**

**Compléments : zones aéroportuaires,
zones industrielles, proximité automobile
et villes de plus de 100 000 habitants.**

Convention 000653

André WROBLEWSKI (EMD), Véronique RIFFAULT (EMD)
Laure MALHERBE(INERIS)

Décembre 2007

SOMMAIRE

1	RESUME de l'ETUDE EMD/INERIS 2007.....	7
2	INTRODUCTION.....	8
3	RECENSEMENT BIBLIOGRAPHIQUE : GENERALITES.....	9
3.1	Sites aéroportuaires.....	10
3.2	Sites industriels.....	10
3.3	Sites de proximité automobile.....	10
3.4	Villes de plus de 100 000 habitants.....	11
4	ANALYSE bibliographique.....	12
4.1	Synthèse des études portant sur les zones aéroportuaires.....	12
4.1.1	Caractéristiques générales des campagnes.....	12
4.1.2	Résumés commentés des études.....	13
4.2	Synthèse des études portant sur les sites industriels.....	20
4.2.1	Caractéristiques générales des campagnes.....	20
4.2.2	Résumés commentés des études.....	21
4.3	Synthèse des études portant sur les zones de proximité automobile.....	28
4.3.1	Caractéristiques générales des campagnes.....	28
4.3.2	Résumés commentés des études.....	29
4.4	Synthèse des études portant sur les villes de plus de 100 000 habitants.....	48
4.4.1	Caractéristiques générales des campagnes.....	48
4.4.2	Résumés commentés des études.....	48
5	Analyse géostatistique.....	55
6	CONCLUSION.....	58
7	REFERENCES.....	59
8	ANNEXES.....	69

1 RESUME DE L'ETUDE EMD/INERIS 2007

ADAPTATION DES PLANS D'ECHANTILLONNAGE AUX OBJECTIFS DES CAMPAGNES : ECHANTILLONNAGE SPATIAL – GUIDE DE RECOMMANDATIONS

André Wroblewski (EMD)

wroblewski@ensm-douai.fr ; tel : + 33 (0)3 27 71 26 11

Laure Malherbe (INERIS)

laure.malherbe@ineris.fr ; tel : + 33 (0)3 44 55 62 18

Cette étude engagée depuis 2005 traite de la stratégie d'échantillonnage spatial et du dimensionnement des campagnes de mesure du dioxyde d'azote, de l'ozone ou du benzène par échantillonnage passif, suivant le type de zone à cartographier.

126 études conduites par les AASQA dans les **zones aéroportuaires**, les **zones industrielles**, les **zones de proximité routière** et les **villes de plus de 100 000 habitants** ont été répertoriées. La consultation des rapports d'étude a permis d'extraire, pour chaque campagne de mesure, des informations sur les caractéristiques de la pollution (valeurs de concentration mesurées, répartition) et le plan d'échantillonnage spatial utilisé. Des données descriptives de chaque campagne ont été archivées.

A la suite de ce recensement, des jeux de données suffisamment riches en points de mesure ont fait l'objet d'une analyse géostatistique afin d'évaluer la variabilité spatiale des phénomènes et, si cela était possible, la sensibilité des cartographies à l'échantillonnage.

Ce rapport présente l'étude bibliographique et les principaux résultats du traitement géostatistique. Il distingue les stratégies de mesure mises en œuvre et fait ressortir des informations importantes pour l'élaboration d'un plan d'échantillonnage spatial :

- émetteurs influençant le plus la qualité de l'air aéroportuaire ;
- distances d'impact des axes routiers ;
- portées des phénomènes.

Malgré la diversité des situations rencontrées, qui rend malaisée toute généralisation des résultats, des préconisations ont pu être tirées de ce travail. Elles ont été insérées dans une nouvelle version du document synthétique publié en 2006 par le LCSQA : *Adaptation des plans d'échantillonnage aux objectifs des campagnes : échantillonnage spatial - guide de recommandations*.

L'aspect temporel de l'échantillonnage, examiné au sein du GT *Plans d'échantillonnage et reconstitution de données*, est traité en détail dans le guide produit par ce GT, et dont l'INERIS, qui assure le secrétariat du groupe, a coordonné la rédaction.

2 INTRODUCTION

Un premier guide relatif à l'échantillonnage spatial du **dioxyde d'azote**, du **benzène** et de l'**ozone** a été publié en 2006 [1]. Il fournit des recommandations d'échantillonnage lorsque l'objectif est d'élaborer une cartographie sur des zones régionales ou rurales et des villes de moins de 100 000 habitants.

Le travail effectué en 2007 a pour objet de compléter ces recommandations pour les **zones aéroportuaires**, les **zones industrielles**, les **zones de proximité routière** et les **villes de plus de 100 000 habitants**. Il comprend deux étapes:

1. La première est une **analyse bibliographique** des campagnes de mesure conduites dans ces types de zones et des pratiques d'échantillonnage.
Un recensement le plus exhaustif possible des campagnes de mesure conduites par les AASQA a été réalisé durant le premier semestre 2007. Les rapports d'étude ont été consultés afin d'extraire, pour chaque campagne, des informations sur les caractéristiques de la pollution (valeurs de concentration mesurées, répartition) et les stratégies d'échantillonnage spatial mises en œuvre.
2. Ce travail s'est poursuivi par une **analyse géostatistique** de jeux de données suffisamment riches en points de mesure afin d'évaluer la variabilité spatiale des phénomènes (étude variographique) et, s'il est possible, la sensibilité des cartographies à l'échantillonnage.

Ce rapport présente les résultats de ces analyses. Le détail des calculs géostatistiques est joint en annexe. Les feuilles Excel par type de zone, dans lesquelles ont été reportées des données descriptives de chaque campagne, sont disponibles sur le site Internet du LCSQA (www.lcsqa.org).

La complexité du problème a conduit, dans un premier temps, à dissocier les aspects spatiaux et temporels de l'échantillonnage. La question de l'échantillonnage temporel est traitée au sein du GT *Plans d'échantillonnage et reconstitution de données*, animé par l'ADEME et composé de membres d'AASQA et du LCSQA. Les travaux de ce groupe, auxquels le LCSQA a activement contribué, a donné lieu à la rédaction d'un guide qui sera diffusé en 2008.

3 RECENSEMENT BIBLIOGRAPHIQUE : GENERALITES

La première étape de l'étude a été consacrée à une **analyse bibliographique des études réalisées** dans les AASQA (échantillonnages réalisés, méthodes d'exploitation des données, résultats produits). Sur les 36 AASQA nous avons recensé 126 études comprenant majoritairement une analyse de la pollution extérieure à partir de mesures par échantillonnage passif (Figure 1). Ce recensement est relativement équilibré entre les différents types de sites et regroupe un nombre suffisant d'études par secteur (≥ 20) pour en tirer des enseignements généraux.

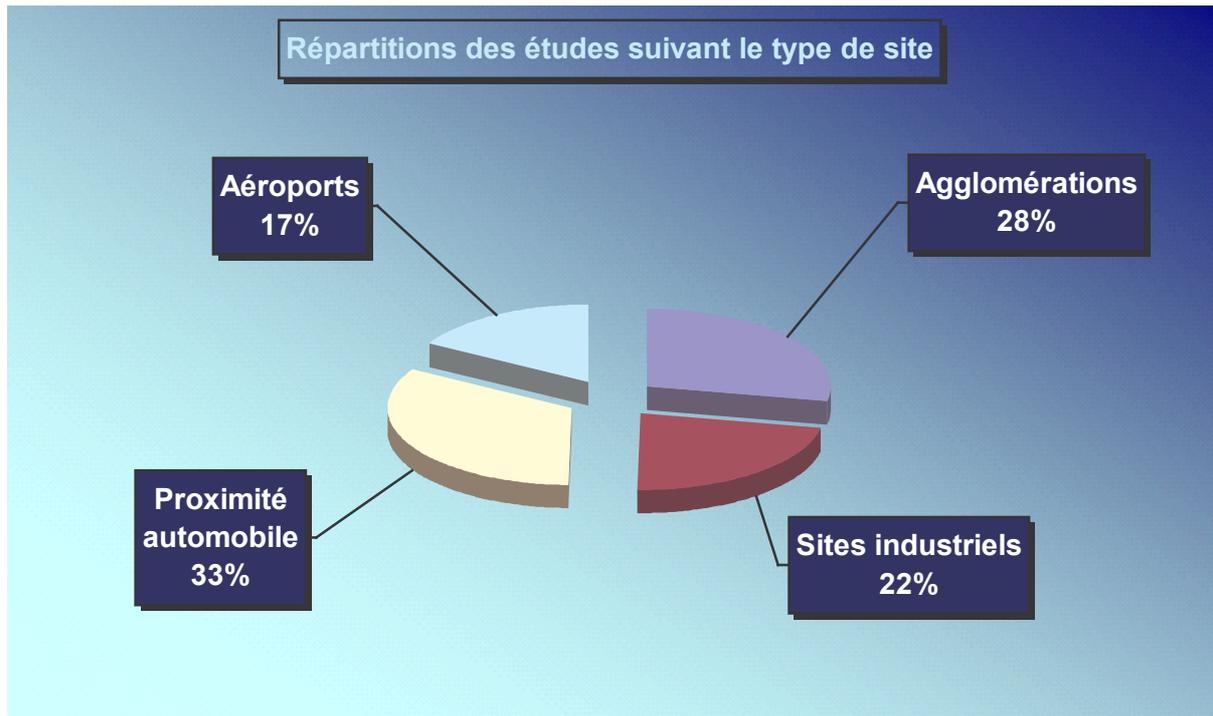


Figure 1 : répartition des études suivant le type de site

Sur ces 126 études, seule une petite moitié conduit à l'établissement d'une cartographie (59 sur 126 soit 47%). A première vue, cela peut surprendre compte tenu des techniques de prélèvement employées (tubes à échantillonnage passif). Celles-ci permettent en effet de réaliser un maillage important de points, idéal pour la mise en œuvre de techniques cartographiques comme le krigeage (Figure 2). Dans plusieurs études, l'absence de cartographies s'explique par le caractère orienté de l'échantillonnage, qui est ciblé sur des zones spécifiques (recherche d'un impact) et ne se répartit pas de façon homogène dans l'espace.

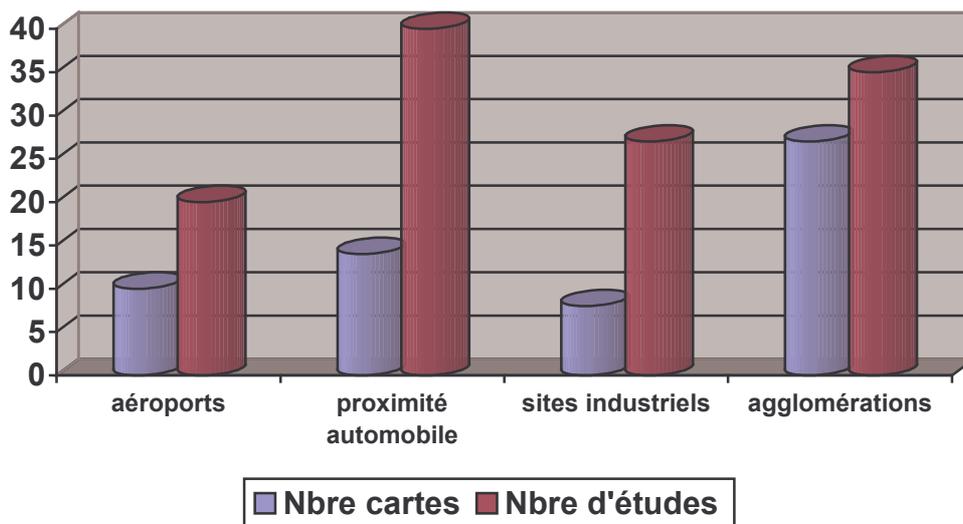


Figure 2 : Nombre d'études débouchant sur une cartographie par type de site

3.1 Sites aéroportuaires

L'analyse des publications relatives à des zones aéroportuaires repose sur 20 études réalisées sur 11 aéroports différents. Les études concernent les plus grosses plates-formes aéroportuaires françaises à l'exception de Marseille-Marignane. Toutes les études portent sur l'évaluation de la qualité de l'air sur la plate-forme et/ou sur son environnement immédiat. Les polluants mesurés par échantillonneur passif sont le dioxyde d'azote et les BTEX. La durée des prélèvements est de 15 jours. Les mesures sont effectuées avec 50 tubes en moyenne par étude. Sur les 20 études, 10 études (50%) conduisent à l'établissement d'une cartographie.

3.2 Sites industriels

L'analyse des publications relatives à des sites industriels repose sur 27 études réalisées sur 21 ensembles différents. Toutes les études portent sur l'évaluation de l'impact d'un site industriel sur son environnement proche. Les polluants mesurés par échantillonneur passif sont le dioxyde d'azote, les BTEX et les composés organiques volatils. La durée des prélèvements est de 15 ou 7 jours suivant les polluants et les études. Les mesures sont effectuées avec 30 tubes en moyenne par étude. Sur les 27 études, 8 études (30%) conduisent à l'établissement d'une cartographie. Des stratégies d'échantillonnage variables ont été référencées : concentriques ou sur maillages rectangulaires réguliers.

3.3 Sites de proximité automobile

L'analyse des publications relatives à des sites de proximité automobile repose sur 40 études réalisées en 21 lieux différents. La plupart des études portent sur l'évaluation de l'impact d'une nouvelle infrastructure routière. Les polluants mesurés par échantillonneur passif sont le dioxyde d'azote et les BTEX. La durée des prélèvements est de 15 ou 10 jours suivant les polluants et les études. Les mesures

sont effectuées avec 50 à 60 tubes en moyenne par étude. Sur les 40 études 14 études (35%) conduisent à l'établissement d'une cartographie.

3.4 Villes de plus de 100 000 habitants

L'analyse effectuée sur les publications portant sur les villes de plus de 100 000 habitants repose sur 34 études réalisées sur 22 lieux différents. Les polluants mesurés par échantillonneur passif sont le dioxyde d'azote et les BTEX. La durée des *prélèvements est de 15 ou 7 jours suivant les polluants et les études. Les mesures sont effectuées avec 80 tubes en moyenne par étude. Sur les 34 études, 27 études (79%) conduisent à l'établissement d'une cartographie.

4 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Pour chaque type de zone considéré, ce chapitre résume et commente brièvement les différentes études recensées puis fait ressortir les traits marquants de ces travaux.

4.1 Synthèse des études portant sur les zones aéroportuaires

L'objectif de cette partie est de fournir un état des lieux sur l'utilisation de l'échantillonnage passif en milieu extérieur pour évaluer la pollution sur les zones aéroportuaires.

4.1.1 Caractéristiques générales des campagnes

Les études relatives aux zones aéroportuaires présentent des caractéristiques relativement homogènes. Les polluants mesurés sont principalement le NO₂ mais aussi le CO, les COV, le benzène et les PM. Pour la plupart des campagnes, des mesures ont été réalisées par échantillonnage passif à la fois sur la plate-forme aéroportuaire, le long des pistes de trafic aérien et dans le voisinage proche de la plate-forme. S'agissant des campagnes conduites en Ile-de-France, elles ne s'attachent pas à l'intérieur même des plates-formes mais à leur environnement immédiat et plus éloigné.

En moyenne sur une campagne, les concentrations de dioxyde d'azote sont plutôt modérées, de l'ordre de 30 µg/m³. Autour des plates-formes parisiennes, elles peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 60 µg/m³.

Globalement, l'activité aéroportuaire proprement dite n'a qu'une influence limitée sur la qualité moyenne de l'air. Les mesures par échantillonnage passif ne mettent pas en évidence d'influence des décollages et atterrissages sur les concentrations de NO_x pour les pas de temps considérés. En particulier, les mesures par tubes effectuées le long et en bout des pistes ne révèlent pas de telle influence. Les impacts observés sont surtout le fait du trafic automobile induit par l'aéroport (dépose-minute, voies d'accès, circulation de fret et maintenance...) mais ils sont localisés et n'atteignent généralement pas les niveaux de concentration mesurés le long des grandes routes.

Dans plusieurs études, ressort le constat que la qualité de l'air des zones aéroportuaires subit l'influence des grandes agglomérations avoisinantes.

Stratégies d'échantillonnage mises en œuvre :

Le nombre de sites d'échantillonnage implanté sur les plates-formes aéroportuaires, est variable, allant d'une trentaine à une centaine environ. Il dépend des dimensions de la plate-forme et du domaine d'étude considéré (limité aux abords mêmes de l'aéroport ou incluant une plus grande zone environnante). Les points de mesure se répartissent dans le domaine d'intérêt de façon à prendre en compte les zones d'activité suivantes :

- Enceinte de l'aéroport : bordures des pistes, parkings des avions et des voitures, zones d'embarcation, centrales d'énergie, stockage de carburants, sites de maintenance...
- Proximité immédiate de l'aéroport : entreprises associées à l'activité aéronautique et aéroportuaire

- Environs de l'aéroport : axes routiers, points de fond (villages, ..)

Le cas des aéroports de Roissy-Le Bourget et d'Orly est différent. En effet l'objet de ces campagnes n'était pas de caractériser la qualité de l'air (NO₂, benzène) au cœur des zones aéroportuaires mais dans leur périphérie. Dans ces études, le plan d'échantillonnage est de type radial, relativement resserré jusqu'à une distance de 2 km de l'aéroport et plus lâche au-delà. Il comprend des points supplémentaires dans le prolongement des pistes d'atterrissage et de décollage.

4.1.2 Résumés commentés des études

4.1.2.1 Bordeaux Mérignac (AIRAQ) - 4 études [2, 3, 4, 5]

Différents types de campagnes ont été réalisés sur l'aéroport de Bordeaux : des campagnes par analyseurs automatiques en milieu extérieur en décembre 2000 et en novembre 2005 ; des campagnes par tubes à échantillonnage passif en milieu extérieur : une campagne au printemps 2001 répétée au printemps 2003 et à l'automne 2004 pour laquelle les mêmes sites ont été à chaque fois considérés ; une campagne plus récente (automne 2005) par analyseurs automatiques et par tubes à l'intérieur de l'aéroport.

Zones d'intérêt pour la campagne par tubes en milieu extérieur :

- Enceinte de l'aéroport : bordures des pistes, parkings des avions et des voitures, zones d'embarcation, centrales d'énergie, stockage de carburants...
- Proximité immédiate de l'aéroport : entreprises (essais moteurs --> NO₂)
- Environs de l'aéroport : axes routiers, points de fond

Deux domaines d'étude font l'objet de cartographies : l'enceinte de l'aéroport ; l'aéroport et sa périphérie.

Résultats :

Les résultats obtenus lors de chaque nouvelle campagne confirment ceux de la campagne antérieure. Les mesures moyennes par quinzaine de NO₂ et de benzène mettent en évidence les points suivants :

- l'aéroport n'influence pas directement la qualité moyenne de l'air des zones environnantes ;
- l'aéroport se trouve sous influence de l'agglomération bordelaise (et non le contraire) ; des teneurs faibles sont constatées le long des pistes d'atterrissage - décollage, qui constituent un environnement dégagé (ex : 10 µg/m³ pour le NO₂ et 0,25 µg/m³ pour le benzène au printemps 2003) ; des teneurs plus élevées à proximité des halls peuvent être imputées au trafic routier engendré par l'aéroport. Des concentrations à peu près similaires sont observées à proximité des axes routiers qui desservent l'aéroport.

A l'exception de quelques points (tel un hangar à peinture à proximité duquel une valeur élevée de benzène a été mesurée en 2003), la répartition spatiale du benzène est similaire à celle du NO₂.

Des mesures en continu réalisées en novembre 2005 en un point exposé aux mouvements d'avions indiquent cependant un lien entre les variations sur le court terme des concentrations et l'activité aérienne. Mais celle-ci n'explique pas la totalité des pics observés. Il existerait donc d'autres sources de pollution (mouvements de véhicules divers, ravitaillements...)

4.1.2.2 Montpellier Méditerranée (AIR LR) - 1 étude [6]

Une campagne par analyseurs (milieu extérieur et intérieur) et par tubes a été conduite pendant l'année 2003.

Zones d'intérêt:

Au plus près des sources de pollution : aéronefs, sites de maintenance, trafic routier induit par la plate-forme aéroportuaire

Sites plus éloignés des sources sur la plate-forme aéroportuaire et dans les villages environnants

Résultats :

Les conclusions rejoignent celles d'AIRAQ, à savoir que l'activité aéroportuaire n'a pas d'incidence sur la qualité de l'air sauf à proximité du trafic induit par l'aéroport (dépose-minute, voies d'accès,...). Les concentrations restent néanmoins inférieures à celles qui peuvent être mesurées le long des routes qui traversent les ZAC (voisines de l'aéroport ?).

D'autre part, les mesures automatiques ne mettent pas en évidence de lien entre les décollages et atterrissages d'avions et les concentrations enregistrées au sol près de la piste.

4.1.2.3 Nice Côte d'Azur (QUALITAIR) - 1 étude [7]

Entre 2001 et 2004, des mesures ont été conduites à plusieurs reprises à l'aide d'analyseurs automatiques et de préleveurs divers. Une vaste campagne par tubes à échantillonnage passif a été conduite pendant l'hiver 2004 pour la mesure du benzène.

Zones d'intérêt:

Les sources de pollution identifiées sont :

- les sources mobiles : véhicules spéciaux et véhicules routiers,
- les sources fixes : centrales de production d'énergie, dépôts de carburant, distribution d'hydrocarbures (HC),
- l'activité aérienne qui comprend : les avions, surtout au décollage (NO_x, suies) et au roulage (HC imbrûlés, CO) ; les turbines auxiliaires embarquées et les groupes électrogènes (NO_x, CO, HC imbrûlés, SO₂).

Résultats :

Les conclusions s'accordent avec celles d'AIRAQ et d'AIR LR. L'activité aéroportuaire n'a pas d'incidence particulière sur la qualité de l'air extérieur. Seul est mis en évidence l'impact local du trafic routier sur les concentrations de benzène.

Le rapport signale que des résultats similaires ont été obtenus à Strasbourg. Pour l'ensemble des polluants, la pollution est plutôt influencée par la ville.

4.1.2.4 Paris Roissy, Le Bourget et Orly (AIRPARIF) - 3 études [8, 9, 10]

Sur Orly une campagne de mesure réalisée essentiellement le long de l'axe de la piste a été réalisée en 1999.

Des campagnes d'échantillonnage de grande ampleur associant mesures automatiques et tubes à échantillonnage passif ont été réalisées dans la zone de Roissy-Le Bourget (2001-2002) et d'Orly (2003).

Zones d'intérêt :

Les domaines d'étude ne prennent pas en compte le cœur de la plate-forme se limitent pas aux seules plates-formes aéroportuaires mais incluent des axes routiers majeurs et le tissu urbain environnant.

En ce qui concerne les mesures par tubes, un échantillonnage radial a été adopté (de préférence à un échantillonnage ciblé). Il est densifié localement, notamment au voisinage immédiat du trafic aérien.

Les sites de mesures automatiques ont été installés aux quatre points cardinaux de la plate-forme.

Résultats :

Là encore, il ressort que :

- la qualité de l'air du domaine d'étude subit l'influence de l'agglomération parisienne ;
- les concentrations sont plus élevées à proximité des axes routiers.

L'influence des activités émettrices sur la qualité de l'air de la plate-forme, bien qu'elle soit plus ou moins aisément quantifiable, est mise en évidence par les mesures automatiques de NO_x. L'impact associé aux seuls mouvements d'avions a pu être décelé à Orly mais non pas à Roissy.

Les variations spatiales des concentrations à la périphérie de la plate-forme dépendent des conditions météorologiques et de la distance à l'agglomération. Cependant, à la différence des études précédentes, un surcroît de concentration dans des secteurs ruraux, qui sont éloignés d'émetteurs routiers ou industriels, est constaté.

L'impact aéroportuaire reste néanmoins limité à l'environnement proche de la plate-forme. S'agissant du NO₂, le rayon d'impact est estimé à 4 km pour Roissy. Sur Orly, les concentrations d'oxydes d'azote sont plus élevées en extrémité des pistes laissant paraître une influence forte de l'environnement (essentiellement trafic automobile) sur la concentration mesurée. Les maxima des concentrations obtenues sur quinze jours sont de 60 µg/m³.

4.1.2.5 Bâle-Mulhouse (ASPA) - 2 études [11, 12]

Des campagnes par tubes à échantillonnage passif en milieu extérieur ont été recensées sur l'aéroport de Bâle-Mulhouse : une campagne en été 2005 et une pour l'hiver 2006.

Zones d'intérêt pour la campagne par tubes en milieu extérieur :

- Enceinte de l'aéroport : bordures de pistes, parkings des avions et des voitures, zones d'embarcation, centrales d'énergie, stockage de carburants...
- Proximité immédiate de l'aéroport
- Environs de l'aéroport : axes routiers, points de fond

Résultats :

NO₂ mesuré par tubes passifs

Sur la zone de l'Aéroport Bâle-Mulhouse, les disparités spatiales sont importantes (les niveaux en NO₂ variant de 15 à 44 µg/m³) selon les secteurs et les études :

- dans les zones qualifiées de publiques, c'est-à-dire à l'entrée de l'aérogare et à l'entrée du parking souterrain, les concentrations ont varié entre 29 et 42 µg/m³ suivant les études ;
- dans les zones réservées aux personnels travaillant sur la plate-forme (à proximité de la zone Fret, à proximité des aires de stationnement des aéronefs et entre la station de carburant et le pôle technique), les niveaux en NO₂ rencontrés sont de l'ordre de 20 µg/m³ pour une étude et 40 µg/m³ pour l'autre en moyenne sur 15 jours ;
- en bout et le long de la piste, les concentrations ont varié entre 15 et 21 µg/m³ avec une moyenne de 20 µg/m³ pour la première étude et entre 29 et 35 µg/m³ avec une moyenne de 30-35 µg/m³ pour la deuxième étude.

Aux abords de la piste et dans les zones d'accès réservé aux personnels, les niveaux ont fluctué entre 0,4 et 0,6 µg/m³ en moyenne sur 15 jours. Les concentrations les plus basses sont rencontrées sur les pistes de l'aéroport.

Benzène mesuré par tubes passifs

Sur la plate-forme aéroportuaire de Bâle-Mulhouse, les teneurs mesurées ont varié entre 1,6 et 2,9 µg/m³.

Aux abords de la piste et dans les zones d'accès réservé aux personnels, les niveaux ont fluctué entre 1,6 et 2,1 µg/m³ en m. Les concentrations les plus basses sont rencontrées aux abords des pistes de l'aéroport.

Dans les zones d'accès aux publics, c'est-à-dire à l'entrée de l'aérogare et à l'entrée du parking souterrain, les niveaux rencontrés sont les plus élevés observés sur la plate-forme avec respectivement 2,4 et 2,9 µg/m³.

L'entrée de l'aérogare et l'entrée du parking souterrain côté suisse sont des zones fortement exposées aux émissions du trafic routier comme le va-et-vient régulier dans la zone de pose et de dépose des passagers (les vitesses de circulation sont assez faibles), les véhicules entrant ou sortant des différents parkings de l'aéroport (vitesse également réduite), les véhicules circulant sur l'A35 (vitesse variable et pouvant être importante).

Les teneurs en dioxyde d'azote relevées dans la zone de l'aéroport correspondent à celles enregistrées sur les stations permanentes de fond telles que CC3F (station périurbaine) ou Mulhouse Sud II (station urbaine). Dans l'après-midi, on note de petites élévations des concentrations en NO₂ au niveau de la piste, très localisées dans le temps puisqu'elles sont perceptibles à 16h et 18h principalement, et totalement absentes du profil des stations de fond étudiées. Ces élévations de concentrations ont vraisemblablement une origine locale comme les activités de la plate-forme aéroportuaire (aéronefs, véhicules de transport des passagers, véhicules utilisés par le personnel circulant sur la zone) ou le trafic sur les axes de circulation adjacents comme l'autoroute A35.

Il n'y a pas de corrélation manifeste pouvant permettre de lier les niveaux en immissions d'un polluant avec le trafic aérien. Il y a bien des similitudes dans le profil NO₂ avec celui représentant le mouvement des aéronefs mais qui se limitent aux plages suivantes : de 5h à 9h, de 11h à 14h et de 21h à 24h. Seuls les pics d'activité aérienne de 7h-8h et 21h-23h peuvent être rapprochés avec une augmentation (plus ou moins importante) des niveaux de dioxyde d'azote aux abords de la piste.

4.1.2.6 Strasbourg-Entzheim (ASPA) - 5 études [13, 14, 15, 16, 17]

Sur Strasbourg-Entzheim cinq campagnes de mesure ont été recensées :

- une campagne par tubes à échantillonnage passif en milieu extérieur pour le NO₂ sur des périodes estivale et hivernale de 2000 à 2001 ;
- une campagne par tubes à échantillonnage passif en milieu extérieur pour le NO₂ et benzène sur des périodes estivale et hivernale de 2005 ;
- des campagnes par tubes à échantillonnage passif et analyseurs automatiques en milieu extérieur : campagnes en automne 2002, hiver 2003 et été 2004. Les polluants considérés sont NO₂, benzène ;

Zones d'intérêt :

Les domaines d'étude ne se limitent pas aux seules plates-formes aéroportuaires mais incluent des axes routiers majeurs et le tissu urbain environnant.

Mesures du dioxyde d'azote :

Les émissions d'oxydes d'azote en phase de décollage sont parfaitement perceptibles mais uniquement en seuil de piste. Dans toute la zone de l'Aéroport international de Strasbourg, les disparités spatiales sont assez faibles durant une campagne, mais varient fortement sur l'ensemble des données recueillies (les niveaux en NO₂ variant de 19 à 62 µg/m³), hormis le point situé au niveau du poste de contrôle des aires, au-dessus du parking avions, qui indique une concentration moyenne autour de 40 µg/m³. Les concentrations les plus importantes sont relevées à une station de proximité trafic, une station urbaine de fond et pour 3 sites mesurant la qualité de l'air intérieur ; les plus faibles en seuil de piste, après le parking de l'aviation générale.

Mesures du benzène :

Concernant le benzène, les concentrations relevées sont inférieures ou égales à 1 µg/m³ dans la zone d'étude en été ; en hiver les concentrations moyennes s'échelonnent de 2 à 4 µg/m³. Les niveaux de composés organiques volatils les plus élevés sont mesurés, dans les villages environnants, en situation de proximité

automobile. Sur la plate-forme aéroportuaire de Strasbourg, les teneurs mesurées sont restées inférieures à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec de faibles disparités spatiales, les niveaux les plus élevés étant relevés sur le site du parking de l'aviation. Les concentrations les plus importantes sont relevées à une station de proximité trafic, une station urbaine de fond et pour 3 sites mesurant la qualité de l'air intérieur. Le niveau moyen relevé en seuil de piste (transect) est quant à lui de $3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 15 jours d'exposition.

Résultats :

Les teneurs en dioxyde d'azote sont nettement inférieures à celles relevées dans toutes les stations permanentes de Strasbourg. Les variations enregistrées dans la zone de l'Aéroport présentent les pics caractéristiques d'une station de type périurbain (STG Ouest) obtenus aux heures de pointes de trafic mais les niveaux restent plus proches de ceux de la station rurale Nord-Est Alsace. Les profils obtenus traduisent l'influence dominante des axes de circulation routière, adjacents à la zone de l'Aéroport de Strasbourg-Entzheim.

De plus, les mesures comparatives réalisées en période d'activité et de non activité de l'Aéroport n'ont pas permis de souligner l'influence des activités aéroportuaires sur la qualité de l'air dans la zone de l'Aéroport de Strasbourg-Entzheim.

Les mesures en continu sur la piste de l'Aéroport n'ont pu détecter qu'une élévation très ponctuelle des niveaux au seuil de piste, au début de la phase de décollage. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions des différentes études menées en Europe et dans le monde sur l'état de la qualité de l'air autour des aéroports, qui mettent en évidence des niveaux faibles à modérés de pollution (cf. Rapport V. Pernelet [20]).

4.1.2.7 Rochambeau-Matoury (ORA6Guyane) - 1 étude [18]

Une étude a porté sur la mesure du NO_2 par tubes à échantillonnage passif en milieu extérieur pour quatre campagnes de quinze jours en 2006.

Les sites de trafic, correspondant aux axes routiers, ont les niveaux les plus élevés en dioxyde d'azote ($6,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et les sites urbains ont une moyenne de $4,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les niveaux les plus faibles sont mesurés sur les sites ruraux ($2,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et aéroportuaires ($2,91 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

On note des valeurs plus élevées en NO_2 sur Matoury en raison de la concentration de la population, sur la route de Roura ainsi que sur le parking de l'aéroport avec le trafic automobile. En revanche, sur l'aéroport et dans les zones rurales les niveaux sont très faibles voire quasi nuls. Non liée à l'aéroport mais plutôt à l'activité humaine « normale », la pollution est surtout due à l'automobile.

Les concentrations sont globalement faibles et proches des limites de quantification pour ce type de méthode d'échantillonnage, permettant difficilement une exploitation géostatistique du phénomène (cf [1], cas du Robert).

4.1.2.8 Lyon St Exupéry (ASCOPARG, SUPAIRE, COPARLY et STBA) - 2 études [10, 19]

Deux études portent sur la mesure du NO₂ par tubes à échantillonnage passif en milieu extérieur pour des périodes d'observation hivernale et estivale en 2002 et 2003.

Sur la zone de l'Aéroport Lyon St Exupéry, les disparités spatiales sont importantes (les niveaux en NO₂ variant de 16 à 38 µg/m³) selon les secteurs :

- dans les zones qualifiées de publiques, c'est-à-dire à l'entrée de l'aérogare les concentrations ont été mesurées à 31 µg/m³ ;
- dans les zones réservées aux personnels travaillant sur la plate-forme (à proximité de la zone Fret, les niveaux en NO₂ rencontrés sont de l'ordre de 30 µg/m³ ;
- en bout et le long de la piste, les concentrations ont varié entre 13 et 45 µg/m³ sur deux campagnes différentes réalisées en 2000 et 2002.

COV mesurés par canisters et cartouches

Les niveaux ont fluctué entre 0,2 et 2 µg/m³ en moyenne sur 15 jours. Les concentrations les plus basses sont rencontrées proches des pistes de l'aéroport.

Des mesures avec des instruments à long trajet optique ont également été réalisées pendant ces campagnes (2002-2003). Les résultats sont en accord avec les mesures par tubes.

4.1.2.9 Londres Gatwick - 1 étude [20]

Une étude porte sur la mesure du NO₂ par tubes à échantillonnage passif en milieu extérieur pour une période d'observation de mars 1990 à février 1991.

La campagne de mesure, relativement ancienne, a été réalisée le long de l'axe des pistes et dans la zone fret de l'aéroport. Les concentrations les plus élevées sont enregistrées dans la zone de fret et de l'aérogare montrant le poids très important des autres sources par rapport aux avions.

4.2 Synthèse des études portant sur les sites industriels

L'objectif de cette partie est de fournir, de manière synthétique, un état des lieux de l'utilisation de l'échantillonnage passif en milieu extérieur pour évaluer la pollution au voisinage de sites industriels.

On distingue plusieurs types de campagnes :

1. celles qui visent à évaluer l'impact d'un site industriel particulier ;
2. celles qui portent sur toute une zone industrielle ;
3. celles qui concernent un secteur d'activité spécifique dans un certain domaine géographique (cas des stations de distribution d'essence en agglomération)

4.2.1 Caractéristiques générales des campagnes

4.2.1.1 Etude de l'impact d'industries particulières

Caractéristiques de la pollution

Les polluants mesurés par tubes à échantillonnage passif sont principalement le benzène et les COV (plusieurs composés), et quelquefois le NO₂ et le SO₂.

Benzène :

Le benzène est souvent mesuré du fait qu'il existe un objectif de qualité annuel pour ce polluant mais il ne constitue pas nécessairement un traceur de l'activité industrielle. Ainsi, certaines activités consommatrices de solvants (emballage, imprimerie, ateliers de peinture de l'industrie automobile, ...) émettent des COV mais non spécialement du benzène. Les concentrations de benzène mesurées au voisinage du site industriel sont dues principalement au trafic routier des alentours; elles ne se distinguent pas des niveaux de fond.

En revanche, lorsque l'activité industrielle émet du benzène, c'est le cas des raffineries, des concentrations supérieures aux niveaux urbains de fond peuvent être observées près du site. L'impact maximal se situe sous les vents des installations émettrices.

COV :

Les COV autres que le benzène ne comptent pas parmi les polluants visés dans cette étude. Il est néanmoins intéressant d'en faire mention, compte tenu du nombre de campagnes qui leur sont consacrées. Pour certains COV traceurs de l'activité concernée, les mesures montrent une hausse des concentrations à proximité des installations mais cet impact reste localisé dans le ou les tout premiers kilomètres autour du site.

Stratégies d'échantillonnage mises en œuvre

L'ampleur des campagnes de mesure et les stratégies d'échantillonnage mises en œuvre sont diverses :

- Echantillonnage réduit à quelques sites (<10) localisés près des sources et en quelques sites de fond plus éloignés.
- Echantillonnage de plus grande taille (20 à 50 sites) :

- les points de mesure sont choisis en concertation avec les acteurs locaux dans l'environnement immédiat du site et dans les zones urbanisées environnantes (exemple de la raffinerie de Donges [21]) ;
- les points de mesure sont disposés de façon homogène dans l'environnement proche du site et sont complétés de transects perpendiculaires aux principales routes du domaine (exemple de l'UIOM de La Tronche [29])
- les points de mesure se répartissent selon une maille carrée (exemple de la verrerie de Veauche, mailles de 1,6 km² [28]) ;
- les points de mesure se répartissent selon un échantillonnage radial, conçu pour évaluer l'impact de sources diffuses (exemple des ateliers de peinture à Flins, Aulnay et Poissy : l'échantillonnage procède par cercles concentriques jusqu'à une distance de 2,4 km du site [32, 33, 34]).

4.2.1.2 Etude de l'impact de zones industrielles

L'impact d'une zone industrielle dépend grandement des sources présentes, de l'importance des émissions, de la configuration des lieux et des conditions météorologiques observées durant la campagne de mesure.

Deux types de stratégies de mesure sont déployés dans ces zones, avec des objectifs distincts :

- Les différents sites industriels font successivement l'objet d'un échantillonnage. Cette stratégie permet d'apprécier plus finement les influences de chaque émetteur mais non d'évaluer simultanément l'impact de toute la zone industrielle.
- L'échantillonnage se répartit dans tout le domaine d'étude, offrant une vision générale de la qualité de l'air dans ce domaine. Si des valeurs localement élevées révèlent l'impact de certaines activités, il est généralement peu aisé de distinguer les contributions relatives de chaque source.

4.2.2 Résumés commentés des études

4.2.2.1 Sites particuliers

▪ Donges - Raffinerie TOTAL (AIR-PL) – 1 étude [21]

Les niveaux de benzène (entre 0,9 et 3,3 µg/m³, avec une moyenne de 1,6) mesurés à proximité de la raffinerie Total France à Donges se situent dans la fourchette basse de ceux qui ont été enregistrés en période hivernale dans l'environnement d'autres sites de raffinage, que ce soient des niveaux moyens ou de pointe.

Les teneurs à proximité de la raffinerie sont supérieures de 30% en moyenne à celles enregistrées sur les sites urbains. Les niveaux les plus élevés sont enregistrés sur les sites situés sous les vents de la zone de stockage de la raffinerie. Ceci suggère une influence de la direction des vents sur la distribution spatiale des teneurs en benzène.

- *Sélestat - Alcan Packaging / Société Alsacienne d'Aluminium (ASPA) – 2 études [22, 23]*

Les marqueurs industriels liés à l'activité du site (présents dans les solvants de base et rejetés par évaporation) ne comprennent aucun des polluants visés par cette étude LCSQA. Les concentrations moyennes de benzène mesurées lors de la 2^{ème} étude sont plus élevées en centre-ville qu'aux abords du site. Les mesures mettent en évidence le caractère de fond des niveaux de benzène dans la zone d'étude, principalement issus du trafic routier plus dense au centre de l'agglomération de Sélestat que dans sa périphérie (alentours d'*ALCAN Packaging*) et sont cohérents avec les niveaux observés sur la station « Strasbourg Ouest » durant la même période.

- *Strasbourg - Imprimerie Didier Quebecor (ASPA) – 3 études [24, 25, 26]*

Les marqueurs industriels liés à l'activité du site (polluants typiquement rejetés par les *imprimeries*, présents dans les solvants de base et rejetés par évaporation) ne comprennent aucun des polluants visés par cette étude LCSQA. Les niveaux de benzène mesurés autour du site illustrent le caractère de fond du benzène, dont les concentrations sont principalement issues du trafic routier des axes alentours à la zone d'étude alors que l'origine du toluène est pour une part écrasante locale avec la présence de l'imprimerie.

- *Premery (ATMOSFAIR Bourgogne) – 1 étude [27]*

L'étude porte sur l'échantillonnage des COV par tube passif près d'émetteurs de substances odorantes. Les observations ont été réalisées pendant 6 mois environ, de novembre 2004 à Avril 2005. En moyenne sur les mesures, les niveaux de benzène restent assez faibles : 1,3 µg/m³ sur le site et inférieurs à 0,7 µg/m³ en dehors.

- *Veauche (AMPASEL) – 1 étude [28]*

Dans cette étude relative à l'impact d'un site verrier, NO₂ et SO₂ ont été mesurés par tubes passifs durant l'hiver 2001-2002. Les mesures ont été effectuées en période hivernale afin d'obtenir l'impact maximal du site. Un maillage régulier a été mis en place sur le site.

Les teneurs en NO₂ varient entre 11 et 28 µg/m³ et les teneurs en SO₂ entre 1 et 26 µg/m³ sur des périodes de mesures de quinze jours.

Pour le SO₂, la concentration moyenne est très marquée par un effet de panache, en revanche, pour le NO₂ l'interaction avec le trafic automobile gomme l'effet de panache.

- *Saint Martin d'Hères (ASCOPARG) – 1 étude [29]*

Cette étude concerne l'impact d'une installation d'Incinération d'Ordures Ménagères sur son environnement proche. Le NO₂ a été mesuré par tubes passifs de juillet 2002 à janvier 2003.

Une stratégie de mesure par maillage régulier a été couplée à l'utilisation de quatre transects (points situés de 5 à 250 m des axes routiers) afin d'évaluer les influences relatives des émissions industrielles et routières. En période estivale les concentrations sont semblables sur tout le domaine, en période hivernale le panache urbain devient prépondérant et englobe le panache industriel. Le phénomène de décroissance rapide des concentrations le long des axes (Figure 3) est mis en évidence par cette étude

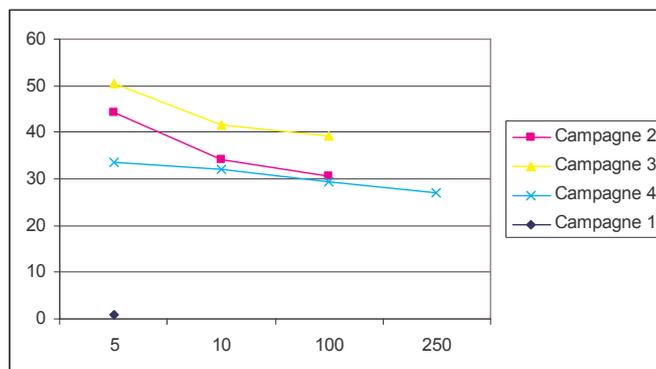


Figure 3 - Transect de NO₂, Saint Martin d'Hères [29]

▪ *Mulhouse - PSA Peugeot Citroën (ASPA) – 2 études [30, 31]*

Les marqueurs industriels liés à l'activité du site (*atelier de peinture*), déterminés lors de la 1^{ère} étude, sont des solvants et ne comprennent aucun des polluants visés par cette étude LCSQA. Le benzène a été mesuré lors des campagnes mais il est un traceur du trafic automobile dans et autour du site. Les concentrations en benzène sont du même ordre de grandeur que celles relevées en stations de fond urbain.

▪ *Trois centres de production automobile en Île de France (AIRPARIF) – 3 études [32, 33, 34]*

Trois centres de production automobile émetteurs de COV (activité de peinture) ont fait chacun l'objet de campagnes de mesure (une campagne hivernale et une campagne estivale) :

- Poissy (78) : Juin-août et novembre-décembre 2003
- Aulnay-sous-Bois (93) : Janvier-février et juillet -août 2005
- Flins (78) : Juin-août et novembre-décembre 2007

Un plan d'échantillonnage de type radial a été adopté dans les trois cas : les points de mesure se situent à l'intersection de cercles concentriques de rayon croissant (100, 500, 1200 et 2400 m), centrés sur la zone de production, et de radiales. Cette stratégie a été jugée pertinente du fait que les sources de COV sont diffuses et qu'a priori leur impact est plutôt local. L'échantillonnage comprend également six sites de mesure complémentaires, afin de pouvoir comparer les valeurs rencontrées dans le voisinage des sources avec les concentrations observées dans d'autres environnements d'Île-de-France (milieu rural, urbain, sous influence routière...). D'autre part, les périodes de mesure incluent les arrêts annuels de chaque centre de production, ce qui permet d'estimer la contribution de chacun aux teneurs en COV mesurées dans l'air ambiant.

Les résultats obtenus pour les trois sites industriels sont assez similaires et justifient la stratégie d'échantillonnage mise en œuvre. En ce qui concerne les COV choisis comme traceurs (butanol, butyl-acétate, xylène, 1,2,4 triméthylbenzène, éthylbenzène) :

- Plus de 55% des concentrations totales mesurées sous le vent des ateliers, à moins de 1,2 km de ceux-ci, sont attribuables aux activités de production (entre 55 et 75%, 60 et 80%, 70 et 90% selon le centre).
- En zone d'impact maximal, les concentrations de chaque COV pris individuellement sont de 1,5 à 25 fois supérieures aux teneurs mesurées en zone non influencée.
- L'impact se restreint à l'environnement proche des sources. Les concentrations moyennes observées sous les vents des ateliers, à une distance de 1,2 à 3 km, sont proches des valeurs relevées au vent des ateliers. En dehors de la zone d'impact, les concentrations de COV sont relativement homogènes.

Le benzène n'a pas été retenu comme traceur parce qu'il n'est pas émis par les ateliers de peinture. Etant le seul COV réglementé, il a été cependant mesuré. Les moyennes annuelles estimées en situation de fond sont inférieures à l'objectif de qualité ($2 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

NB : dans le cas de sources ponctuelles élevées, susceptibles d'avoir une influence à plus longue distance que des émissions diffuses, AIRPARIF estime qu'il peut être judicieux de définir le plan d'échantillonnage à l'aide d'une modélisation déterministe.

4.2.2.2 Zones industrielles

- *Drocourt Z.I. (ATMO-NPdC) – 3 études [35, 36, 37]*

Des mesures de benzène ont été réalisées par tubes à échantillonnage passif pendant plusieurs périodes d'étude.

Observation période estivale 2001 :

En moyenne sur les 3 périodes de mesure, la moyenne hebdomadaire est de $1,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur l'ensemble de la zone. Les niveaux les plus élevés restent concentrés autour des émetteurs industriels. Le site le plus élevé en moyenne est situé à Drocourt et atteint $7,69 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les teneurs relevées lors de la campagne de Juin-Juillet 2001, sont inférieures à celles enregistrées en Novembre-Décembre 2000. Ces mesures viennent confirmer la variabilité saisonnière des concentrations de benzène dans l'air ambiant, plus élevées en hiver qu'en été. Cependant, cette diminution des concentrations de benzène pourrait également être liée à la réduction de l'activité des *Cokes de Drocourt*. La présence de concentrations plus fortes à proximité des usines, délimitant ainsi l'étendue du panache, indique qu'il existe encore une certaine influence industrielle.

Cette étude a également permis d'évaluer en partie, l'influence du réseau routier au Nord de la zone d'étude. En effet, les concentrations relevées au centre ville d'Hénin-Beaumont sont supérieures à $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, alors qu'en périphérie, les teneurs ne

dépassent pas $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La commune d'Hénin-Beaumont subit d'une part l'influence du panache au Sud-Est et d'autre part, l'influence du trafic automobile au centre ville.

Observation période estivale 2002 :

En moyenne sur les 2 périodes de mesure, la moyenne est de $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur l'ensemble de la zone d'étude. Les vents étaient orientés de secteur Ouest. Les concentrations les plus élevées se situent autour de l'émetteur industriel. Le site le plus élevé en moyenne est situé à Drocourt et atteint $8,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les teneurs en benzène sont, en moyenne, les plus faibles enregistrées, depuis le début des mesures sur le secteur de Drocourt. L'étendue du panache industriel a d'ailleurs diminué de façon conséquente. Pour cette campagne, seuls deux sites subissent une certaine influence industrielle. Ces sites sont situés à proximité de Cray Valley (*fabrication de résines de polyesters insaturés et phénoliques*) et enregistrent des concentrations proches ou supérieures à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Observation périodes hivernale et estivale 2004 :

Mesures avant travaux :

La moyenne sur la quinzaine est de $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur l'ensemble de la zone d'étude. Les vents ont été de secteur Ouest à Sud-Ouest. Les concentrations les plus élevées se situent autour de l'émetteur industriel. Le site le plus élevé a enregistré une concentration de $7,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La moyenne sur la quinzaine est de $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur l'ensemble de la zone étudiée. Les vents sont de secteur Nord-Ouest. Les niveaux les plus élevés restent concentrés autour de l'émetteur industriel. Le site le plus élevé a enregistré une concentration de $4,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Mesures après travaux :

1) La moyenne sur la quinzaine est de $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur l'ensemble de la zone étudiée. Les vents sont de secteur Sud-Sud Ouest et Nord-Nord Est. Les niveaux ont été faibles et inférieurs à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le site le plus élevé a enregistré une concentration de $1,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

2) La moyenne sur la quinzaine est de $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur l'ensemble de la zone étudiée. Les vents sont de secteur Sud-Sud Ouest. Les niveaux les plus élevés restent concentrés autour de l'émetteur industriel. Le site le plus élevé (site 64) a enregistré une concentration de $5,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

L'étendue du panache industriel semble être, pendant les campagnes de février, mai et décembre, globalement équivalente à celle visualisée pendant la dernière campagne en juin-juillet 2002. Les points soumis à ce panache sont ceux situés à proximité de l'usine et influencés par la direction des vents dominants.

Entre février et novembre 2004, on constate une diminution des concentrations de benzène. En revanche, les concentrations enregistrées du 07 au 21 décembre ont de nouveau augmenté et ont été équivalentes à celles mesurées en février 2004. Le système mis en place par l'usine Cray Valley a fonctionné normalement durant ces périodes. D'autre part, la météorologie, semblable sur les deux quinzaines de

mesures, n'a pu apporter d'explications quant à cette nouvelle hausse des teneurs de benzène.

- *Le Havre Z.I. (AIRNORMAND) – 1 étude [38]*

Trois émetteurs industriels principaux de benzène sont installés sur la zone : une raffinerie (Total), une usine pétrochimique fabriquant des matières plastiques (Total Petrochemicals) et une usine de production d'additifs pour carburants et pour huiles industrielles et moteurs (Chevron Oronite).

En moyenne sur les 3 mois de mesure, l'impact majeur s'observe en zone industrielle. En première approche, 1/3 des concentrations mesurées sur les zones habitées de la commune proche de Gonfreville-l'Orcher est estimé imputable aux émissions de la zone industrielle. Ces concentrations se situent dans la fourchette des résultats obtenus ces dernières années autour d'autres zones pétrochimiques françaises.

Du fait de la proximité des 3 émetteurs, il n'a pas été possible d'estimer la part de responsabilité de chacun d'entre eux aux concentrations observées.

- *Saint-Dizier Z.I. (ATMO-CA) – 1 étude [39]*

La zone d'étude comporte 4 émetteurs susceptibles de contribuer à la pollution du secteur : une usine de fabrication d'émaux (Ferro France), une aciérie (Hachette et Driout) et deux fonderies (Valfond et La Société des Fonderies de St-Dizier). Chaque émetteur a successivement fait l'objet d'une campagne de mesures au cours de l'hiver 2001 par 4 tubes passifs et 1 camion mobile.

Pour l'une des fonderies, le benzène n'apparaît pas comme un indicateur pertinent. Concernant l'aciérie, la concentration plus élevée observée sur un site ne peut être due qu'à une influence industrielle compte tenu de l'environnement proche du site (trafic routier quasi nul, peu de construction). Pour les polluants concernés par cette étude LCSQA, l'usine de fabrication d'émaux est susceptible d'émettre des NO_x et des COV : un pic de pollution au NO₂ est observé pour 3 jours pendant lesquels le camion laboratoire est situé sous le vent de l'usine. Lors de la dernière période, les concentrations en benzène autour de la deuxième fonderie se sont avérées assez élevées mais la période de mesures s'est déroulée sous des conditions défavorables à une bonne dispersion des polluants.

- *Zone de Lacq (AIRAQ) – 1 étude [40]*

En complément des 6 stations fixes implantées dans le bassin de Lacq, AIRAQ a réalisé une campagne de mesure des BTEX pendant le mois de mai 2007. Au total, 43 sites répartis sur le domaine d'étude (15 km x 15 km) ont été équipés de tubes passifs afin d'évaluer les teneurs de benzène, toluène, éthylbenzène et xylène dans l'air ambiant. Les concentrations de benzène mesurées sont relativement faibles et homogènes (comprises entre 0,2 et 0,9 µg/m³). Elles sont comparables, voire inférieures, aux valeurs mesurées en milieu urbain. Les valeurs les plus élevées sont localisées près des grandes industries mais aussi dans les bourgs ; les valeurs les plus faibles se situent à l'extérieur du bassin même de Lacq. Les concentrations de toluène et de xylène sont plus hétérogènes mais restent très modérées ; elles atteignent leur valeur maximale près d'une usine de traitement des eaux usées pour

le premier polluant, et pour le xylène, dans un bourg de configuration propice à l'accumulation de polluants (rues étroites et de type canyon).

4.2.2.3 Autres : étude autour de stations de distribution d'essence à Montluçon (ATMO AUVERGNE) – 1 étude [41]

Des mesures de COV ont été réalisées par échantillonnage passif en octobre et novembre 2005 autour des stations de distribution d'essence de l'agglomération de Montluçon

Les niveaux de benzène mesurés à proximité des stations varient entre 0,5 et 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. L'étude ne montre pas de corrélation entre niveau de concentration et importance du stockage en carburant.

4.3 Synthèse des études portant sur les zones de proximité automobile

L'objectif de cette partie est de fournir un état des lieux sur l'utilisation de l'échantillonnage passif pour évaluer la pollution dans les zones de proximité automobile. Le terme de « transect », fréquemment employé et repris dans la synthèse ci-après, désigne un ensemble de sites de mesure disposés sur une perpendiculaire à la route étudiée. Les représentations de transects qui illustrent le paragraphe 4.3.2 sont extraites de rapports d'étude d'AASQA.

4.3.1 Caractéristiques générales des campagnes

Les campagnes d'échantillonnage par tubes permettent d'évaluer l'influence directe du ou des axes considérés, en moyenne sur une période donnée ou sur l'année. Elles ne renseignent pas sur l'impact à court terme, qui dépend des fluctuations du trafic et de la météorologie, ni sur la contribution de l'axe à la pollution de fond générale.

Zone d'influence

Si en général, les concentrations décroissent rapidement avec la distance à la route ([42], [43]), il s'avère que le type d'environnement (dégagé, urbanisé, très urbanisé) joue un rôle important dans l'évolution spatiale des concentrations de part et d'autre de l'axe. Il est donc important de tenir compte de ce paramètre dans la définition de la zone d'étude. Les études de transects montrent également qu'en fonction du polluant (NO_2 , benzène), la bande d'influence autour de l'axe diffère pour des typologies identiques. Ceci peut s'expliquer par le régime moteur des véhicules :

- les polluants majoritairement émis à bas régime (combustion incomplète) sont le CO, les COV (dont le benzène), les particules et SO_2 ;
- les polluants majoritairement émis à régime élevé sont les NO_x .

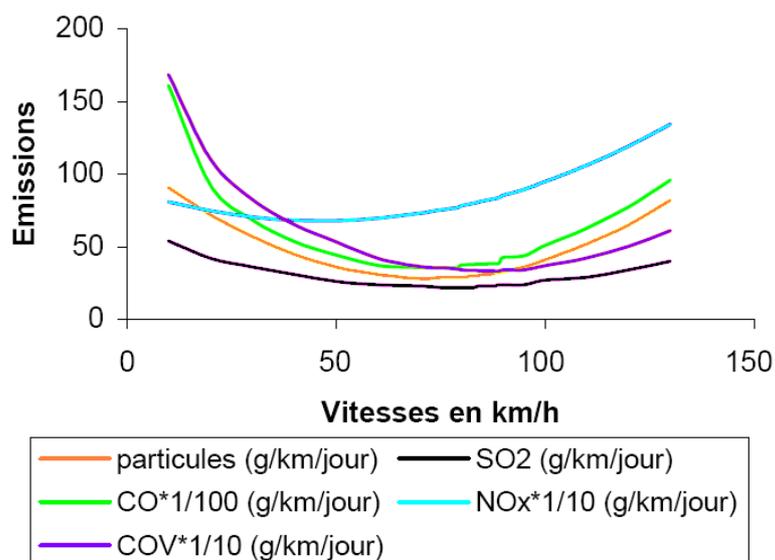


Figure 4 : Emissions en fonction de la vitesse de circulation (pour 1000 VP représentatifs du parc routier 2000) – source COPERT II, d'après [44]

Ainsi, à conditions de dispersion identiques, la bande d'influence de l'axe pour le NO_2 sera d'autant plus large que le trafic et/ou la vitesse de circulation seront plus

intenses. Celle du benzène sera majoritairement influencée par la congestion du trafic et les vitesses réduites.

D'autre part, la « Note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières » [45] du CERTU préconise une largeur de bande d'étude minimale selon le plus contraignant de deux critères :

- la valeur du trafic moyen journalier annuel (TMJA), ou en milieu urbain, le trafic à l'heure de pointe (TP) ;
- une valeur maximale en NO₂ en limite de bande.

Tableau 1 - Critères permettant de définir la largeur minimale de la bande d'étude [45]

TMJA (véhicules/jour)	TP (uvp/h)	Largeur minimale de la bande d'étude de part et d'autre de l'axe (en mètres)	Valeur maximale en NO ₂ en limite de bande (en µg/m ³)
TMJA > 100 000	TP > 10 000	300	0,9
50 000 < TMJA ≤ 100 000	5 000 < TP ≤ 10 000	300	0,7
25 000 < TMJA ≤ 50 000	2 500 < TP ≤ 5 000	200	0,3
10 000 < TMJA ≤ 25 000	1 000 < TP ≤ 2 500	150	0,3
TMJA ≤ 10 000	TP ≤ 1 000	100	0,3

D'après les distances d'influence que mettent en évidence les transects de NO₂ dans les différentes études (voir le paragraphe suivant), la largeur minimale préconisée pour la catégorie de trafic la plus importante est généralement suffisante. Cependant, des bandes d'influence plus larges peuvent être observées (ex : l'échangeur de Bagnolet, pour lequel une bande d'influence de l'ordre de 350-400 m est observée ; autres exemples [46]).

Echantillonnage et cartographie

La stratégie d'échantillonnage en zone de proximité automobile repose largement sur la pratique des transects. Ceux-ci sont utilisés seuls, s'il est question d'évaluer simplement l'impact latéral d'une route, ou bien ils complètent un ensemble de points disposés le long de celle-ci. Lorsqu'une information plus détaillée est recherchée, par exemple lorsqu'on souhaite caractériser une zone traversée par une route, l'échantillonnage comprend aussi des points de fond répartis dans le domaine d'étude.

4.3.2 Résumés commentés des études

4.3.2.1 Rouen (AIRNORMAND) - 1 étude [47]

Les 40 sites sélectionnés par l'étude de proximité automobile sont identiques (sauf 1) à ceux utilisés dans une étude de 2002 et concernent des axes de circulation importants de l'agglomération rouennaise. Une étude d'évaluation des concentrations de fond a été menée simultanément sur 80 sites de mesure [48].

NO₂ mesuré par tubes passifs

En situation de proximité, les concentrations de NO₂ ont globalement augmenté entre 2002 et 2004, avec un domaine de concentrations variant entre 29 et 109 µg/m³ en moyenne sur les 6 campagnes. Sur certains sites, les comptages routiers permettent

d'expliquer en partie l'augmentation des concentrations en NO₂, par l'augmentation du trafic poids lourds qui est fortement émetteur de NO_x. Pour d'autres sites, la nature du trafic est restée inchangée et l'hypothèse d'un changement dans la répartition des émissions entre NO et NO₂ est avancée (certains pots catalytiques des véhicules diesels plus récents augmenteraient la conversion du NO en NO₂)

Benzène mesuré par tubes passifs

Les concentrations en benzène en proximité automobile ont varié de 1,3 à 3,9 µg/m³ en moyenne sur 5 campagnes. Elles sont en stagnation voire en légère diminution par rapport aux mesures effectuées en 2000.

Etude des transects

Il n'y a pas eu d'étude spécifique de transects qui aurait permis de déterminer les distances d'influence des principaux axes routiers.

4.3.2.2 RN66 (AIRLOR) - 1 étude [49]

37 sites (dont 13 sites de proximité automobile, 8 sites de fond, et 16 sites utilisés pour réaliser des transects à Fresse et Rupt/Moselle) ont été investigués au cours de 3 campagnes d'une semaine. Globalement, les emplacements étaient similaires à ceux ayant servi à la réalisation d'une campagne de mesures en 1998. Deux stations mobiles ont également été utilisées pour évaluer la variabilité temporelle des concentrations.

NO₂ mesuré par tubes passifs

En situation de proximité, les concentrations en NO₂ ont varié entre 25 et 83 µg/m³ en moyenne sur les 3 campagnes, avec une moyenne de 48 µg/m³. En situation de fond, les concentrations ont varié entre 6 et 35 µg/m³ en moyenne sur les 3 campagnes, avec une moyenne de 17 µg/m³.

Benzène mesuré par tubes passifs

En situation de proximité, les concentrations en benzène ont varié entre 0,6 et 5,7 µg/m³ en moyenne sur les 3 campagnes, avec une moyenne de 2,8 µg/m³. En situation de fond, les concentrations ont varié entre 0,9 et 1,8 µg/m³ en moyenne sur les 3 campagnes, avec une moyenne de 1,3 µg/m³.

Etude des transects

Des tubes ont été disposés selon 2 transects à des distances de 50, 100 et 200 mètres de part et d'autre de la voie : l'un dans un secteur non urbain et bien dégagé (Rupt-sur-Moselle), l'autre dans un secteur rural, bien dégagé, mais avec une circulation importante sur la RN66 (Fresse).

Pour Rupt-sur-Moselle, les comptages de véhicules effectués sur la commune la plus proche (Le Thillot) durant la même période montrent un trafic soutenu dans les deux sens avec une moyenne de 12 120 véhicules par jour (2 sens cumulés), dont environ 10% dus au trafic poids lourds.

Des comptages automobiles réalisés sur la commune de Fresse indiquent un trafic moyen journalier de 8936 véhicules, dont 978 poids-lourds (soit environ 11%).

La réalisation de transects (Figure 5) a mis en évidence des teneurs en NO₂ généralement plus élevées en bordure directe de l'axe et diminuant dès que l'on s'en

éloigne. Les niveaux de fond se retrouvent entre 50 et 100 mètres de la voie, ce qui permet de déterminer une bande d'influence d'environ 50 mètres de part et d'autre de la RN66.

En ce qui concerne le benzène, aucun effet significatif n'est observé.

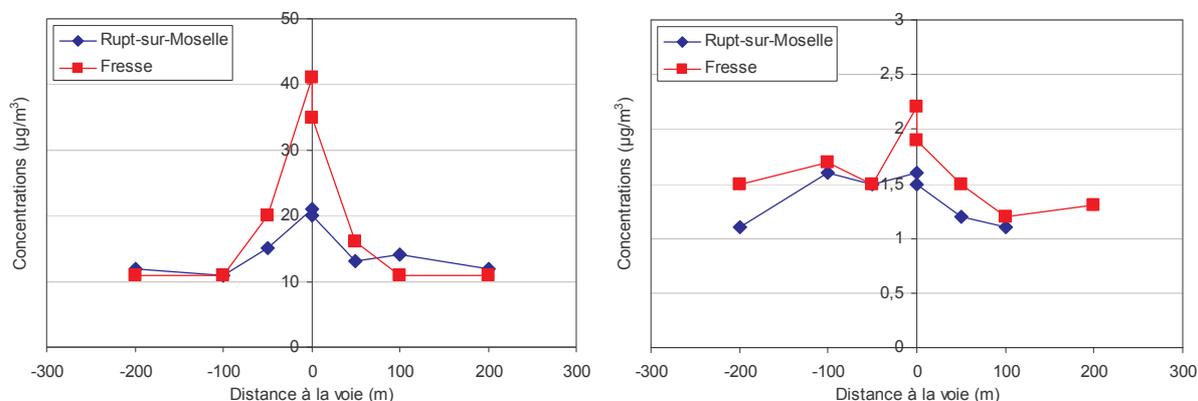


Figure 5 : Transects de (gauche) NO₂ et (droite) benzène (d'après [49])

4.3.2.3 RN83 (ASPA) - 1 étude [50]

Les concentrations en benzène et NO₂ ont été mesurées lors de 2 fois 4 campagnes de 14 jours durant l'hiver (février-avril) et l'été (juin-août) 2006, au cours desquelles 16 sites ont été équipés d'échantillonneurs passifs pour la mesure du NO₂ et des BTEX. Une station mobile a également été utilisée pendant 15 jours pour évaluer la variabilité temporelle des concentrations.

NO₂ mesuré par tubes passifs

Les concentrations moyennes de dioxyde d'azote reconstituées sur une année ont varié de 23 à 81 µg/m³ sur l'ensemble du dispositif de mesure. Les niveaux annuels reconstitués les plus élevés s'observent en proximité immédiate de la RN83, entre 1 et 2 mètres de l'axe étudié, avec des concentrations en dioxyde d'azote supérieures à 60 µg/m³. Les niveaux les plus faibles s'observent à des distances supérieures à 700 mètres de l'axe d'étude avec des teneurs moyennes annuelles comprises entre 20 et 30 µg/m³.

Benzène mesuré par tubes passifs

Les concentrations moyennes de benzène reconstituées sur une année ont varié de 1,0 à 1,4 µg/m³ sur l'ensemble du dispositif de mesure. Les niveaux annuels reconstitués les plus élevés s'observent aux points de mesure localisés dans le village de Guémar. Ces niveaux restent toutefois modérés au vu de l'ensemble de l'échantillon étudié puisque le différentiel entre les concentrations moyennes annuelles les plus élevées et les plus faibles n'est que de 0,4 µg/m³ : on notera une certaine homogénéité des teneurs en benzène durant l'étude, que l'on soit en proximité immédiate de la RN83 ou à distance de celle-ci.

Etude des transects

Un transect de 8 points de mesure a été mis en place de part et d'autre de la RN83, entre Ribeaupillé Gare et Guémar pour mesurer l'influence de la RN83 sur les niveaux de pollution en lien avec l'éloignement à la route.

Pour le NO₂, la légère dissymétrie observée dans la répartition des concentrations sur le transect (Figure 6) est liée au trafic routier de la D106 en direction des vallées vosgiennes et des émissions qui en résultent.

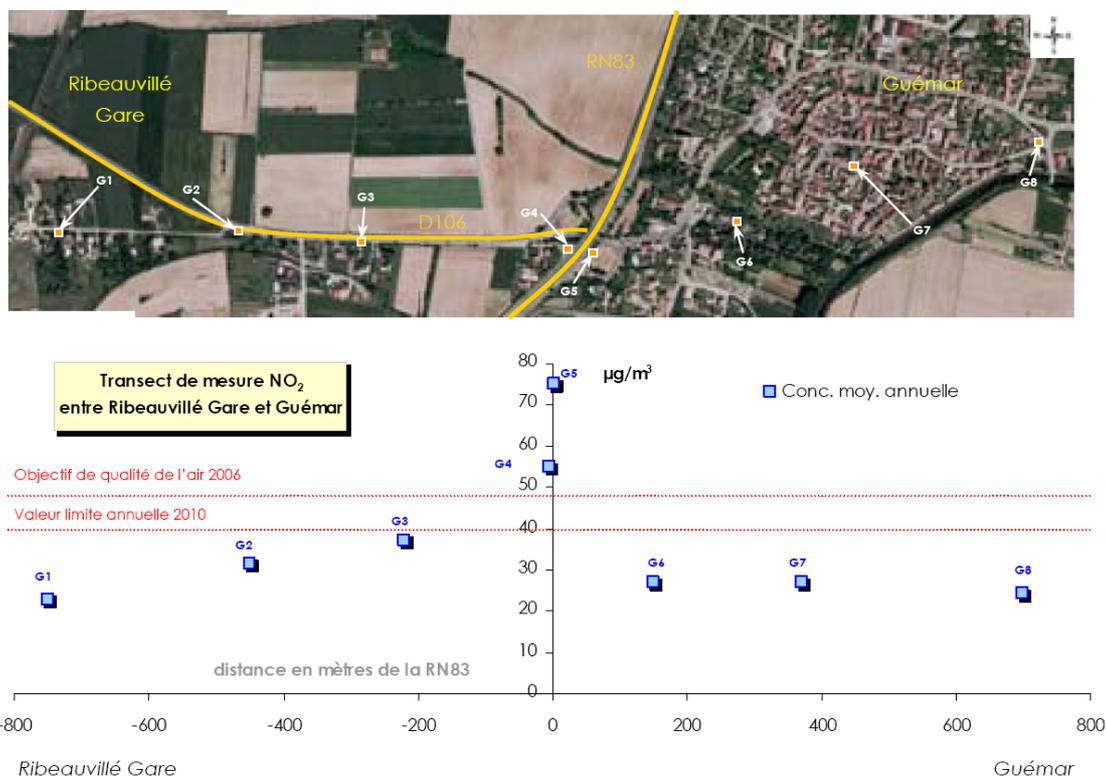


Figure 6 : Transect de NO₂ entre Ribeauvillé Gare et Guémar [50]

La répartition des niveaux en benzène le long du transect entre Ribeauvillé Gare et Guémar (Figure 7) ne montre pas de corrélation avec les observations faites pour le dioxyde d'azote : les concentrations en benzène sont assez homogènes sur l'ensemble du transect avec des teneurs qui peuvent être plus importantes sur des sites de fond urbain comme ceux localisés dans la commune de Guémar, plutôt qu'en proximité de la RN83.

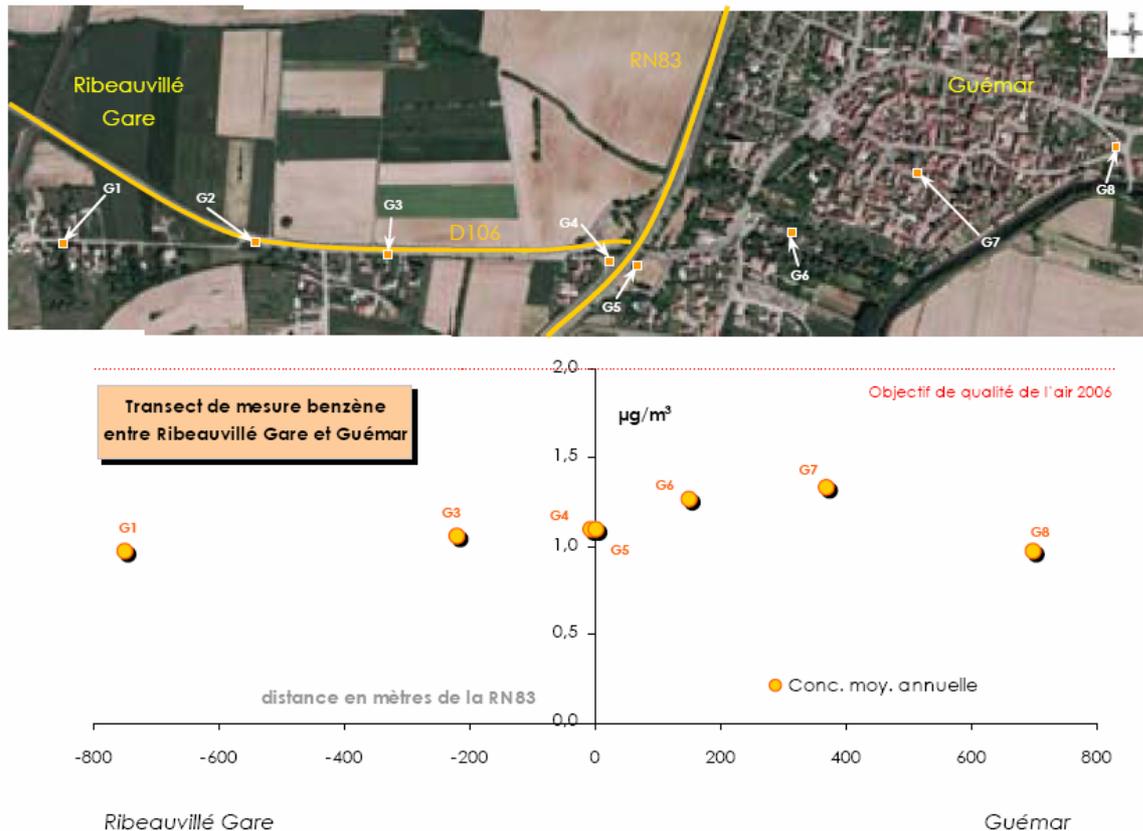


Figure 7 : Transect de benzène entre Ribeaupillé Gare et Guémar [50]

4.3.2.4 A36 (ASPA) - 1 étude [51]

Les concentrations en benzène et NO₂ ont été mesurées lors de 2 fois 3 campagnes de 15 jours sur les périodes hivernale (février-mars 2001) et estivale (mai-juillet 2001) pour 16 sites. Une station mobile a également été utilisée pour évaluer la variabilité temporelle des concentrations.

NO₂ mesuré par tubes passifs

Les concentrations en dioxyde d'azote présentent d'assez fortes disparités spatiales aux abords de l'autoroute. Les concentrations moyennes de dioxyde d'azote mesurées durant la période du 23 mai au 4 juillet 2001 ont varié de 24 µg/m³ à 84 µg/m³. Les valeurs les plus élevées (supérieures à 50 µg/m³) sont relevées en proximité directe de l'autoroute urbaine A36 (distance par rapport aux axes de circulation inférieure à 5 mètres) avec des niveaux plus élevés là où le trafic est le plus dense, ainsi aux abords de l'échangeur des autoroutes A35 et A36 (trafic important) où le maximum de concentrations est atteint. Les plus faibles valeurs sont obtenues sur les sites situés sur le transect rural où l'autoroute, seule source émettrice, est à une distance de 50 et 100 mètres.

Benzène mesuré par tubes passifs

Les concentrations moyennes de benzène mesurées en période estivale ne présentent pas de disparités spatiales (concentrations relevées proche de 1 µg/m³). Le maximum (1,6 µg/m³) a été relevé en situation de proximité automobile. Les niveaux les plus bas se rencontrent au niveau du transect rural avec 0,6 µg/m³.

Etude des transects

Des tubes ont été disposés selon 2 transects à des distances de 50, 100 et 200 mètres de la voie : l'un en zone urbaine pour évaluer l'exposition de la population, l'autre en zone rurale pour appréhender la variation spatiale de la pollution et ainsi déterminer l'impact de l'A36 (Figure 8).

Pour NO_2 , une décroissance des concentrations à 50 et 100 mètres traduit l'influence de l'autoroute ; au delà, les niveaux sont représentatifs du fond de pollution.

Les concentrations de benzène ne présentent pas de disparités spatiales importantes le long des transects (conditions météorologiques favorables à la dispersion et conditions de trafic défavorables à l'émission, avec soit peu de bâti en zone rurale, soit addition de la pollution liée aux axes dans la zone urbaine).

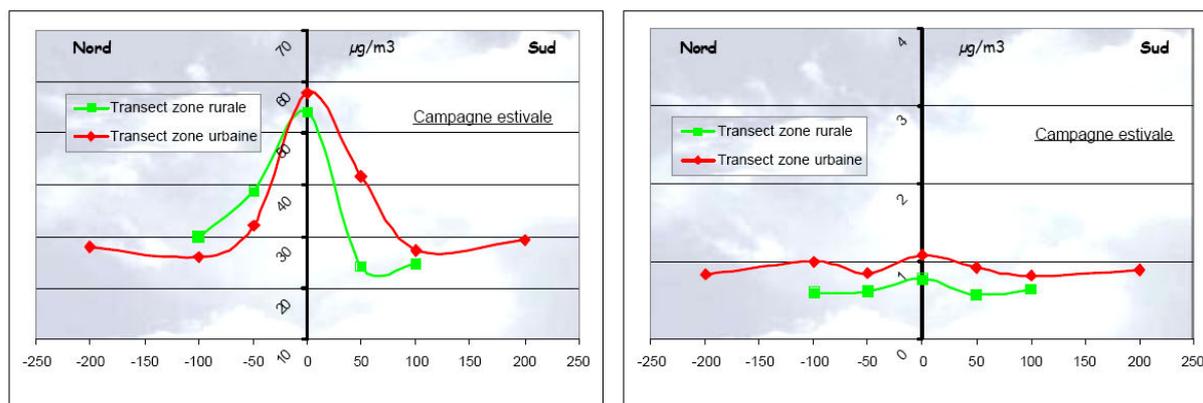


Figure 8 : Transects pour (gauche) NO_2 et (droite) C_6H_6 en zones rurale et urbaine pour la période estivale [51]

4.3.2.5 Savigny le Sec (ATMOSFAIR Bourgogne) - 1 étude [52]

Observations mai à juin 2004 - NO_2 mesuré par tubes passifs

Les sites sélectionnés pour l'étude sont compris entre deux axes routiers. Cependant il est impossible d'établir des transects. Les concentrations sont globalement assez faibles et varient de 4 à 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le trafic routier est la source majoritaire.

4.3.2.6 Montluçon (ATMO AUVERGNE) - 2 études [53, 54]

Observations août à septembre 2005 - NO_2 mesuré par tubes passifs

L'étude a pour objet la caractérisation de l'état initial de la qualité de l'air dans la zone concernée par la mise à 2 x 2 voies de la Route Centre Europe Atlantique, entre la RN144 et l'A71 (contournement de Montluçon). Une dizaine de sites ont été disposés le long de l'axe. Les teneurs en NO_2 relevées fluctuent entre 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il est impossible d'établir de transects.

Observations janvier à février 2006 - NO_2 et benzène mesurés par tubes passifs

Le complément d'étude porte notamment sur la mesure de transects perpendiculairement à l'axe routier. Cette étude met en évidence une forte décroissance de la concentration en NO_2 dans les premiers 200 m (Figure 9).

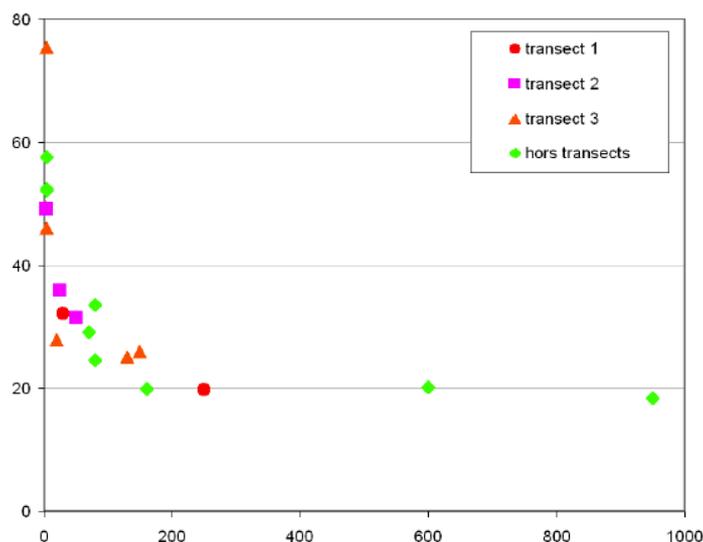


Figure 9 : Transect de NO₂ - RN 144 [54]

Les teneurs en NO₂ relevées fluctuent entre 48 µg/m³ et 59 µg/m³. Six sites de mesure en benzène ont été échantillonnés au cours de cette deuxième campagne. Les concentrations en benzène sont comprises entre 0,6 et 0,93 µg/m³.

4.3.2.7 Saint- Etienne (AMPASEL) - 2 études [55, 56]

Impact d'une nouvelle ligne de tramway / Observations hiver 2002-2003 - NO₂ mesuré par tubes passifs

Les sites de mesures sont situés le long de l'axe de la future ligne de tramway. Aucun transect n'a été défini. Les concentrations varient entre 32 et 70 µg/m³.

Impact du nouveau boulevard urbain / Observations septembre-octobre 2003 - NO₂ et BTX mesurés par tubes passifs

Les sites de mesures sont situés le long du nouveau boulevard routier. Une vingtaine de sites couvrant l'ensemble de l'aménagement routier. Les concentrations en NO₂ relevées fluctuent entre 27 µg/m³ et 81 µg/m³ sur l'ensemble de la campagne, les concentrations en benzène sont comprises entre 2 et 5 µg/m³.

4.3.2.8 Agglomérations montpelliéraine et perpignanaise, et Lunel (AIR LR) - 10 études [57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66]

De multiples études ont été conduites depuis une dizaine d'années :

- soit avant nouvel ouvrage ou modification d'un ouvrage (autoroutes, routes nationales ou départementales, tramway). Ces études sont les plus nombreuses. Il s'agit d'états des lieux préliminaires qui prennent en compte d'une part, les axes de circulation existants et d'autre part, le tracé des futurs ouvrages.
- soit après la mise en service des lignes du tramway.

Toutefois, qu'elles soient futures ou existantes, les voies de circulation sont considérées de la même façon dans la définition de l'échantillonnage. En effet, un état initial de la qualité de l'air doit pouvoir servir de point de comparaison dans des

évaluations ultérieures. Les stratégies d'échantillonnage mises en œuvre avant et après la construction d'un nouvel ouvrage doivent donc être cohérentes.

Dans toutes les études, des tubes à échantillonnage passif sont utilisés. Leur nombre et leur répartition dans l'espace dépendent du type d'information recherché. Ils sont disposés :

- le long de la route (ex. du futur contournement ouest de Montpellier) ou de la ligne de tramway (future ou existante) pour une évaluation de l'impact local ;
- perpendiculairement à la route, selon un ou plusieurs transects, pour une évaluation de l'influence latérale (la plupart des études);
- dans la ville, en complément des transects, pour évaluer plus largement l'impact de l'ouvrage (ex. : Montpellier, 2001, après mise en service du tramway).

Le Tableau 2 synthétise les résultats obtenus par les données de transects. Des exemples extraits des rapports d'AIR Languedoc Roussillon sont fournis dans les figures ci-après.

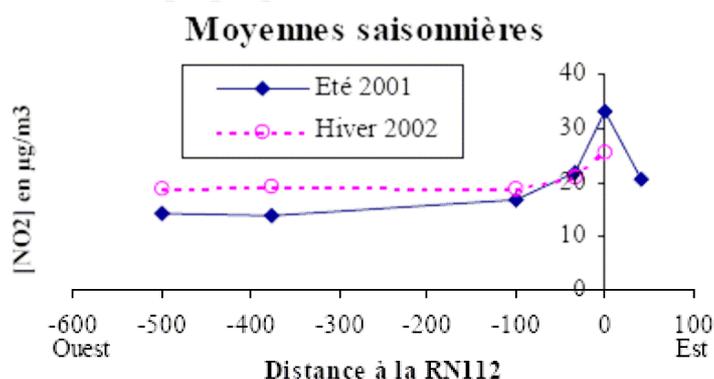


Figure 10 : Transect de NO₂ perpendiculaire à la RN112, réalisé dans le cadre du futur contournement ouest de Montpellier [57]

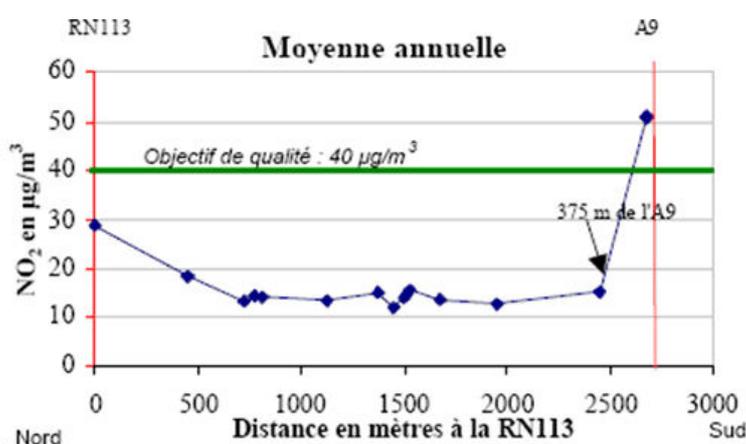


Figure 11 : Transect de NO₂ sur un axe perpendiculaire à la RN113 et à l'A9, réalisé dans le cadre de la future déviation est de Montpellier [58]

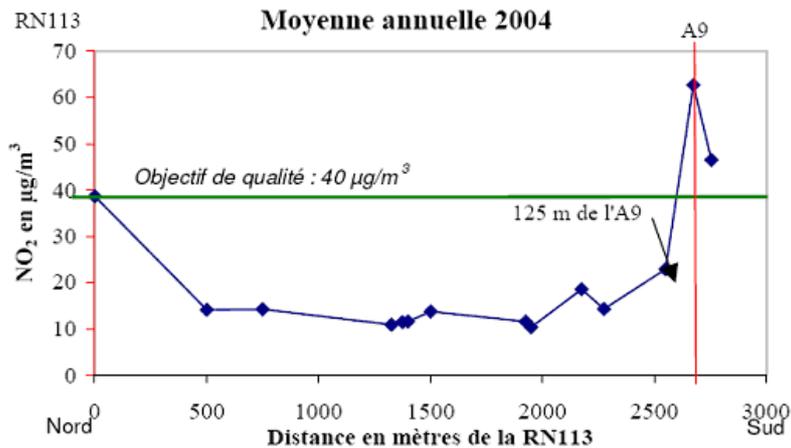


Figure 12 : Transect de NO₂ sur un axe perpendiculaire à la RN113 et à l'A9, réalisé avant le dédoublement de l'autoroute A9, de la déviation est et du contournement ouest de Montpellier [59]

Dans certaines études, des analyseurs sont mis en place en un ou quelques sites choisis dans des quartiers peuplés - souvent un site de trafic et un à trois sites de fond. La période de mesure des analyseurs recoupe partiellement ou en totalité celle des tubes.

Remarque sur le contraste été/hiver :

Les concentrations mesurées pendant les phases estivales de ces campagnes sont inférieures aux concentrations mesurées pendant les phases hivernales pour la majorité des sites. Cette relation d'ordre ne se vérifie généralement pas aux abords mêmes des axes de circulation, à cause de l'augmentation du trafic estival.

Tableau 2 - Etude de transects sur la région Languedoc-Roussillon

Ouvrage	Type de voie	Année	Polluant	Niveaux de concentration observés	Distance à laquelle on retrouve le niveau de fond	Remarques sur la décroissance des concentrations
A9 avant son doublement [60]	Autoroute	Été et hiver 1997	NO ₂	Dépassement de l'objectif de qualité annuel (40 µg/m ³) sur les 50 premiers mètres	100 m	Distance de décroissance observée en pleine nature
A9 avant déviation est de Montpellier [58]	Autoroute	Été et hiver 2002	NO ₂	Dépassement de l'objectif de qualité annuel (40 µg/m ³) aux abords de la route	300 à 500 m	
A9 avant déviation est de Montpellier [58]	Autoroute	Été et hiver 2002	Benzène	Faible impact de l'autoroute, valeurs proches des mesures dans les vignes	1000 m ?	Du fait des faibles valeurs, la décroissance est lente et peu marquée quand on s'éloigne de la route.
A9 avant son dédoublement, déviation est et contournement ouest de Montpellier [59]	Autoroute	Été et hiver 2004	NO ₂	Dépassement de l'objectif de qualité annuel (40 µg/m ³) sur les 50 premiers mètres	200 m à 500 m	Décroissance rapide, en ville comme à la campagne
RN113 [60]	Nationale	Été et hiver 1997 (même campagne que pour l'A9)	NO ₂	Impact moindre que celui de l'autoroute	500 m	
RN113 avant déviation est de Montpellier [58]	Nationale	Été et hiver 2002 (même campagne que pour l'A9)	NO ₂	Impact moindre que celui de l'autoroute	300 à 500 m	
RN113 avant déviation est de Montpellier [58]	Nationale	Été et hiver 2002 (même campagne que pour l'A9)	Benzène	Dépassement de l'objectif de qualité annuel (2 µg/m ³) aux abords de la route	entre 500 et 1500 m	Nombre de points insuffisant pour déterminer précisément la distance de stabilisation

Ouvrage	Type de voie	Année	Polluant	Niveaux de concentration observés	Distance à laquelle on retrouve le niveau de fond	Remarques sur la décroissance des concentrations
RN113 avant réalisation d'une déviation [61]	Nationale	Été et hiver 2006	NO ₂	Dépassement de l'objectif de qualité annuel (40 µg/m ³) sur les 50 premiers mètres	200 m	Décroissance très rapide quel que soit le tronçon, en ville comme à la campagne.
RN113 avant réalisation d'une déviation [61]	Nationale	Été et hiver 2006	Benzène	Dépassement de l'objectif de qualité annuel (2 µg/m ³) sur les 70 premiers mètres		Evolution différente selon le tronçon : nette décroissance ou stagnation, si un axe passant se trouve à proximité.
RN112 avant contournement ouest de Montpellier [57]	Nationale	Été et hiver 2001-2002	NO ₂		100 m	Décroissance rapide.
RN112 avant contournement ouest de Montpellier [57]	Nationale	Été et hiver 2001-2002	Benzène	Teneurs faibles (0,9 µg/m ³ à 1,5 µg/m ³)		
RD22C [62]	Départementale (en zone urbaine, Perpignan)	Été et hiver 2002	NO ₂	Teneurs homogènes et basses (sauf à proximité immédiate de la route, où elles approchent l'objectif de qualité de 40 µg/m ³)	50 m à 100 m	
RD22C [62]	Départementale (en zone urbaine, Perpignan)	Été et hiver 2002	Benzène	Teneurs homogènes et basses (sauf à proximité immédiate de la route, où elles approchent l'objectif de qualité de 2 µg/m ³)	50 m à 100 m	
Diverses voies urbaines de Montpellier [63, 64]		Été et hiver 2002	NO ₂	Concentrations sur l'axe de 25 à 35 µg/m ³		Evolution différente selon les axes : diminution rapide des concentrations pour certains ; pour d'autres, qui traversent des zones de trafic relativement important et/ou de configuration peu favorable à la dispersion, pas de décroissance.

4.3.2.9 Agglomérations de Toulon, Aix-en-Provence et Marseille, et autoroute A7 (ATMO PACA) - 7 études [67, 68, 69, 70, 71, 72, 73]

Les campagnes de proximité recensées concernent également des ouvrages en projet ou en service. Celles qui font uniquement usage d'analyseurs automatiques ne sont pas prises en compte dans ce bilan.

Les sept campagnes combinent la réalisation (sur des périodes identiques ou se recoupant très largement) :

- de mesures par tubes, en au moins 25 sites pour le NO₂ et 10 sites pour le benzène ;
- de mesures par analyseurs, en un ou plusieurs sites de typologies différentes.

La stratégie d'échantillonnage spatial utilisée pour les mesures par tubes obéit aux lignes directrices suivantes :

- répartition des points sur des transects, en veillant à ce que les principales situations de pollution et d'exposition des populations soient représentées dans l'échantillonnage : axes majeurs de la zone d'étude, zones habitées proches de la voie, sites urbains caractéristiques du fond ;
- disposition de quelques points complémentaires entre les transects ;
- densification de l'échantillonnage dans la zone d'étude, si la cartographie constitue un objectif de campagne (une cinquantaine de tubes).

Cette stratégie vaut pour l'échantillonnage du NO₂. En ce qui concerne le benzène, ne sont retenus parmi ces points que les sites jugés les plus exposés.

Comme précédemment, le Tableau 3 fournit quelques résultats de mesures par transects. Le graphique ci-après a été extrait d'un rapport d'ATMO PACA.

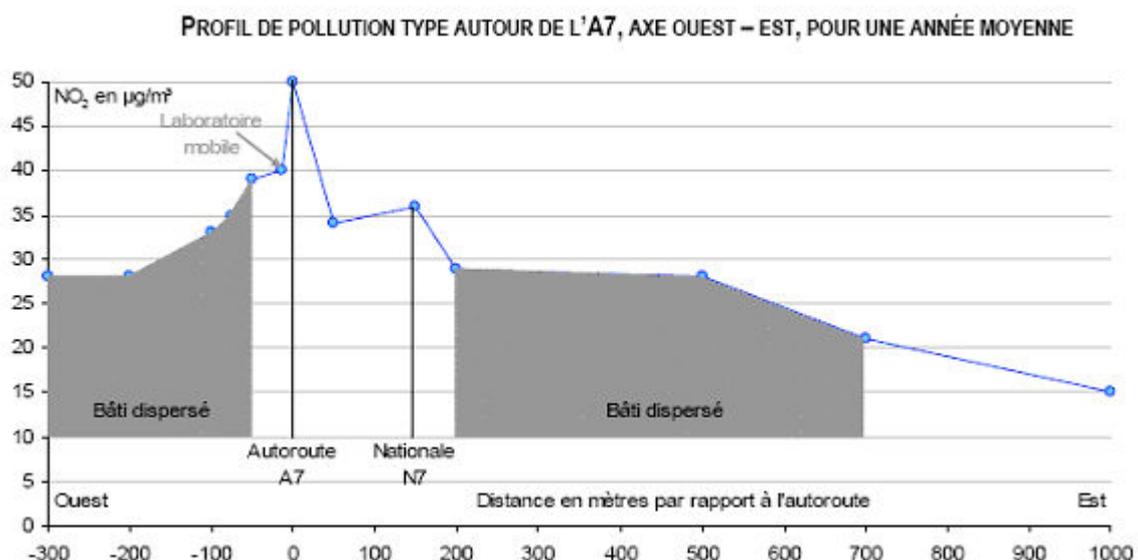


Figure 13 : Transect de NO₂ autour de l'A7 [67]

Tableau 3 - Etude de transects sur la région PACA

Ouvrage	Type de voie	Année	Polluant	Niveaux de concentration observés	Distance à laquelle on retrouve le niveau de fond	Remarques sur la décroissance des concentrations
A7 (zone de Piolenc-Mornas) [67]	Autoroute	Automne 2004	NO ₂	Dépassement de l'objectif de qualité annuel (40 µg/m ³) sur les 50 premiers mètres	200 m	Distance pour le côté opposé à la N7.
N7 (zone de Piolenc-Mornas) [67]	Autoroute	Automne 2004 (même campagne que ci-dessus)	NO ₂	Impact moindre que celui de l'autoroute	100 m	Distance pour le côté opposé à l'A7. Lente décroissance au-delà de cette distance.
Avenue de l'Europe, Place J-M Joret, Aix [68]	Axe urbain, à l'intersection d'un rond-point	Hiver 2005	NO ₂	Dépassement de l'objectif de qualité annuel (40 µg/m ³) sur 50 m d'un côté et sur 150 m ou plus de l'autre	150 m du côté où la concentration est plus basse.	Le niveau de fond atteint n'est pas le même de chaque côté de l'avenue.
Avenue de l'Europe, Aix [68]	Axe urbain, à l'endroit de la gare routière	Hiver 2005	NO ₂	Dépassement de l'objectif de qualité annuel (40 µg/m ³) sur 25 m d'un côté et sur 200 m ou plus de l'autre	50 m du côté où la concentration est plus basse.	Le niveau de fond atteint n'est pas le même de chaque côté de l'avenue.

4.3.2.10 *Etudes en proximité d'axes routiers dans la région Midi-Pyrénées (ORAMIP) - 5 études [74, 75, 76, 77, 78, 79]*

Les études conduites par l'ORAMIP sont des états des lieux avant nouvel aménagement routier ou bien des évaluations après mise en service d'un ouvrage. Elles reposent sur l'utilisation de tubes à échantillonnage passif

Le domaine d'étude est toujours une bande rectangulaire centrée sur la portion de route étudiée.

Dans la plupart des études, les sites de mesure s'organisent en transects dirigés perpendiculairement à l'axe étudié ou selon des routes secondaires qui coupent ce dernier. Des points isolés supplémentaires sont également installés en bordure du domaine.

Tableau 4 - Etude de transects sur la région Midi-Pyrénées

Ouvrage	Type de voie	Période	Polluant	Niveaux de concentration observés	Distance à laquelle on retrouve le niveau de fond	Remarques sur la décroissance des concentrations
RN126 [74]	Nationale	Automne 2004	NO ₂	Teneurs assez faibles (31 µg/m ³) en bordure de la route	Faible (valeur non précisée)	Rapide décroissance. Environnement dégagé, favorable à une dispersion rapide.
RN126 [74]	Nationale	Automne 2004 (même période de campagne que le NO ₂)	Benzène	Teneurs d'au plus 2,5 µg/m ³ en bordure de la route et relativement basses dans le reste de la zone	Faible (valeur non précisée)	Rapide décroissance. Environnement dégagé, favorable à une dispersion rapide.
RN112 [79]	Nationale	Automne 2004	NO ₂	Teneurs assez faibles (30 µg/m ³) en bordure de la route	Faible (valeur non précisée)	Rapide décroissance. Environnement dégagé, favorable à une dispersion rapide.
RN112 [79]	Nationale	Automne 2004 (même période de campagne que le NO ₂)	Benzène	Teneurs d'au plus 2,1 µg/m ³ en bordure de la route et relativement basses dans le reste de la zone	Faible (valeur non précisée)	Rapide décroissance. Environnement dégagé, favorable à une dispersion rapide.

4.3.2.11 Région Ile-de-France (AIRPARIF) - 6 études [80, 81, 82, 83, 84, 85]

La plupart des campagnes de mesure conduites par AIRPARIF ont pour objet de caractériser la qualité de l'air au voisinage des grands axes routiers d'Ile-de-France ou des grandes voies parisiennes. Seule une des campagnes recensées [80] s'inscrit dans une étude d'impact préalable à un aménagement routier (ici la construction d'une couverture acoustique). Comme elle ne comporte qu'un seul site d'échantillonnage passif, elle n'est pas analysée plus en détail.

Le nombre de sites d'échantillonnage passif varie selon les études (de 6 à 60 environ). Sauf dans la campagne de Montreuil [81], des analyseurs automatiques fonctionnent en parallèle en un ou plusieurs endroits.

La stratégie d'échantillonnage spatial dépend elle aussi des campagnes, notamment de l'étendue et de la complexité de la zone d'étude.

A proximité de grandes routes, elle comporte toujours des transects ; ceux-ci sont souvent complétés de points spécifiques et/ou d'un maillage :

- transects seuls [82] ;
- sites au plus près des routes et transects [83] ;
- maillage régulier, sites spécifiques et transects [84].

En milieu urbain [85], les sites d'échantillonnage sont disposés le long des principales voies considérées.

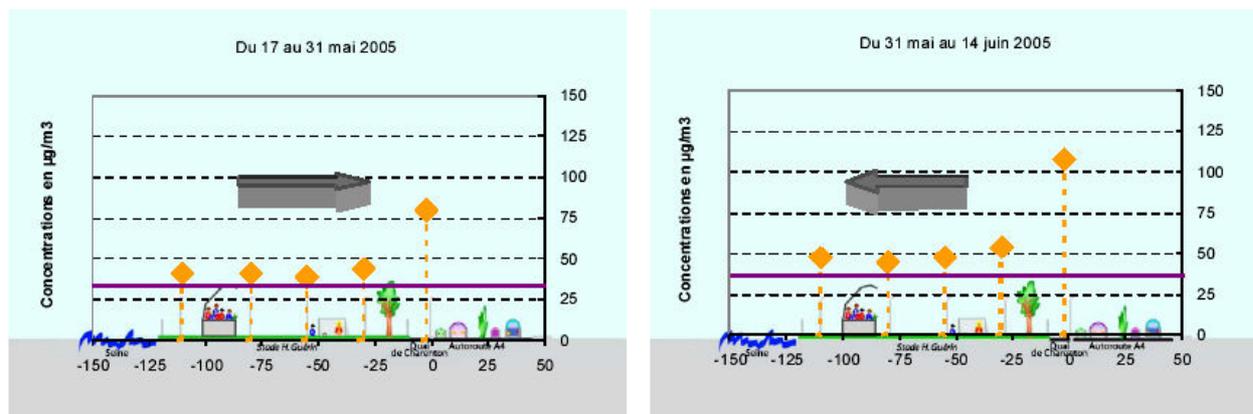


Figure 14 : Transects de NO₂ en milieu dégagé (autoroute A4, stade H. Guérin) [82]

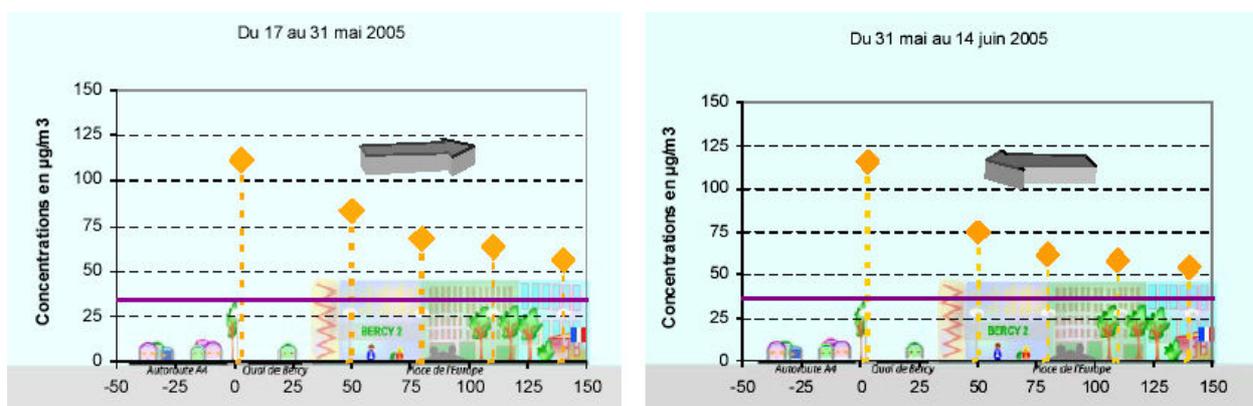


Figure 15 : Transects de NO₂ en milieu urbain dense (autoroute A4, Pl. H. d'Astier, quartier des jardins du cardinal Richelieu) [82]

Tableau 5 - Etude de transects sur la région Ile-de-France

Ouvrage	Type de voie	Période	Polluant	Niveaux de concentration observés	Distance à laquelle on retrouve le niveau de fond	Remarques sur la décroissance des concentrations
Echangeur de Bagnolet [84]	échangeur	Automne 2003	NO ₂	Elevés sur le périphérique (>80 µg/m ³) et de part et d'autre du périphérique (niveau de stabilisation >40 µg/m ³)	350-400 m	
Echangeur de Bagnolet [84]	échangeur	Automne 2003	Benzène	Elevés sur le périphérique (>4 µg/m ³) et pour trois des périodes, assez élevés de part et d'autre du périphérique (>1,8 µg/m ³)	250 -300 m	
Boulevard périphérique, (côté boulevard Davout, 20 ^e) [84]	périphérique	Automne 2003 (même campagne que ci-dessus)	NO ₂	Elevés sur le périphérique (>80 µg/m ³) et de part et d'autre du périphérique (niveau de stabilisation >40 µg/m ³)	75 m du côté dégagé	Même distance selon les périodes de mesure
Boulevard périphérique, (côté boulevard Davout, 20 ^e) [84]	périphérique	Automne 2003 (même campagne que ci-dessus)	Benzène	Elevés sur le périphérique (>4 µg/m ³) ; pour trois des périodes, assez élevés de part et d'autre du périphérique (>1,8 µg/m ³)	100 m du côté dégagé	Même distance selon les périodes de mesure
Boulevard périphérique (entre le 20 ^e et Bagnolet) [84]	périphérique	Automne 2003 (même campagne que ci-dessus)	NO ₂	Elevés sur le périphérique (>70 µg/m ³) et de part et d'autre du périphérique (niveau de stabilisation >40 µg/m ³)	50 à 150 m côté Bagnolet (<100m la plupart du temps) 50 m côté Paris 20e	Côté Bagnolet, la décroissance est plus ou moins rapide selon les périodes de mesure.
Boulevard périphérique (entre le 20 ^e et Bagnolet) [84]	périphérique	Automne 2003 (même campagne que ci-dessus)	Benzène	Elevés sur le périphérique (>4 µg/m ³) ; pour trois des périodes, assez élevés de part et d'autre du périphérique (>1,8 µg/m ³)	50 à 100 m côté Bagnolet 50 m côté Paris 20e	Côté Bagnolet, la décroissance est plus ou moins rapide selon les périodes de mesure.

Ouvrage	Type de voie	Période	Polluant	Niveaux de concentration observés	Distance à laquelle on retrouve le niveau de fond	Remarques sur la décroissance des concentrations
Francilienne [83]	autoroute	Automne 2005	NO ₂	Assez élevés en bordure d'axe (40 à 60 µg/m ³) ; niveau de stabilisation d'environ 35 à 40 µg/m ³	100 m	Décroissance rapide
Francilienne [83]	autoroute	Automne 2005	Benzène	Teneurs assez faibles (1 à 1,5 µg/m ³) ; profil quasi plat		
A10 [83]	autoroute	Automne 2005	NO ₂	Assez élevés en bordure d'axe (40 à 60 µg/m ³) ; niveau de stabilisation d'environ 35 à 40 µg/m ³	150 m	Décroissance rapide
A10 [83]	autoroute	Automne 2005	Benzène	Teneurs assez faibles (1 à 1,5 µg/m ³) ; profil quasi plat		Environnement urbain dégagé. Décroissance rapide.
A4 [82]	autoroute	Printemps 2005	NO ₂	Elevés en bordure d'axe (>100 µg/m ³) et quand on s'en éloigne (>40 µg/m ³ à 150 m)	> 150 m	Environnement urbain dense. Décroissance lente.
A4 [82]	autoroute	Printemps 2005	NO ₂	Elevés en bordure d'axe (>74 µg/m ³), et plus faibles quand on s'en éloigne 25 à 50 µg/m ³)	50 m	Environnement urbain dégagé

4.3.2.12 Etudes conduites par AIRAQ - 1 étude [86]

AIRAQ a conduit une assez vaste campagne de mesure au voisinage du tunnel du Somport, en automne 2002, avant l'ouverture de ce tunnel, et au printemps 2004, après sa mise en service. Cette étude n'avait pas pour objet de caractériser la qualité de l'air sur l'ensemble de la vallée de l'Aspe mais d'évaluer l'impact des modifications routières liées à l'ouverture du tunnel.

L'échantillonnage se compose de 55 sites d'échantillonnage passif disposés le long de la nationale RN134 et de 3 à 4 sites de mesure automatique à l'entrée du tunnel, à l'intérieur de celui-ci (en 2004), et dans deux communes proches.

Les résultats de mesure mettent en évidence, même si les teneurs restent inférieures aux valeurs limites annuelles, une augmentation des concentrations à l'entrée du tunnel et dans un village proche où le trafic s'est intensifié (Figure 16). Attention : il ne s'agit pas d'un transect mais de mesures le long de la route.

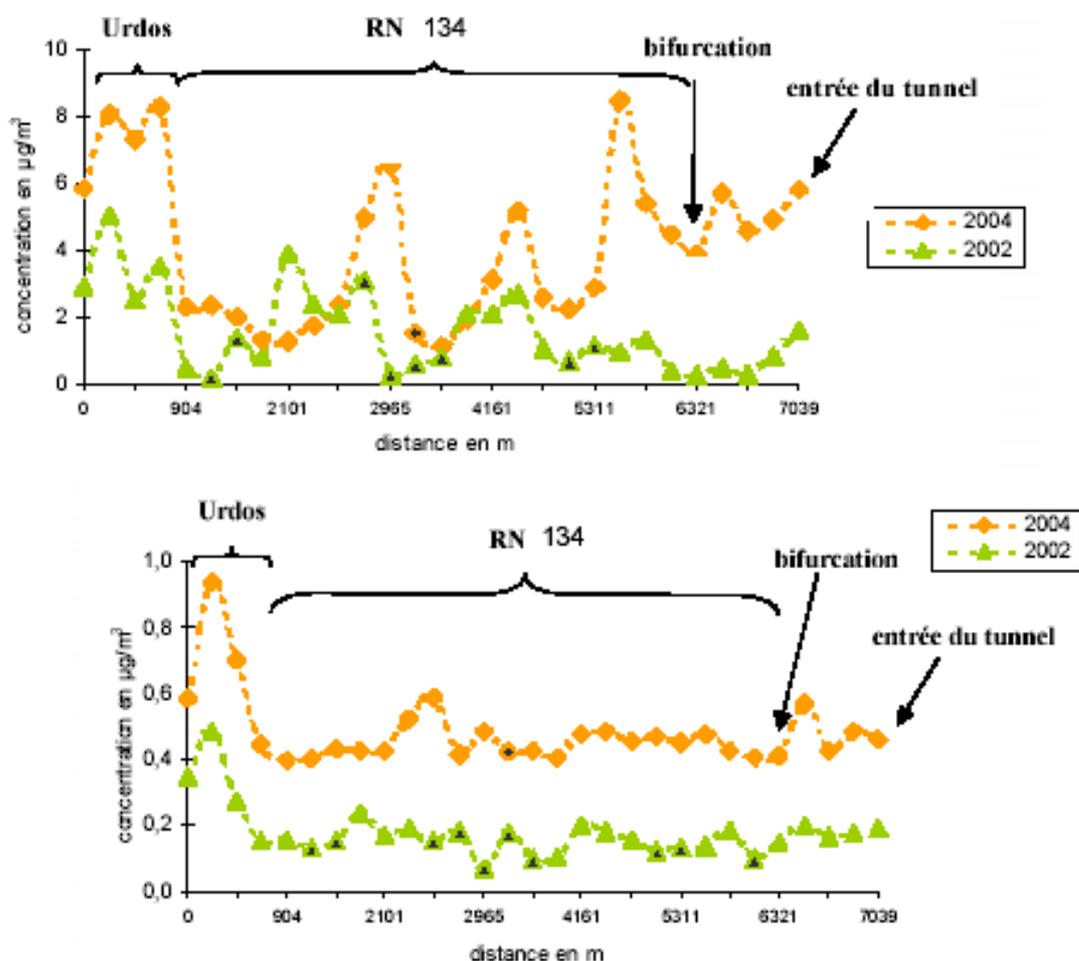


Figure 16 : Concentrations de benzène mesurées le long de la RN134, dans la commune d'Urdos et à l'entrée du tunnel avant (2002) et après (2004) sa mise en service [86].

4.4 Synthèse des études portant sur les villes de plus de 100 000 habitants

L'objectif de cette partie est d'offrir un état des lieux sur l'utilisation de l'échantillonnage passif pour évaluer la pollution dans les villes de plus de 100 000 habitants.

4.4.1 Caractéristiques générales des campagnes

Comme l'atteste la multiplicité des exemples, les AASQA possèdent une large expérience dans la réalisation de campagnes de mesure en milieu urbain. Un grand nombre de ces études donnent lieu à des cartographies par géostatistique.

Les stratégies d'échantillonnage mises en œuvre sont les suivantes :

- répartition homogène des points dans le domaine d'étude, selon un maillage à peu près régulier (ex : Toulouse, Angers, Dijon).
- répartition des points selon un maillage irrégulier, resserré dans certaines zones (généralement les zones de plus forte densité de population) et élargi dans d'autres (généralement les zones peu peuplées) (ex : Bordeaux, Metz). Trois à quatre tailles de maille, de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres, sont souvent considérées.
- échantillonnage réparti dans tous le domaine, plus dense au centre-ville, plus lâche en périphérie, et ne suivant pas nécessairement un maillage, (ex : Rouen).
- échantillonnage préférentiel : il ne s'agit alors pas de cartographier les concentrations sur toute l'agglomération mais d'évaluer les concentrations dans certaines parties de la ville avant et/ou après construction d'infrastructures (ex : Montpellier, études liées au tramway).

4.4.2 Résumés commentés des études

4.4.2.1 Amiens (ATMO-PICARDIE) - 1 étude [87]

La ville d'Amiens compte 136 000 habitants (INSEE 2005, population sans doubles comptes) et atteint 270 000 habitants en tenant compte de l'aire urbaine.

Les concentrations en **benzène** ont été mesurées lors de 2 campagnes de 15 jours en octobre 2005 et janvier 2006. La stratégie d'échantillonnage a consisté à positionner un tube par maille dans 121 mailles couvrant une zone d'environ 6 × 6 km. Le maillage est resserré en centre-ville (mailles de 250 m de côté) puis plus lâche vers la périphérie pour atteindre des mailles d'1 km de côté. Les 121 sites mesurent majoritairement des concentrations de fond, 18 seulement étant situés en proximité du trafic.

Les concentrations moyennes en benzène pour les 2 campagnes varient entre 1,10 et 2,35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les sites de fond. Le comportement spatial du polluant a été cartographié à l'aide d'un outil géostatistique en utilisant les sites de fond. La portée du phénomène est d'environ 2 km. Les concentrations les plus élevées correspondent à des zones urbaines où le trafic automobile est dense, à une zone de stockage de carburant (station-service) et à une source industrielle (hangar de motrices Diesel de la SNCF).

4.4.2.2 Angers (AIR-PL) - 1 étude [88]

La population concernée par l'étude est de 152 700 habitants (INSEE 2005, population sans doubles comptes).

Les concentrations en **NO₂** ont été mesurées au cours de 8 campagnes de 15 jours entre décembre 1995 et avril 1996. Un maillage régulier sur la zone d'environ 13 × 15 km, avec au moins 1 site par commune de l'agglomération, a été réalisé, pour un total de 30 sites de fond.

La concentration moyenne pour cette campagne est de 13 µg/m³, avec un minimum de 8 µg/m³ et un maximum de 21 µg/m³. Une étude géostatistique a été menée pour cartographier les concentrations de NO₂ sur la zone, en utilisant les émissions de NO_x comme variable auxiliaire, pour la campagne ayant eu lieu du 30 janvier au 14 février 1996. La portée du phénomène est d'environ 2,2 km.

4.4.2.3 Bordeaux (AIRAQ) - 2 études [89, 90, 91]

La zone d'étude comprend 32 communes totalisant 686556 habitants (INSEE 1999).

Deux études ont été réalisées : la première en 2001/2002 (mesure du benzène par échantillonnage passif pendant deux quinzaines de l'été 2001 et deux quinzaines de l'hiver 2002), la seconde en 2004/2005 (mesure du benzène et du NO₂ par échantillonnage passif pendant deux quinzaines de l'été 2004 et deux quinzaines de l'hiver 2005).

Dans les deux cas, l'échantillonnage comprend une majorité de sites de fond répartis selon un maillage irrégulier (environ 70 sites en 2001/2002 et 80 en 2004/2005). De forme carrée ou rectangulaire, les mailles ont été ajustées sur la densité de population : les mailles les plus fines, situées au centre de l'agglomération, sont larges de 500 m en 2001/2002 et de 250 m en 2004/2005. Les plus lâches, en périphérie, sont longues de 5 km. Cet échantillonnage de fond est complété par 26 sites de proximité automobile et quelques sites sous influence industrielle.

En 2001-2002, les concentrations de fond de benzène sont comprises entre 0,3 et 1,9 µg/m³ en été (moyenne de 0,6-0,7 µg/m³ selon la quinzaine), et entre 0,6 et 4,3 µg/m³ en hiver (moyenne de 1,6-1,8 µg/m³ selon la quinzaine).

En 2005, elles varient entre 0,2 et 1,5 µg/m³ en été (moyenne de 0,6 µg/m³) et entre 1,5 et 3,5 µg/m³ (moyenne de 2,4 µg/m³). Quant aux concentrations de fond de NO₂ mesurées en 2005, elles s'étendent de 5,7 à 31,6 µg/m³ en été (moyenne de 15,3 µg/m³) et de 10,7 à 48,4 µg/m³ en hiver (moyenne de 25,1 µg/m³).

Pour chaque saison et chaque composé mesuré, une étude géostatistique a été réalisée afin de cartographier la pollution de fond. En ce qui concerne le benzène, la portée du phénomène est d'environ 6-7 km en 2001-2002, et 7-8 km en 2005. Celle du NO₂ est deux fois plus grande.

4.4.2.4 Dijon (ATMOSF'AIR) - 1 étude [92]

Une campagne d'échantillonnage par tubes a été réalisée pendant l'hiver 2001 pour cartographier les BTX sur l'agglomération dijonnaise. L'échantillonnage se compose

de 60 sites répartis selon des mailles d'environ 1,2 km de côté. Le maillage est régulier et rectangulaire. Les concentrations de benzène varient entre 0,5 et 5,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour le Toluène les concentrations sont comprises entre 0,8 et 28,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et enfin pour le Xylène les concentrations sont comprises entre 0,6 et 292,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. L'étude a fait l'objet d'une analyse géostatistique sous Isatis. La concentration en benzène est relativement homogène sur tout le domaine alors que pour le toluène et le xylène un panache est très nettement visible sur le centre ville.

4.4.2.5 Metz (ATMOLOR) - 1 étude [93]

Metz compte 124 500 habitants (INSEE 2005, population sans doubles comptes) et presque 430 000 dans sa zone urbaine. L'étude a été réalisée sur l'ensemble de l'agglomération durant 11 jours en mars 2005.

Les concentrations en **NO₂** et **benzène** ont été suivies sur 80 et 71 sites, respectivement. Un découpage en 74 mailles a été effectué, leur surface étant comprise entre 300 m² en centre-ville et 2,4 km² en périphérie, suivant en cela la densité de population. Chaque maille a été équipée d'au moins un tube.

- *NO₂ mesuré par tubes passifs*

Les concentrations mesurées ont varié entre 12 et 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le trafic automobile est la principale source de NO₂ sur l'agglomération messine, avec des concentrations plus élevées en centre-ville.

- *Benzène mesuré par tubes passifs*

Les concentrations en benzène varient de 1,7 à 5,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Elles sont plus importantes en centre-ville, avec un maximum près de la gare.

Une exploitation des données par Analyse en Composantes Principales (ACP) et par krigeage a été réalisée.

4.4.2.6 Montpellier (AIR-LR) - 4 études [64, 66, 94, 95]

Plusieurs campagnes d'échantillonnage du NO₂ et du benzène ont été réalisées : en 1994 (6 quinzaines hiver et 6 quinzaines en été) en 2001 (4 quinzaines en hiver et 4 quinzaines en été), en 2002 (4 quinzaines en hiver et 4 quinzaines en été).

Elles comprennent une majorité de sites de fond ainsi que des points de proximité. Le nombre de sites de mesure, de 40 à 112 pour le NO₂, et leur répartition spatiale varient selon les années. Cette répartition ne couvre pas nécessairement la zone d'étude de façon homogène. Elle est en effet orientée par l'objectif des campagnes, qui n'est pas d'élaborer prioritairement une cartographie mais d'étudier l'évolution temporelle des concentrations (entre 1994 et 2001) et d'analyser la situation avant et après la mise en service du tramway. Le nombre de sites équipés pour la mesure du benzène est plus faible (13 à 43).

Les concentrations de fond de NO₂ sont comprises entre 9 et 37 µg/m³ durant les hivers 2001 et 2002 (pour une moyenne de respectivement 24 et 20 µg/m³) et entre 7 et 23 µg/m³ durant l'été 2001 (pour une moyenne de 18 µg/m³). Celles de benzène sont comprises entre 0,4 et 1,6 µg/m³ en été 2001 et 0,4 et 5,1 µg/m³ en hiver 2002.

4.4.2.7 Mulhouse (ASPA) - 1 étude [96]

La ville de Mulhouse compte 112 000 habitants (INSEE 1999) et environ 235 000 avec l'agglomération. La zone d'étude s'étend sur environ 232 km² englobant l'ensemble des communes concernées par le PDU et de l'unité urbaine de Mulhouse plus la commune de Zillisheim soit 20 communes.

Les concentrations en **benzène** et **dioxyde d'azote** ont été suivies sur 34 et 75 sites, respectivement, lors de 2 fois 3 campagnes de 15 jours durant les périodes hivernale (février-mars 2001) et estivale (mai-juin 2001). Les tubes ont été disposés en zones urbaines et rurales, avec au moins un tube par commune. Une station mobile a également été utilisée pour évaluer la variabilité temporelle des concentrations.

- *NO₂ mesuré par tubes passifs*

Pour la seule période hivernale, les concentrations moyennes de NO₂ pour l'ensemble des périodes de mesure (concentrations plus élevées) ont varié entre 17 et 45 µg/m³ avec une moyenne de 29 µg/m³. Les moyennes annuelles reconstituées sont comprises entre 12 et 40 µg/m³.

Les concentrations moyennes en NO₂ les plus fortes se situent dans les zones urbaines denses de la ville de Mulhouse et à Illzach. Dans les zones suburbaines, les niveaux de concentrations restent relativement élevés en particulier dans les communes situées au Nord et Nord Est de Mulhouse

- *Benzène mesuré par tubes passifs*

Comme pour le dioxyde d'azote, les niveaux rencontrés au cours de la phase estivale sont plus faibles que ceux mesurés durant la phase hivernale. Les moyennes annuelles reconstituées sont comprises entre 1 et 2 µg/m³.

Une étude géostatistique a été réalisée afin de cartographier les concentrations de NO₂. La portée de la structure sphérique utilisée dans l'ajustement du variogramme est de 5 km [97].

4.4.2.8 Reims (ATMO-CA) - 1 étude [98]

La population concernée par l'étude est de 187 154 habitants pour la ville même et 216 830 habitants pour l'agglomération (INSEE 1999). La densité de population est présentée par îlots sur la zone, avec une hétérogénéité assez forte. Les principales sources industrielles de NO₂ sont les deux verreries de Reims. Le trafic a été mesuré sur les principaux axes urbains.

Les concentrations en **NO₂** mesurées par tubes passifs ont été déterminées pour 89 sites au cours de 8 campagnes de 15 jours réparties sur l'hiver 2002-2003 et le

printemps-été 2003. La plupart des sites mesurent des concentrations de fond, mais quelques sites ont été disposés en proximité industrielle ou automobile. Pour le choix des sites, une zone d'environ 10 × 10 km, couvrant l'agglomération, a été quadrillée par un maillage comportant au moins un point de mesure par maille. Il est resserré en centre-ville puis plus lâche en périphérie, passant progressivement de mailles de 300 m de côté, à 600, puis 1200 et enfin 2400 m.

Les résultats sur les 4 campagnes hivernales ont varié en moyenne entre 20 et 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; ceux pour les 4 campagnes estivales entre 15 et 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Une étude géostatistique a été menée pour cartographier les concentrations de NO_2 sur la zone, en utilisant la densité de population comme variable auxiliaire. La portée du phénomène est d'environ 2 km.

4.4.2.9 Rouen (AIRNORMAND) - 1 étude [48]

La ville de Rouen compte 114 000 habitants (INSEE 2007, population sans doubles comptes) au cœur d'une agglomération de plus de 400 000 habitants. L'étude a porté sur une zone d'environ 10 × 11 km. Six campagnes de 15 jours ont été réalisées entre février et décembre 2005 pour mesurer les concentrations en **dioxyde d'azote**.

La moitié des 80 sites sélectionnés pour l'étude des concentrations urbaines de fond sont identiques à ceux utilisés dans une précédente campagne réalisée en 2000, et un bon quart en sont très proches. La zone d'étude a cependant été resserrée par rapport à l'étude précédente et les mesures en centre-ville ont été densifiées. Une étude d'évaluation des concentrations en situation de proximité automobile a été menée simultanément sur 40 sites de mesure [47].

En moyenne pour les 6 campagnes, les minimum et maximum de concentrations sont de 16,4 et 46,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement, avec une moyenne de 27,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les concentrations les plus élevées s'observent dans le centre de l'agglomération et décroissent avec l'éloignement.

Une étude géostatistique a été réalisée afin de cartographier les concentrations de NO_2 [99]. La portée de la structure sphérique utilisée dans l'ajustement du variogramme est de 5 km.

4.4.2.10 Toulon (ATMO-PACA) - plusieurs études [100]

La ville de Toulon compte 520000 habitants dont 160000 dans le centre-ville.

Entre 1997 et 2004, plusieurs campagnes de mesure par tubes à échantillonnage passif ont été réalisées dans différents quartiers de la ville. Les moyennes annuelles ont été reconstituées par ATMO PACA sur l'ensemble des points et transposées à l'année 2001. En complétant ces données par les moyennes relevées aux stations fixes, cette méthodologie a permis de constituer un jeu riche de 103 points de mesure du NO_2 (dont 80 sites de fond) et de 28 points de mesure du benzène (dont 10 de fond).

Les moyennes annuelles estimées de NO₂ (fond) sont comprises entre 10 et 40 µg/m³ environ.

4.4.2.11 *Toulouse (ORAMIP) - 1 étude [101]*

La ville de Toulouse compte plus de 440000 habitants, au cœur d'une agglomération d'environ 870000 habitants (INSEE, 1999).

Des campagnes de mesure des BTEX et du NO₂ ont été conduites durant 3 semaines de mai et 3 semaines de juillet en 1999 puis en 2001. 65 sites de fond quadrillant de façon assez régulière la ville de Toulouse et sa proche périphérie ont été équipés de tubes à échantillonnage passif.

En 1999, les teneurs mesurées de benzène sont comprises entre 2 et 5 µg/m³ en centre-ville, pour une moyenne sur le domaine de 2 µg/m³. Elles diminuent nettement en 2001, avec des concentrations en centre-ville de l'ordre de 1,8 µg/m³ et une moyenne sur le domaine de 1,1 µg/m³. Pour les 2 campagnes, les concentrations de dioxyde d'azote sont comprises entre 6 et 25 µg/m³, avec des niveaux plus élevés dans le centre et une moyenne voisine de 17 µg/m³.

De nouvelles mesures ont été réalisées en 2006 (rapport en cours de publication) dans un domaine légèrement élargi (Toulouse et sa périphérie, soit 1100 km² pour une population de 815000 habitants). L'échantillonnage inclut plus de 200 sites disposés selon des mailles de 1,25, 2,5 et 5 km de côté.

4.4.2.12 *Agglomération parisienne (AIRPARIF) - 1 étude [102]*

Les campagnes de mesure décrites ci-après font partie du projet LIFE-Resolution. Elles ont été conduites pendant une période d'un an (2001-2002), dans des domaines d'étude imbriqués :

- domaine centré sur la petite couronne (1100 km² pour 7,5 millions d'habitants)
- deux domaines plus restreints de 3 × 2 km² (cœur historique de Paris et zone de Neuilly-Courbevoie)
- bordures de grands axes

238 sites d'échantillonnage se répartissent dans le plus large domaine selon une maille de 2 km de côté. Dans les quartiers, la résolution du maillage est de 500 m (une vingtaine de points par quartier).

Les concentrations moyennes annuelles de NO₂ sont comprises entre 17 et 50 µg/m³ pour les 238 sites de fond. Elles tendent à augmenter au fur et à mesure qu'on s'approche du cœur de l'agglomération. La distribution spatiale des concentrations de benzène est plus hétérogène. Celles-ci varient entre 0,8 et 2,1 µg/m³.

Pour ces deux polluants, des valeurs plus élevées peuvent être atteintes à l'échelle du quartier.

Des cartographies par krigeage ont été établies sur l'agglomération.

4.4.2.13 Forbach/Saarbrücken (ATMOLOR/IMMESA) - 1 étude [103]

Bien que cette étude ne corresponde pas tout à fait aux critères retenus (Forbach : 22 800 habitants – INSEE 1999, Saarbrücken : 180 000 habitants ; mais l'agglomération transfrontalière dépasse les 700 000 habitants), il nous a paru intéressant de signaler une étude menée en mars et juillet 2002 sur l'agglomération Forbach/Saarbrücken dans le cadre d'une campagne transfrontalière avec la Sarre. La superficie des deux communes correspond environ à 184 km².

Les concentrations en **benzène** ont été mesurées au cours d'une campagne hivernale de 2 semaines (43 sites de fond, trafic routier et proximité industrielle) et d'une campagne estivale de 3 semaines (26 sites).

Les concentrations mesurées ont varié entre 1,0 et 6,1 µg/m³ en mars pour une concentration moyenne tous sites confondus de 2,4 µg/m³, et entre 0,6 et 6,2 µg/m³, avec une moyenne de 2,0 µg/m³ en période estivale. La pollution due au benzène est essentiellement liée au trafic routier, un seul secteur étant sous influence industrielle avec des concentrations dépassant l'objectif annuel de qualité. Les concentrations les plus élevées dans la zone urbaine ont été observées dans des rues où la configuration (rues canyons) et/ou la signalisation (provoquant des ralentissements) favorisent l'accumulation de ce polluant.

4.4.2.14 Orléans (LIG'AIR) - 1 étude [104]

Entre mars et avril 2004, 38 sites de proximité automobile ont été équipés de tubes passifs pour la mesure du dioxyde d'azote et de 9 sites pour la mesure du benzène. Les concentrations en NO₂ relevées fluctuent entre 23,7 µg/m³ et 71,8 µg/m³ sur l'ensemble de la campagne. Les concentrations en benzène sont comprises entre 1,4 et 4,5 µg/m³. Le maillage utilisé est relativement dense en hyper-centre avec quelques points sur les grands axes en périphérie.

4.4.2.15 Tours (LIG'AIR) - 1 étude [105]

Cette étude a été conduite dans le cadre du PPA de Tours. Entre mars et avril 2004, 41 sites de proximité automobile ont été équipés de tubes passifs pour la mesure du dioxyde d'azote et de 9 sites pour la mesure du benzène. Les concentrations en NO₂ relevées fluctuent entre 15,5 µg/m³ et 74,9 µg/m³ sur l'ensemble de la campagne. Les concentrations en benzène sont comprises entre 1,8 et 3,0 µg/m³. Le maillage utilisé est relativement dense en hyper-centre avec quelques points sur les grands axes en périphérie.

5 ANALYSE GEOSTATISTIQUE

Les principaux résultats de l'étude géostatistique sont fournis en annexe. Tous les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel Isatis (Géovariances).

Pour les divers jeux de données considérés, les tableaux 6 et 7 indiquent la portée des phénomènes telle qu'elle ressort de la présente étude ou de travaux antérieurs. S'agissant du benzène, la portée se situe le plus souvent autour de 4 ou 5 km. Font exception la zone de Roissy et l'agglomération parisienne dans lesquelles elle est bien plus grande, reflétant l'étendue du panache parisien.

Tableau 6 – Valeurs de la portée spatiale du benzène selon la typologie du site pour les études analysées

Typologie	Localisation	Saison	Portée variographique	Références
A (plate-forme)	Bordeaux	Printemps 2001 et 2003 automne 2004	1,5 km	[cette étude] et [2], [3], [4]
A (périphérie de l'aéroport)	Orly	hiver 2003	2 km et 5,4 km	[cette étude]
A (périphérie de l'aéroport)	Roissy - Le Bourget	hiver et été 2002	12,5 km	[cette étude]
I	Le Havre	hiver 2006	4 km	[cette étude]
I	Drocourt	été 2001 et 2002	2 km	[cette étude]
I	Le Lacq	printemps 2001	5,5 km	[cette étude]
I	Dunkerque	Hiver 2007 été 2007	5 km 5,5-6 km	[106]
V	Orléans	automne 2001	4,3 km	[18]
V	Bordeaux	2001-2002 2004	5-6 km et linéique	[cette étude]
V	Arrondissement de Lille	printemps 2003	4 km	[1]
V	Agglomération parisienne	2000-2001	15-20 km	[cette étude]

En ce qui concerne le dioxyde d'azote, les résultats sont plus variables. On distingue, selon les cas, une ou deux structures de plus ou moins grande portée. L'agglomération parisienne et l'agglomération lilloise se distinguent des autres villes.

Tableau 7 – Valeurs de la portée spatiale du NO₂ selon la typologie du site pour les études analysées

Typologie	Localisation	Saison	Portée variographique	Références
A (plateforme)	Bordeaux	printemps 2001 et 2003 automne 2004	800-1200 m et 2km-2,6km (2 structures)	[cette étude] et [2], [3], [4]
A (périphérie de l'aéroport)	Orly	hiver 2003	2,8 km et 6 km (2 structures)	[cette étude]
A (périphérie de l'aéroport)	Roissy - Le Bourget	hiver et été 2002	7,5km (hiver) 10 km (été)	[cette étude]
V	Lille Métropole	Hiver 2003-2004 Eté 2003	D1: 18 km D2: 10 km	[107]
V	Mulhouse	hiver et été 2001	5 km + structure linéaire	[97]
V	Reims	Hiver 2002-2003 Eté 2003	D1: 700 m et 4 km (2 structures) D2: 2,5 km et 5 km (2 structures) D1: 900 m et 2,8 km (2 structures) D2: 2,4 km et 5 km (2 structures)	[107]
V	Rouen	Année 2000 Année 2005	-5 km	[99] [108]
V	Bordeaux	2004-2005	-8 km ou 4 km et 10-12 km	[cette étude]
V	Agglomération parisienne	2000-2001	15-20 km	[cette étude]

A : aéroport ; I : industrie ; V : ville de plus de 100 000 habitants

Comme il est mentionné en introduction, des tests de sensibilité à l'échantillonnage ont été réalisés pour quelques jeux de données. Le principe était de diminuer le nombre de points de mesure selon un maillage d'échantillonnage plus lâche (un maillage kilométrique a été ici utilisé), et de comparer l'estimation obtenue (dite « dégradée ») à l'estimation de départ. Dans les cas étudiés, la première dégradation, qui revient à éliminer les resserrements locaux au profit d'une répartition plus régulière des points, n'a pas d'effet marqué (Tableau 8).

Tableau 8 – Tests de sensibilité de la cartographie à la densité d'échantillonnage

Typologie	Localisation	Polluant	Plan d'échantillonnage initial	Plan d'échantillonnage testé
A	Orly	NO ₂ Benzène	Echantillonnage radial: 119 sites de mesure disposés sur des cercles espacés d'abord de 500 m (jusqu'à 2km de l'aéroport), puis de 1 km.	1 point (au maximum ^a) par maille de 1 km x 1 km → 85 sites conservés ^b Ecart maximal à la cartographie initiale: 10%
A	Roissy - Le Bourget	NO ₂ Benzène	Echantillonnage radial: 196 points disposés sur des cercles espacés d'abord de 500 m (jusqu'à 2km de l'aéroport), puis de 1 km.	1 point (au maximum ^a) par maille de 1 km x 1 km → 130 sites conservés ^b Ecart maximal à la cartographie initiale: 16%

Typologie	Localisation	Polluant	Plan d'échantillonnage initial	Plan d'échantillonnage testé
V	Bordeaux	NO ₂ Benzène	Maillage fonction de la densité de population. Taille de la maille : de 250 m ou 500 m en centre-ville à 5 km en périphérie. 77 sites pour l'hiver 2005.	1 point (au maximum ^a) par maille de 1 km x 1 km ^c → 72 sites conservés Ecart maximal à la cartographie initiale: 14% (NO ₂); 8% (benzène)

^a Dans les zones où l'échantillonnage initial est peu dense, certaines mailles kilométriques ne contiennent pas de point.

^b On a vu qu'un aéroport ne pouvait être assimilé à une source de pollution clairement circonscrite, et que la qualité de l'air moyenne dans son environnement était plutôt influencée par le trafic routier et l'agglomération voisine. C'est pourquoi, en remplacement du maillage circulaire centré sur l'aéroport, on a testé un maillage rectangulaire couvrant la zone d'étude.

^c Ce test équivaut à élargir le maillage en centre-ville.

6 CONCLUSION

L'objet de cette étude était de compléter le « Guide de recommandations pour l'adaptation des plans d'échantillonnage spatial aux objectifs de campagne » [1] dont la version de 2006 s'applique à la surveillance du dioxyde d'azote, du benzène et de l'ozone dans les zones rurales peu couvertes par le réseau de mesure et les villes de 10 000 à 100 000 habitants.

La première partie de ce travail a consisté en un recensement le plus complet possible des études réalisées par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air dans quatre autres types de zones : aéroports, proximité routière,, industries, villes de plus de 100 000 habitants.

Malgré la diversité des situations rencontrées, cette analyse bibliographique met en exergue des caractéristiques de la pollution dont la connaissance peut être utile à la conception d'une stratégie d'échantillonnage :

- Ainsi, dans les zones aéroportuaires, le trafic engendré par l'activité de l'aéroport a un impact local sur les concentrations des tubes alors que les mouvements d'avions n'ont pas d'effet sensible à l'échelle de temps considérée (1 à 2 semaines). La qualité de l'air aéroportuaire est également influencée par l'agglomération voisine.
- La distance d'influence des routes dépend non seulement de l'intensité du trafic, des conditions météorologiques et du polluant émis mais aussi de l'urbanisation environnante. La décroissance des concentrations est généralement plus lente en milieu construit.

D'autre part, des pratiques d'échantillonnage efficaces ressortent des études consultées : couverture de zones complexes par des maillages ; échantillonnage radial autour de sources industrielles, transects.

Dans la seconde partie de l'étude, nous avons examiné les caractéristiques spatiales de jeux de données sélectionnés parmi les plus riches en points de mesure. Pour certains d'entre eux, une étude de sensibilité au maillage a été réalisée.

D'un endroit à un autre, les études variographiques des concentrations de NO₂ et de benzène montrent des différences dans la portée des phénomènes. Toutefois, pour une AASQA qui ferait le projet d'explorer une zone encore méconnue, elles fournissent des ordres de grandeur pour choisir l'espacement des points de mesure.

Les recommandations d'échantillonnage par type de zone ne figurent pas dans ce document mais ont été ajoutées à la nouvelle version du « Guide de recommandations pour l'adaptation des plans d'échantillonnage spatial aux objectifs de campagne ».

7 REFERENCES

- [1] A. Wroblewski, V. Riffault, E. Perdrix et L. Malherbe, « Adaptation des plans d'échantillonnage aux objectifs de campagne : Echantillonnage spatial – Guide de recommandations », Rapport LCSQA, 35 pages, décembre 2006. www.lcsqa.org
- [2] AIRAQ (B. Wastine, O. Pétrique), « Aéroport de Bordeaux Mérignac – 14 mai-15 juin 2001 », Rapport d'étude AIRAQ, 15 pages, 2001. www.airaq.asso.fr
- [3] AIRAQ (F. Peron, D. Declerck), « Aéroport de Bordeaux Mérignac – été 2003 », Rapport d'étude AIRAQ ET/MM/03/08, 105 pages, décembre 2003. www.airaq.asso.fr
- [4] AIRAQ (F. Peron), « Qualité de l'air sur l'aéroport de Bordeaux – 2004 ». Rapport d'étude AIRAQ ET/TP/05/04, 70 pages, juin 2005. www.airaq.asso.fr
- [5] AIRAQ (F. Peron), « Etude 2005 de la qualité de l'air sur l'aéroport de Bordeaux (33) », Rapport d'étude AIRAQ MM/06/06, 50 pages, avril 2006. www.airaq.asso.fr
- [6] AIR-LR, « Aéroport Montpellier-Méditerranée. Etude de ses impacts directs et indirects sur la qualité de l'air local – Année 2003 », Fiche de synthèse, 8 pages, 2003. www.air-lr.org
- [7] QUALITAIR, « Etude de la qualité de l'air sur l'aéroport "Nice-Côte d'Azur", bilan 2001-2004 », Rapport d'étude, 39 pages, 2004. www.atmopaca.org
- [8] AIRPARIF, « Etude de la qualité de l'air sur l'ensemble du secteur limitrophe des plates-formes aéroportuaires de Roissy-Charles de Gaulle et du Bourget. Bilan final des résultats », Rapport d'étude, 93 pages, 2003. www.airparif.asso.fr
- [9] AIRPARIF, « Etude de la qualité de l'air sur l'ensemble du secteur limitrophe de la plate-forme aéroportuaire d'Orly. Bilan final des résultats », Rapport d'étude, 84 pages, 2004. www.airparif.asso.fr
- [10] Services Techniques des Bases Aériennes, « Campagne de mesures de dioxyde d'azote (NO₂), Piste n° 4 de l'aéroport d'Orly — Aéroport de Lyon-Saint-Exupéry », Rapport d'étude, 12 pages, juillet 2002. www.stac.aviation-civile.gouv.fr
- [11] ASPA, « Caractérisation de la qualité de l'air dans la zone de l'aéroport Bâle-Mulhouse - Rapport relatif à la campagne de mesures qui s'est déroulée du 6 au 25 juillet 2005 », Rapport d'étude, 65 pages, 2006. www.atmo-alsace.net

- [12] ASPA, « Caractérisation de la qualité de l'air dans la zone de l'aéroport Bâle-Mulhouse - Rapport relatif à la campagne de mesures qui s'est déroulée du 8 au 22 février 2006 », Rapport d'étude, 64 pages, 2006. www.atmo-alsace.net
- [13] ASPA, « Caractérisation de la qualité de l'air dans la zone de l'aéroport de Strasbourg-Entzheim - Campagne de mesure estivale (28/06/00-16/07/00) - Campagne de mesure hivernale (12/01/01-01/02/01) », Rapport d'étude, 103 pages, 2001. www.atmo-alsace.net
- [14] ASPA, « Caractérisation de la qualité de l'air dans la zone de l'aéroport de Strasbourg-Entzheim - Rapport relatif à la campagne de mesure qui s'est déroulée du 27 août au 10 septembre 2002 », Rapport d'étude, 55 pages, 2003. www.atmo-alsace.net
- [15] ASPA, « Caractérisation de la qualité de l'air dans la zone de l'aéroport de Strasbourg-Entzheim - Rapport relatif à la campagne de mesure qui s'est déroulée du 18 février au 4 mars 2003 », Rapport d'étude, 63 pages, 2003. www.atmo-alsace.net
- [16] ASPA, « Caractérisation de la qualité de l'air dans la zone de l'aéroport de Strasbourg-Entzheim - Rapport relatif à la campagne de mesure qui s'est déroulée du 13 au 27 juillet 2004 », Rapport d'étude, 58 pages, 2004. www.atmo-alsace.net
- [17] ASPA, « Caractérisation de la qualité de l'air dans la zone de l'aéroport de Strasbourg-Entzheim - Rapport relatif à la campagne de mesure qui s'est déroulée du 27 avril au 22 juin 2005; du 22 septembre au 18 novembre 2005 », Rapport d'étude, 48 pages, 2006. www.atmo-alsace.net
- [18] ORA-GUYANE (N. Boulot), « Evaluation de la qualité de l'air sur la zone aéroportuaire de Rochambeau et sur la commune de Matoury (Guyane française) », Rapport de stage de Licence professionnelle Environnement / Qualité de l'air, Université de Metz, 38 pages, 2005-2006. www.ora-guyane.org
- [19] ASCOPARG, SUPAIRE, COPARLY, « Etude de la qualité de l'air aux abords de l'aéroport Lyon St Exupéry », Rapport d'étude, 152 pages, 2003. www.atmo-rhonealpes.org
- [20] V. Pernelet, « Etat de l'art des mesures de la qualité de l'air sur et autour des aéroports dans le monde », Rapport de stage de DESS, Université d'Orsay, 129 pages, 1997.
- [21] AIR-PL, « Evaluation des niveaux de benzène dans l'air dans l'environnement de la raffinerie Total France à Donges — campagnes de mesure hiver 2005 – été 2006 – hiver 2006/2007 », Rapport d'étude, 46 pages, 2006. www.airpl.org

- [22] ASPA, « Suivi des composés organiques volatils non méthaniques à proximité d'Alcan Packaging Sélestat - Rapport relatif à la campagne de mesure qui s'est déroulée du 5 au 19 octobre 2004 », Rapport d'étude ASPA 05011001-ID, 21 pages, 2005. www.atmo-alsace.net
- [23] ASPA, « Suivi des composés organiques volatils non méthaniques à proximité de la Société Alsacienne d'Aluminium - Rapport relatif à la campagne de mesure qui s'est déroulée du 13 au 27 avril 2004 », Rapport d'étude ASPA 04093001-ID, 19 pages, 2004. www.atmo-alsace.net
- [24] ASPA, « Diagnostic de la qualité de l'air à proximité de l'imprimerie Didier Quebecor - Campagne de mesure réalisée du 4 au 18 décembre 2003 », Rapport d'étude ASPA 04031201-ID, 19 pages, 2004. www.atmo-alsace.net
- [25] ASPA, « Diagnostic de la qualité de l'air à proximité de l'imprimerie Didier Quebecor - Rapport relatif à la campagne de mesure qui s'est déroulée du 01 au 15 décembre 2005 », Rapport d'étude ASPA 06030201-ID, 20 pages, 2006. www.atmo-alsace.net
- [26] ASPA, « Diagnostic de la qualité de l'air à proximité de l'imprimerie Didier Quebecor - Rapport relatif à la campagne de mesure qui s'est déroulée du 15 au 29 juin 2005 », Rapport d'étude ASPA 05081701-ID, 20 pages, 2005. www.atmo-alsace.net
- [27] ATMOSFAIR Bourgogne, « Impact des activités industrielles - ECOPREM – Premery », Rapport d'étude ATMOSFAIR Bourgogne, 32 pages, 2005. www.atmosfair-bourgogne.org
- [28] AMPASEL, « Etude de la Qualité de l'Air sur la commune de Veauche, Cartographie des rejets atmosphériques de la verrerie BSN GlassPack et validation du site industriel », Rapport d'étude AMPASEL, 42 pages, 2002. www.atmo-rhonealpes.org
- [29] ASCOPARG, « Amélioration de la connaissance de la qualité de l'air à proximité de l'usine d'Athanor », Rapport d'étude ASCOPARG, 65 pages, 2003. www.atmo-rhonealpes.org
- [30] ASPA, « Suivi des COVNM en proximité du site industriel PSA Peugeot-Citroën à Mulhouse - Rapport relatif à la campagne de mesure préliminaire qui s'est déroulée du 31 août au 14 septembre 2005 », Rapport d'étude ASPA 05122102-ID, 37 pages, 2005. www.atmo-alsace.net
- [31] ASPA, « Suivi des COVNM en proximité du site industriel PSA Peugeot-Citroën à Mulhouse - Rapport relatif aux campagnes de mesure qui se sont déroulées du 23 janvier au 20 février 2006 ; du 5 juillet au 20 septembre 2006 », Rapport d'étude ASPA 06112101-ID, 53 pages, 2006. www.atmo-alsace.net

- [32] AIRPARIF, « Surveillance des composés organiques volatils à proximité du centre de production de PSA Peugeot Citroën à Aulnay-sous-Bois (93) », Rapport final, 46 pages, 2006. www.airparif.asso.fr
- [33] AIRPARIF, « Surveillance des composés organiques volatils à proximité du centre de production de PSA Peugeot Citroën à Poissy (78) », Rapport final, 48 pages, 2004. www.airparif.asso.fr
- [34] AIRPARIF, « Surveillance des composés organiques volatils à proximité du centre de production de Renault Flins (78) », Rapport final, 49 pages, 2004. www.airparif.asso.fr
- [35] AREMARTOIS, « Campagne de mesures par tubes à diffusion passive du 21 juin au 12 juillet 2001 - Etude des teneurs en benzène sur le secteur de Drocourt », Rapport d'essai 5/2002/IC, 29 pages, 2002. www.atmo-npdc.fr
- [36] AREMARTOIS, « Campagne de mesures par tubes à diffusion passive du 13 juin au 11 juillet 2002 - Etude des teneurs en benzène sur le secteur de Drocourt », Rapport d'essai 1/2003/IC, 30 pages, 2003. www.atmo-npdc.fr
- [37] AREMARTOIS, « Campagne de mesures par tubes à diffusion passive du 03 au 17 février 2004, du 04 mai au 01 juin 2004, du 23 novembre au 21 décembre 2004 - Etude des teneurs en benzène sur le secteur de Drocourt », Rapport d'essai 10/2004/IC, 33 pages, 2005. www.atmo-npdc.fr
- [38] AIR NORMAND, « Mesure du benzène dans l'environnement de la zone industrielle du Havre », Rapport d'étude AIR NORMAND E 05_15_06, 31 pages, 2006. www.airnormand.asso.fr
- [39] ATMO-CA, « Etude de la qualité de l'air autour des principales usines de la zone industrielle de Saint-Dizier », Rapport d'études St-D 01-10-11-02-CL-GB/EC/KS, 119 pages, date non précisée. www.atmo-ca.asso.fr
- [40] AIRAQ, « Cartographie de la qualité de l'air sur le bassin de Lacq (64) », Rapport d'étude, 46 pages, 2007. www.airaq.asso.fr
- [41] ATMO AUVERGNE, « Campagne de mesure du benzène, du toluène, de l'éthylbenzène et des xylènes dans l'agglomération de Montluçon à proximité de stations-service », Rapport d'étude Atmo Auvergne, 27 pages, 2005. <http://www.atmoauvergne.asso.fr/>
- [42] S. Séguret, « Estimation du dioxyde d'azote routier dans la vallée de la Thur », Rapport N-1/03/G, 61 pages, février 2003. www.lcsqa.org
- [43] Ecole des Mines de Douai (F. Mathé), « PREDIT3 – Groupe de travail n°7 – Surveillance et suivi des pollutions atmosphériques en proximité des voies de circulation », Rapport final PREDIT, 106 pages, octobre 2005.

- [44] ASPA, « Estimation de la qualité de l'air en proximité des routes nationales et des autoroutes en Alsace - comparaison avec les axes de transit des vallées vosgiennes », Rapport d'étude ASPA 01101601-ID, 35 pages, octobre 2001. www.atmo-alsace.net
- [45] Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer, « Note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières », Guide technique, 52 pages, février 2005.
- [46] Le Loc'h G., de Fouquet C., 2006. « PREDIT3 – Groupe de travail n°7 – Surveillance et suivi des pollutions atmosphériques en proximité des voies de circulation », Etude des campagnes des CETE, Travaux d'ARMINES-EMP, 43 pages, juin 2006.
- [47] AIR NORMAND, « Agglomération rouennaise - Mesure de NO₂ et de benzène sur 40 sites de proximité automobile dans le cadre du PDU de Rouen - Résultats 2005 - évolution par rapport à 2002 », Rapport d'étude AIR NORMAND n°E 01_05_06, 20 pages, 2006. www.airnormand.asso.fr
- [48] AIR NORMAND, « Mesures de NO₂ sur l'agglomération rouennaise - Sites urbains de fond - Année 2005 », Rapport d'étude AIR NORMAND n°E 05_02_06, 17 pages, 2006. www.airnormand.asso.fr
- [49] AIRLOR, « Campagne de mesure de la qualité de l'air autour de la RN66 de Rupt/Moselle au col de Bussang - Mai 2005 », Rapport d'étude AIRLOR 05/06/0041, 74 pages, 2006. www.atmolor.org
- [50] ASPA, « Rapport relatif à l'évaluation de la qualité de l'air le long de la RN83 entre Sélestat et Colmar - Rapport relatif aux campagnes de mesure qui se sont déroulées du 7 février au 4 avril 2006 ; du 13 juin au 8 août 2006 », Rapport d'étude ASPA 06101002-ID, 71 pages, 2006. www.atmo-alsace.net
- [51] ASPA, « Diagnostic de la qualité de l'air en proximité de l'autoroute A36 - Deuxième phase de la campagne de mesure réalisée entre le 23 mai et le 4 juillet 2001 - Rapport final », Rapport d'étude ASPA 01121801-ID, 75 pages, décembre 2001. www.atmo-alsace.net
- [52] ATMOSFAIR Bourgogne, « Déviation de Savigny-le-Sec et d'Épagny (21) - Etude Avant Projet Sommaire - Volet Qualité », 19 pages, 2004. www.atmosfair-bourgogne.org
- [53] ATMO AUVERGNE (L. Rosset), « Mise à 2 x 2 voies de la Route Centre Europe Atlantique sur les sections 3 et 4 du contournement de Montluçon – État initial de la qualité de l'air », Rapport d'étude LR/01/1105, 20 pages, novembre 2005. www.atmoauvergne.asso.fr

- [54] ATMO AUVERGNE (L. Rosset), « Mise à 2 x 2 voies de la Route Centre Europe Atlantique sur les sections 3 et 4 du contournement de Montluçon : État initial de la qualité de l'air - Mesures complémentaires (26 janvier - 23 février 2006) », Rapport d'étude LR/01/0406, 28 pages, mai 2006. www.atmoauvergne.asso.fr
- [55] AMPASEL, « Etat initial de la qualité de l'air pour la seconde ligne de transport en commun en site propre à Saint-Etienne », Rapport d'étude AMPASEL E-03.09/2, 56 pages, août 2003. www.atmo-rhonealpes.org
- [56] AMPASEL, « Etat initial de la qualité de l'air du Boulevard Urbain de Saint-Etienne, secteur de Châteaueux, Rapport d'étude AMPASEL E-03.09/2, 43 pages, septembre 2003. www.atmo-rhonealpes.org
- [57] AIR-LR, « Futur contournement ouest de Montpellier : Etat initial de la qualité de l'air », Fiche de synthèse, 3 pages, 28 août 2002. www.air-lr.org
- [58] AIR-LR, « Future déviation est de Montpellier : Etat initial des principaux traceurs de la pollution liée au trafic routier », Fiche de synthèse, 3 pages, 18 novembre 2002. www.air-lr.org
- [59] AIR-LR, « Etat initial de la qualité de l'air avant le dédoublement de l'autoroute A9, de la déviation est et du contournement ouest de Montpellier », Fiche de synthèse, 5 pages, 15 février 2005. www.air-lr.org
- [60] AIR-LR, « Etat des lieux de la qualité de l'air autour de l'A9 avant son doublement (en collaboration avec la DDE 34) », Fiche de synthèse, 3 pages, 14 décembre 2000. www.air-lr.org
- [61] AIR-LR, « Etat initial de la qualité de l'air avant la réalisation d'une déviation de la RN113 à Lunel et Lunel-Viel », Fiche de synthèse, 10 pages, 25 janvier 2007. www.air-lr.org
- [62] AIR-LR, « Futur boulevard urbain sud de Perpignan : Etat initial des principaux traceurs de la pollution liée au trafic routier », Fiche de synthèse, 2 pages, 5 décembre 2002. www.air-lr.org
- [63] AIR-LR, « Futur boulevard urbain "Castelnau-Le Crès" : Etat initial des principaux traceurs de la pollution liée au trafic routier », Fiche de synthèse, 2 pages, 6 janvier 2003. www.air-lr.org
- [64] AIR-LR, « Future ligne 2 de tramway de l'agglomération de Montpellier : Etat initial des principaux traceurs de la pollution liée au trafic routier », Fiche de synthèse, 5 pages, 29 janvier 2003. www.air-lr.org
- [65] AIR-LR, « Etat des lieux de la qualité de l'air autour du futur tramway du district de Montpellier », Fiche de synthèse, 2 pages, 15 octobre 2001. www.air-lr.org

- [66] AIR-LR, « Tramway ligne 1 : Evaluation de l'impact sur la qualité de l'air », Fiche de synthèse, 2 pages, 4 février 2002. www.air-lr.org
- [67] AIRMARAIX, « Piolenc-Mornas : Qualité de l'air autour de l'A7 du 26 octobre au 27 décembre 2004 », Rapport d'étude, 15 pages, avril 2005. www.atmopaca.org
- [68] AIRMARAIX, « Evaluation de la qualité de l'air dans le secteur de la gare routière à Aix en Provence - Campagne de mesure du 28 décembre 2005 au 22 février 2006 », Rapport d'étude, 47 pages, 28 juillet 2006. www.atmopaca.org
- [69] AIRMARAIX, « Evaluation de la qualité de l'air sur le projet de rocade L2-est : Etat zéro », Rapport d'étude, 36 pages, mars 2002. www.atmopaca.org
- [70] AIRMARAIX, « Etat initial de la qualité de l'air : Axe Littoral sens nord-sud - Campagne de mesures du 14 novembre 2002 au 2 mars 2003 », Rapport d'étude PGR/LP02, 43 pages, novembre 2003. www.atmopaca.org
- [71] AIRMARAIX, « Etat de la qualité de l'air autour du projet du boulevard urbain sud à Marseille », Rapport d'étude PR/DR-LP12, 52 pages, novembre 2004. www.atmopaca.org
- [72] AIRMARAIX, « Etat zéro de la qualité de l'air avant la mise en service du Tunnel Jonction A50-A57 à Toulon », Rapport d'étude, 51 pages, juillet 2002. www.atmopaca.org
- [73] AIRMARAIX, « Evolution de la qualité de l'air après la mise en service du Tunnel Jonction A50-A57 à Toulon », Rapport d'étude, 40 pages, janvier 2004. www.atmopaca.org
- [74] ORAMIP, « Campagne de mesure de la qualité de l'air aux abords de la RN126 Castres-Soual », Fiche de synthèse, 7 pages, date non précisée. www.oramip.org
- [75] ORAMIP, « Etat initial de la qualité de l'air aux abords de l'itinéraire à très grand gabarit », Fiche de synthèse, 3 pages, date non précisée. www.oramip.org
- [76] ORAMIP, « Etude de l'impact de l'élargissement de la RD902 entre Blagnac et Beauzelle sur la qualité de l'air de la zone », Fiche de synthèse, 5 pages, date non précisée. www.oramip.org
- [77] ORAMIP, « Etude d'impact de l'élargissement de la gare de péage de Montauban sur la qualité de l'air de la zone », Fiche de synthèse, 5 pages, date non précisée. www.oramip.org

- [78] ORAMIP, « Etude de l'impact de la liaison Quercy-Rouergue sur la qualité de l'air de la zone », Fiche de synthèse, 4 pages, date non précisée. www.oramip.org
- [79] ORAMIP, « Campagne de mesure de la qualité de l'air aux abords de la RN112 Labruguière-Saint-Alby », Fiche de synthèse, 6 pages, 2005. www.oramip.org
- [80] AIRPARIF, « Etat initial de la qualité de l'air à proximité de l'A86 à Vélizy-Villacoublay (78) », Rapport d'étude, 40 pages, décembre 2004. www.airparif.asso.fr
- [81] AIRPARIF, « Caractérisation de la qualité de l'air en bordure de voirie au centre-ville de la commune de Montreuil (93) », Rapport d'étude, 27 pages, juin 2007. www.airparif.asso.fr
- [82] AIRPARIF, « Caractérisation de la qualité de l'air à proximité de l'autoroute A4 sur la commune de Charenton-le-Pont (94) », Rapport d'étude, 43 pages, août 2005. www.airparif.asso.fr
- [83] AIRPARIF, « Etude de la qualité de l'air au voisinage des grands axes routiers essonniers », Rapport d'étude, 99 pages, mai 2006. www.airparif.asso.fr
- [84] AIRPARIF, « Caractérisation de la qualité de l'air au voisinage d'un échangeur autoroutier urbain. L'échangeur entre le boulevard périphérique et l'autoroute A3 au niveau de la Porte de Bagnolet », Rapport d'étude, 83 pages, décembre 2004. www.airparif.asso.fr
- [85] AIRPARIF, « Campagnes de mesure de la qualité de l'air en sites trafic parisiens à forte fréquentation piétonne », Rapport d'étude, 12 pages, décembre 2006. www.airparif.asso.fr
- [86] AIRAQ (R. Bunales, F. Campagne, F. Peron), « Campagnes de mesures sur la qualité de l'air aux alentours du Somport, avant et après ouverture du tunnel (64) », Rapport d'étude AIRAQ ET/MM/04/05, 107 pages, 15 novembre 2004. www.airaq.asso.fr
- [87] ATMO PICARDIE, « Amiens Métropole - Campagne de mesure du benzène dans l'air ambiant par échantillonnage passif », Rapport d'essai 2004/20/R, 63 pages, 2006. www.atmo-picardie.com
- [88] AIR-PL, « Etude géostatistique des données de pollution en dioxyde d'azote sur l'agglomération d'Angers », 32 pages, Rapport d'études, 2001. www.airpl.org
- [89] AIRAQ (Convert C., Zircher S.), « Unité urbaine de Bordeaux. Campagne de mesure par échantillonnage passif », Rapport d'études ET/CA/02/03, 53 pages, 2002. www.airaq.asso.fr

- [90] AIRAQ (Bunales R., Deffois A.), « Cartographie de l'agglomération de Bordeaux - 2004/2005. Tome 1 », Rapport d'études ET/TP/05/05, 64 pages, 2005. www.airaq.asso.fr
- [91] AIRAQ (Bunales R.), « Cartographie de l'agglomération de Bordeaux - 2004/2005. Tome 2 », Rapport d'études ET/TP/05/05, 54 pages, 2005. www.airaq.asso.fr
- [92] ATMOSFAIR Bourgogne, « Cartographie des BTEX sur l'agglomération dijonnaise », Rapport d'études, 35 pages, 2001. www.atmosfair-bourgogne.asso.fr
- [93] J. Kino, « Etude de la répartition spatiale du dioxyde d'azote, du benzène et du formaldéhyde par tubes passifs sur l'agglomération messine », Rapport de stage de 3ème année IUP Génie de l'Environnement, Université de Metz, 94 pages, 2004-2005. www.atmolor.org
- [94] AIR-LR, « Répartition de la pollution par le dioxyde d'azote à Montpellier. Hiver 93/94 - Eté 94 », Résumé, 2001. www.air-lr.asso.fr
- [95] AIR-LR, « Evaluation des teneurs en NO₂ entre 1994 et 2001 à Montpellier ». Résumé, 2003. www.air-lr.asso.fr
- [96] ASPA, « Diagnostic de la qualité de l'air sur l'agglomération de Mulhouse - Répartition spatiale de la pollution atmosphérique - Rapport final », Rapport d'étude ASPA 02031901-ID, 32 pages, 2002. www.atmo-alsace.net
- [97] C. de Fouquet, D. Gallois, G. Perron, « Geostatistical characterization of the nitrogen dioxide concentration in an urban area. Part I: Spatial variability and cartography of the annual concentration. Part II: Time component of the estimation error », Atmospheric Environment, 41 (32), 6691-6714, 2007.
- [98] ATMO-CA, « Etude de la répartition spatiale du dioxyde d'azote sur l'agglomération rémoise à l'aide de tubes à diffusion passive », Rapport d'études Rs 03-03-TD-ED/EC, 40 pages, date non précisée. www.atmo-ca.asso.fr
- [99] A. Cori, « Utilisation de données environnementales pour la cartographie du NO₂ en agglomération rouennaise », Rapport ENSMP - AIR NORMAND, 60 pages, 2005.
- [100] AIRMARAIX (Mary L., Armengaud A., Fayet S., Channac-Mongredien Y., Robin D.), « Cartographies de la pollution à Toulon : approches géostatistique et déterministe », Rapport d'étude AirProche, 97 pages, 2006. www.airmaraix.org
- [101] ORAMIP, « Évolution des teneurs en benzène, toluène, xylènes et dioxyde d'azote dans l'air ambiant à Toulouse et en proche périphérie entre 1999 et 2001 », Synthèse d'études, 2001. www.oramip.org

- [102] AIRPARIF, « Le projet européen LIFE Resolution. Bilan final des résultats obtenus en Ile-de-France », Rapport d'études, 77 pages, 2003. www.airparif.asso.fr
- [103] ESPOL/IMMESA, « Etude transfrontalière - Campagne de mesures Benzène, Toluène - Zone urbaine de Forbach entre mars et juillet 2002 », Rapport d'étude ESPOL/IMMESA, 28 pages, 2004. www.atmolor.org
- [104] LIG'AIR, « Plan de protection de l'atmosphère : Orléans – Etat des lieux et projection 2010 – Dioxyde d'azote et benzène – Rapport final », Rapport d'études, 41 pages, septembre 2004. www.ligair.fr
- [105] LIG'AIR, « Plan de protection de l'atmosphère : Tours – Etat des lieux et projection 2010 – Dioxyde d'azote et benzène – Rapport final », Rapport d'études, 43 pages, septembre 2004. www.ligair.fr
- [106] J. Roukos, H. Plaisance, N. Locoge, V. Riffault, « Caractérisation des composés organiques volatils oxygénés dans une zone urbaine multi-influencée : développements de méthodes chromatographiques et de capteurs et campagnes de mesure », Journées Interdisciplinaires de la Qualité de l'Air, Villeneuve-d'Ascq, 7-8 février 2008.
- [107] E. Perdrix, G. Cárdenas, « Méthode de surveillance des concentrations de NO₂ : cartographie à partir des stations fixes et prise en compte de la proximité », Rapport LCSQA, 144 pages, 2006. www.lcsqa.org
- [108] G. Cárdenas, Malherbe L., « Représentativité des stations de mesure du réseau national de surveillance de la qualité de l'air. Application des méthodes géostatistiques à l'évaluation de la représentativité spatiale des stations NO₂ et O₃ ». Rapport LCSQA, 2007. www.lcsqa.org

8 ANNEXES

- Annexe 1 Etude de la répartition des concentrations de NO₂ et de benzène sur la zone aéroportuaire de Bordeaux-Mérignac
- Annexe 2 Etude de la répartition des concentrations de NO₂ et de benzène en périphérie de la zone aéroportuaire de Paris-Orly
- Annexe 3 Etude de la répartition des concentrations de NO₂ et de benzène en périphérie de la zone aéroportuaire de Paris-Roissy
- Annexe 4 Etude de la répartition des concentrations de benzène sur la zone industrielle de Drocourt
- Annexe 5 Etude de la répartition des concentrations de benzène sur la zone industrielle du Havre
- Annexe 6 Etude de la répartition des concentrations de benzène sur la zone industrielle du Lacq
- Annexe 7 Etude de la répartition des concentrations de NO₂ et de benzène sur l'agglomération bordelaise
- Annexe 8 Etude de la répartition des concentrations de NO₂ et de benzène sur l'agglomération parisienne
- Annexe 9 Recensement des études réalisées par échantillonnage passif au sein des AASQA

ANNEXE 1 : Aéroport de Bordeaux

NO₂

Benzène

Trois campagnes de mesure par tubes à échantillonnage passif ont été conduites par AIRAQ :

- du 14 mai au 15 juin 2001 (NO₂)
- du 22 mai au 19 juin 2003 (NO₂ et benzène)
- du 23 novembre 2004 au 6 janvier 2005 (NO₂ et benzène)

Le même plan d'échantillonnage a été reproduit d'une année à l'autre. Il s'agit d'un échantillonnage préférentiel composé de 47 sites dont **33 sites dans l'enceinte de l'aéroport**, en particulier le long des pistes, **6 sites de fond** et **8 sites de proximité automobile**.

Remarques générales

L'exploitation de ces données met en évidence des difficultés liées à l'échantillonnage et à la nature des sources de pollution :

- De plus fortes concentrations apparaissent ponctuellement, notamment à l'entrée de l'aéroport, sur les parkings, en certains sites de proximité automobile, éventuellement près de sources spécifiques (ex : hangar à peinture). Certaines de ces valeurs peuvent être entourées de plus faibles teneurs, d'autres sont isolées dans l'espace.
- L'échantillonnage est orienté et ne couvre pas de façon homogène la zone d'étude.

De la première remarque découle la question suivante : quelles données faut-il utiliser dans l'analyse géostatistique ? En particulier, les sites de proximité doivent-ils être ou non éliminés ? Dans l'étude réalisée par AIRAQ, tous les sites ont été conservés. Ce choix peut être justifié par le fait que les voies d'accès et les zones de stationnement font partie intégrante de la zone aéroportuaire. Les ignorer conduit à une perte significative d'information. Ce choix est maintenu dans la présente étude. Pour chaque campagne et chaque polluant, seuls un ou deux points qui perturbent visiblement la structure du variogramme sont retirés du calcul de ce dernier. Les variogrammes ainsi obtenus indiquent, pour chaque polluant, des caractéristiques structurales qui se retrouvent d'une année sur l'autre.

La couverture hétérogène du domaine d'étude a comme conséquence une précision moindre dans certaines zones (écart-type de krigeage plus élevé) et éventuellement, un poids exagéré de certains points isolés.

ETUDE PAR POLLUANT ET PAR ANNEE

DIOXYDE D'AZOTE

Caractéristiques du variogramme

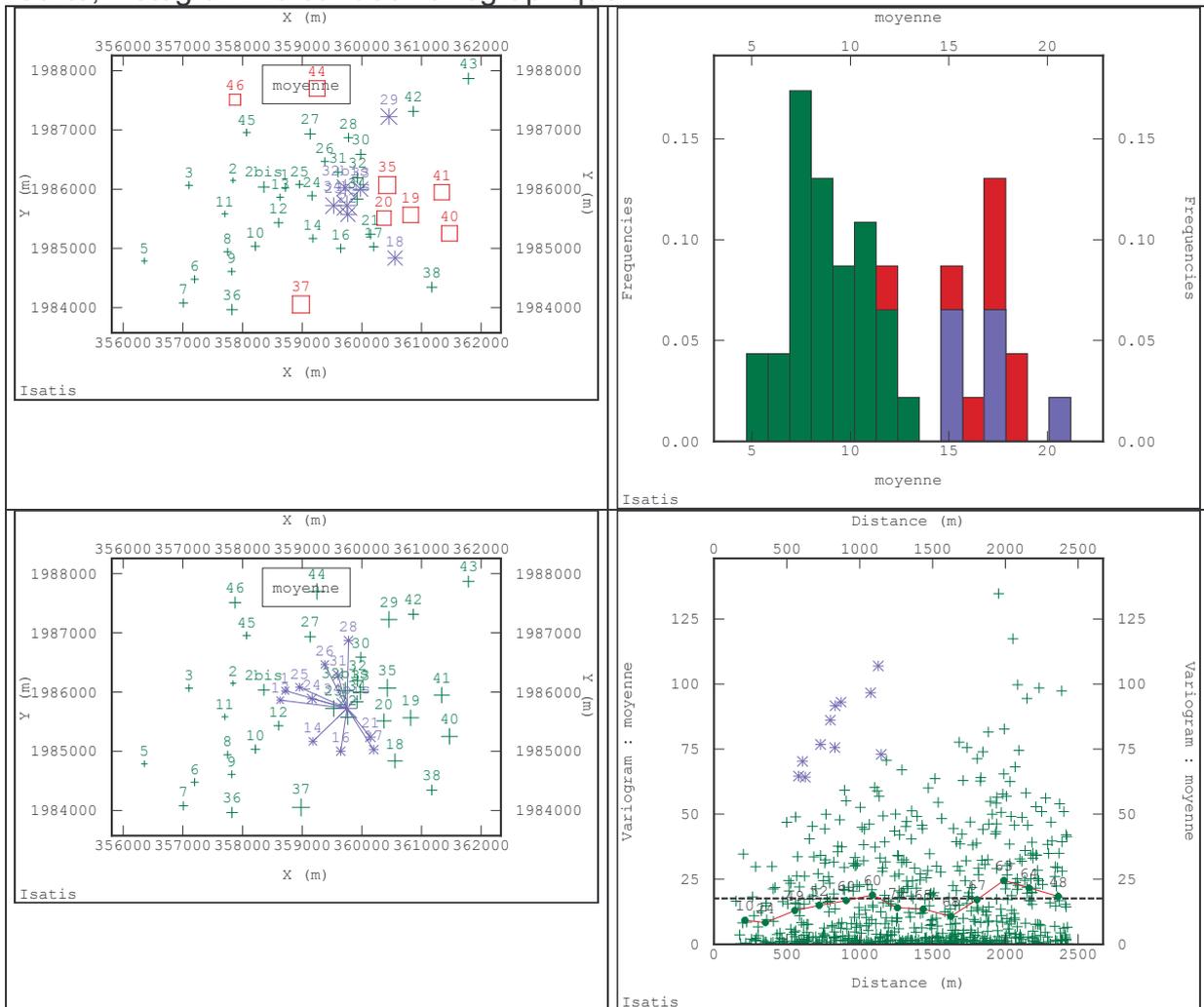
Effet de pépité

Première structure sphérique de portée comprise entre 800 et 1200 m

Seconde structure sphérique de portée comprise entre 2000 et 2600 m

2001

Carte, histogramme et nuée variographique

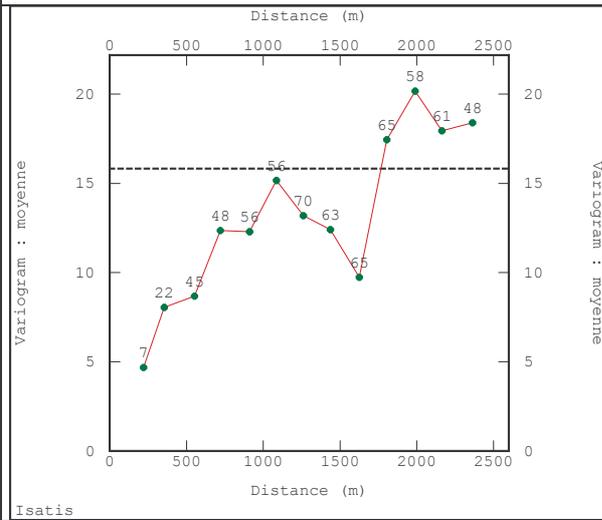


Points éliminés du calcul du variogramme : site n° 34 bis (zone de stationnement temporaire)

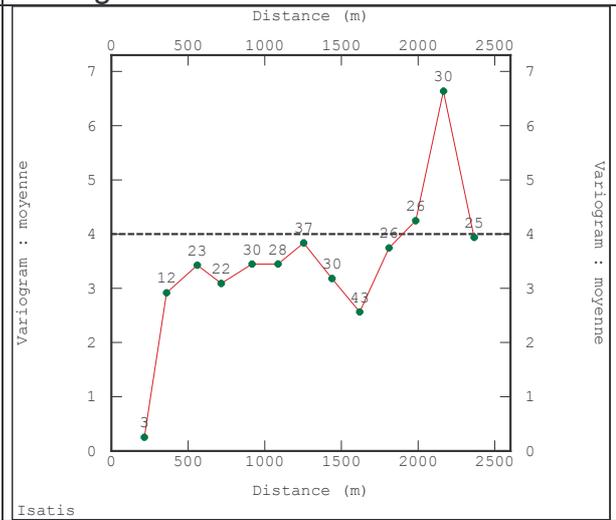
Variogramme expérimental

Deux populations de données ressortent de l'histogramme. Le variogramme perd en structure lorsqu'on retire de son calcul la seconde population. Pour cette raison et à cause du nombre de données disponibles, les deux populations ne sont pas distinguées par la suite, bien que ce choix soit discutable.

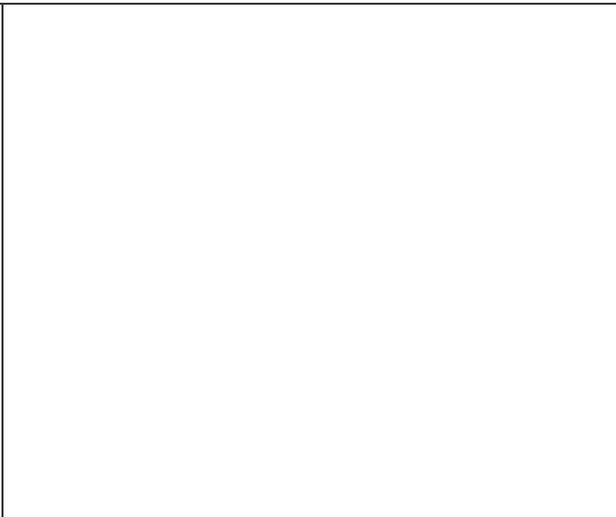
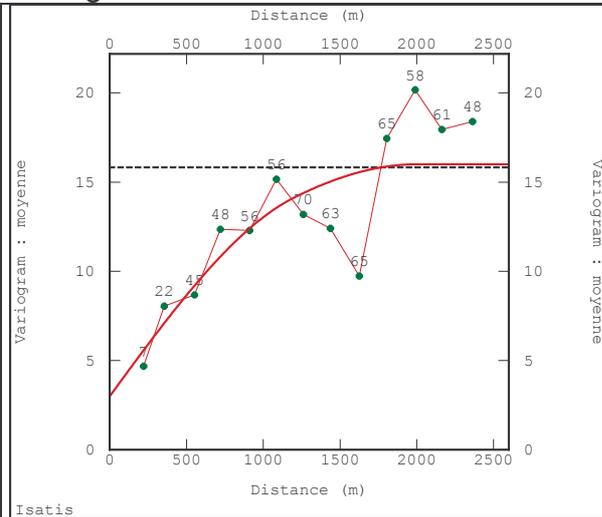
sans le point 34 bis

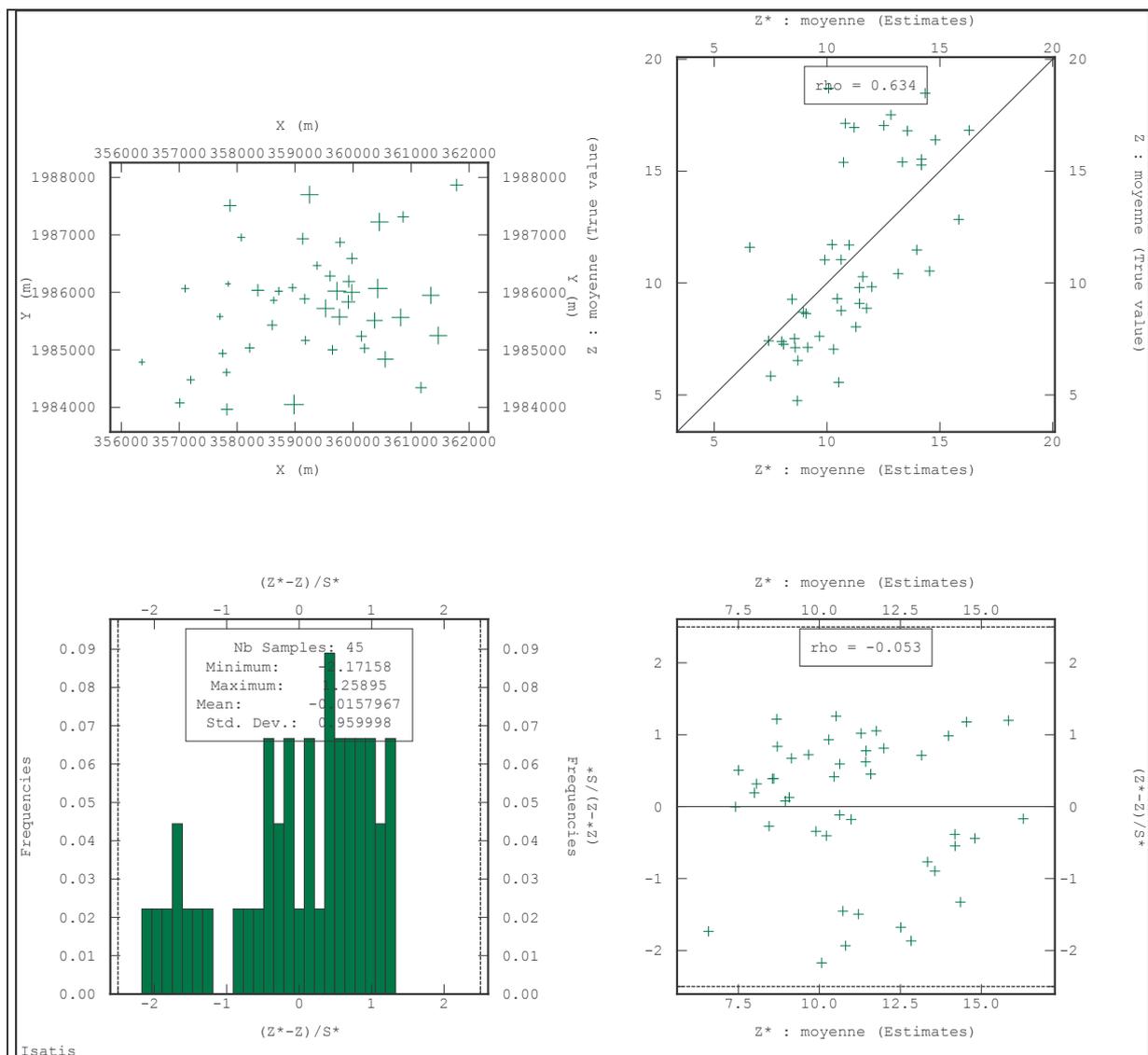


sans la 2^{nde} population à droite de l'histogramme



Variogramme modélisé et validation croisée





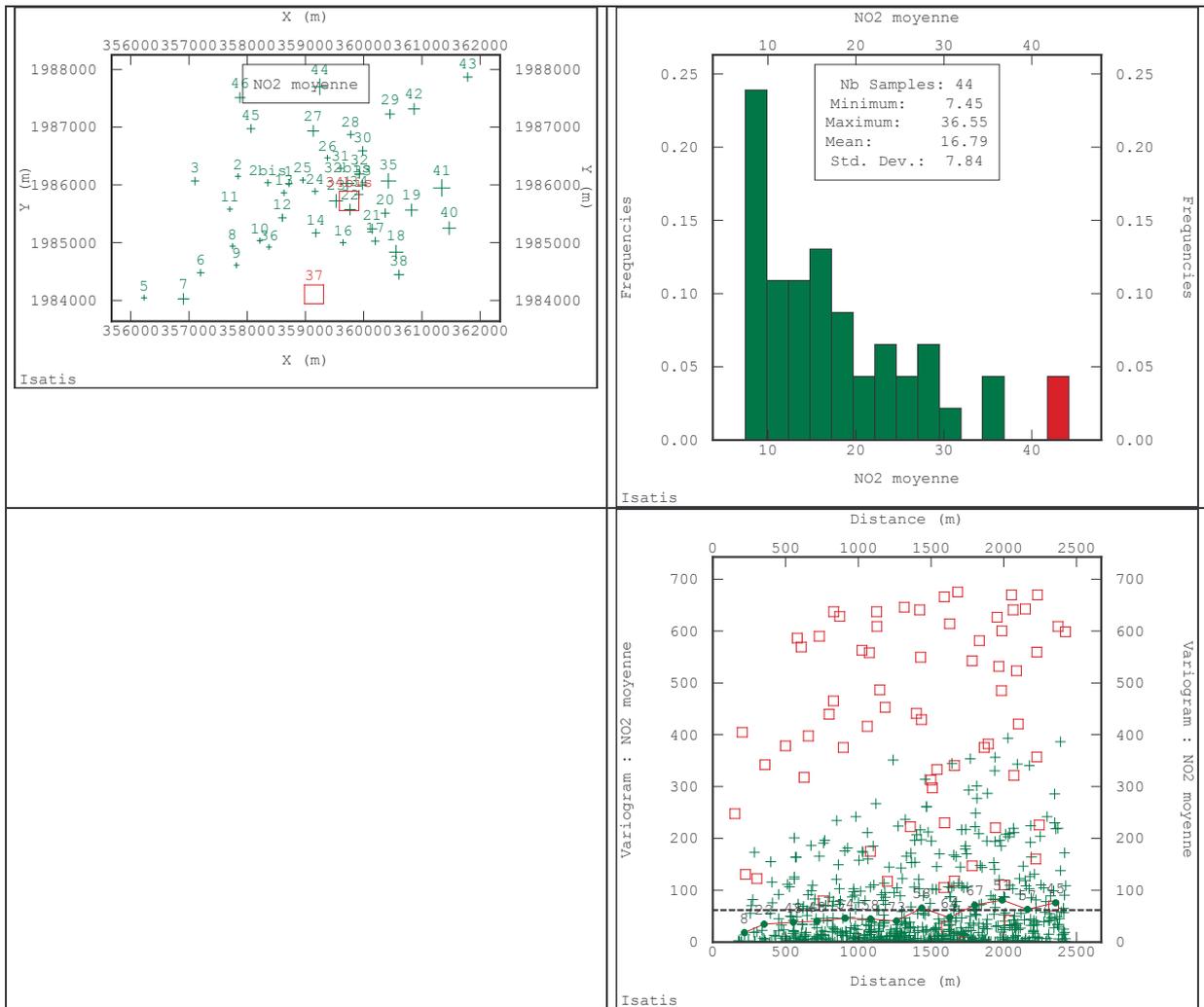
Les résultats ne sont pas notablement modifiés si le point 34 bis est réintroduit en entrée du krigeage. Mais ce point de valeur maximale est logiquement sous-estimé. Dans les deux cas, le nuage de corrélation entre valeurs mesurées et estimées est assez dispersé.

Résultats numériques de la validation croisée (sans 34 bis)

	Moyenne	Variance
Erreur [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-0.104	9.48
Erreur standardisée	-0.016	0.92
Erreur relative [%]	23,6	330,5 (é.-type :18,2)

2003

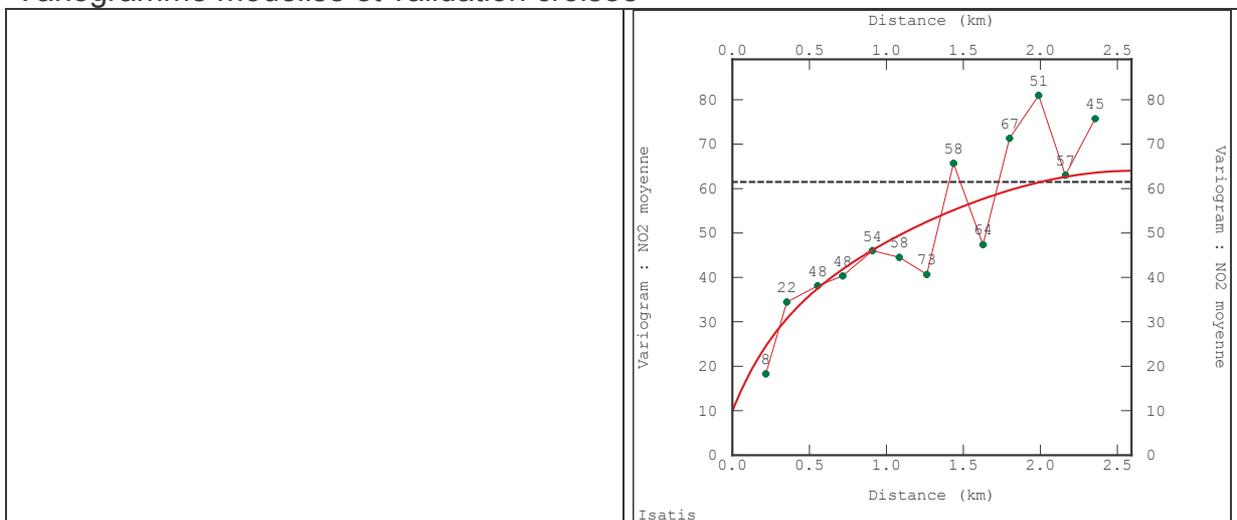
Carte, histogramme et nuée variographique

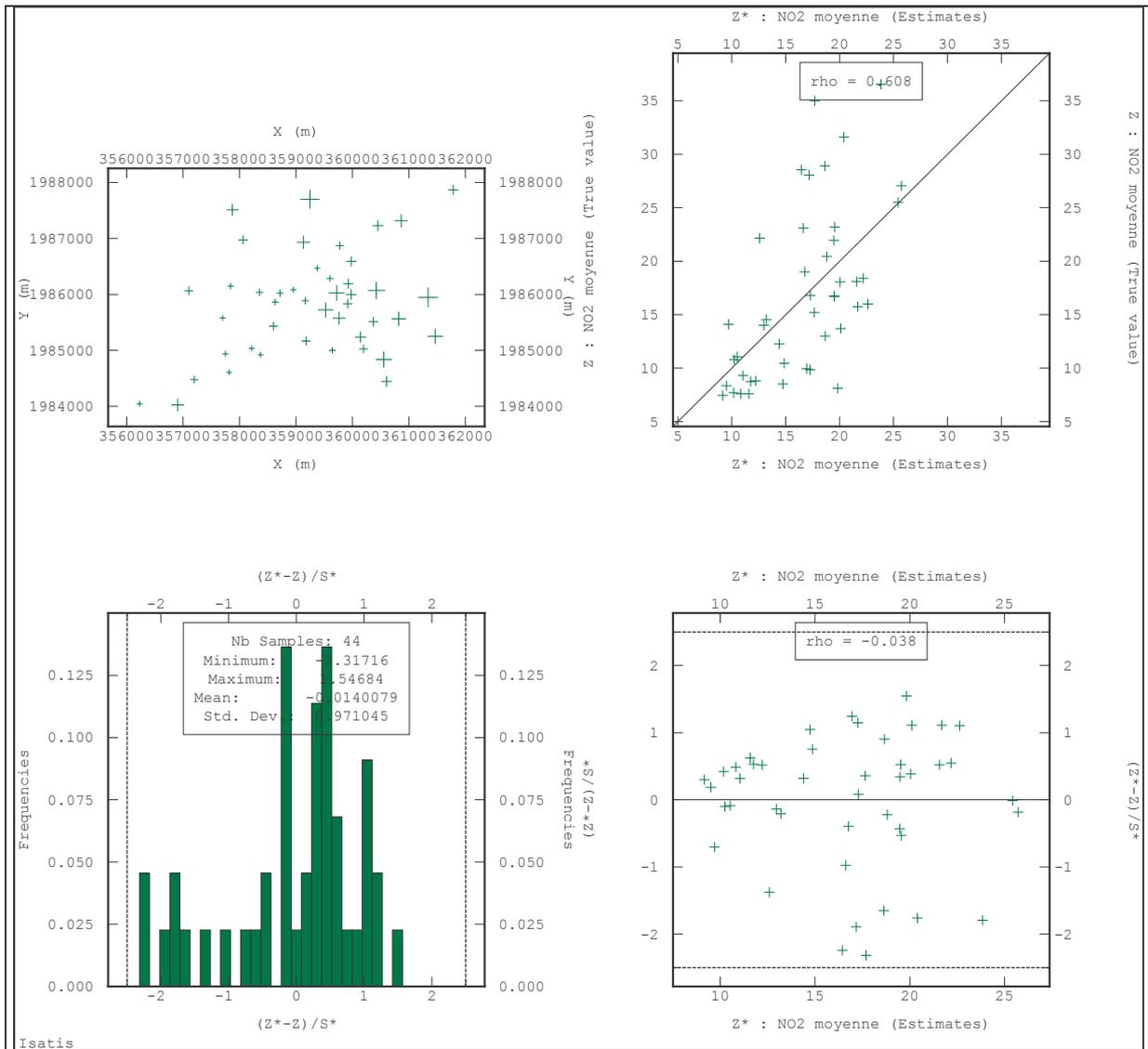


L'histogramme diffère de celui de 2001, bien que les campagnes de mesure aient été conduites à la même période, et présente des valeurs mesurées sensiblement plus élevées.

Points éliminés du calcul du variogramme : site n° 34 bis (zone de stationnement temporaire) et site n°37 (arrêt de bus)

Variogramme modélisé et validation croisée





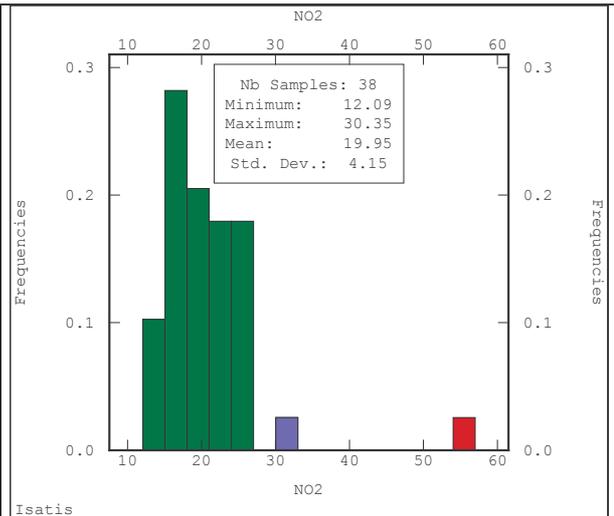
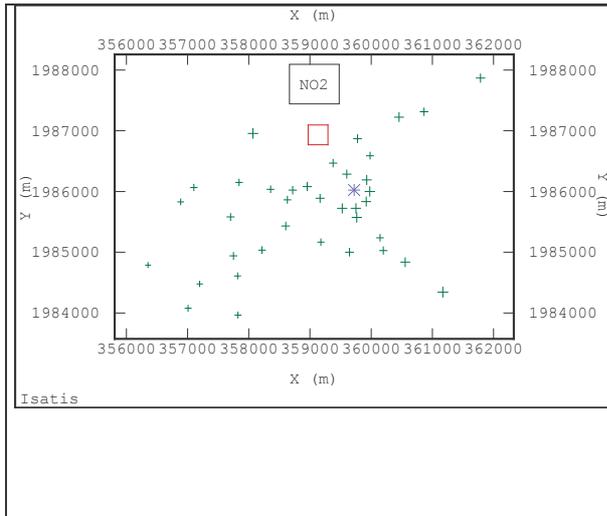
Les résultats ne sont pas notablement modifiés si les point 34 bis et 37 sont réintroduits en entrée du krigeage. Dans ce cas, ces deux points de valeur maximale sont logiquement sous-estimés. Là encore, le nuage de corrélation entre valeurs mesurées et estimées se révèle dispersé.

Résultats numériques de la validation croisée (sans 34 bis, sans 37)

	Moyenne	Variance
Erreur [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-0.178	38.9
Erreur standardisée	-0.014	0.94
Erreur relative [%]	31,1	650,3 (é-type :25,5)

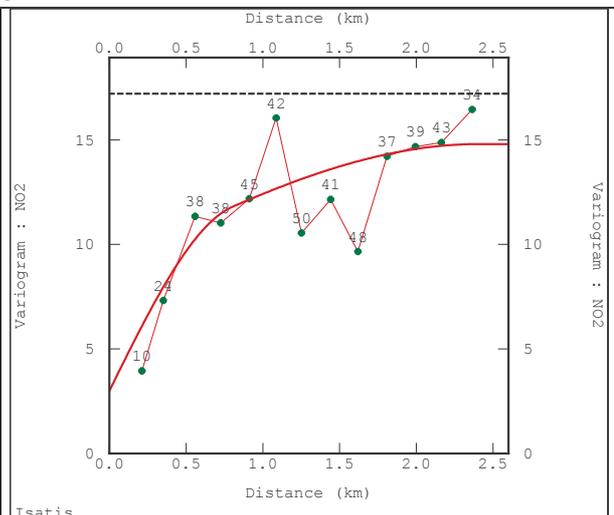
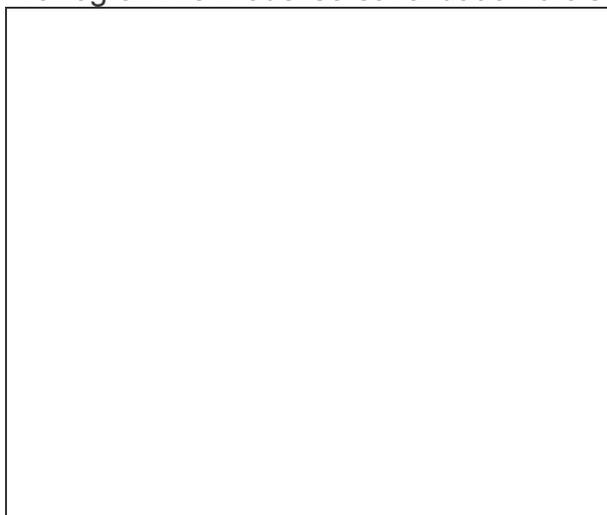
2004

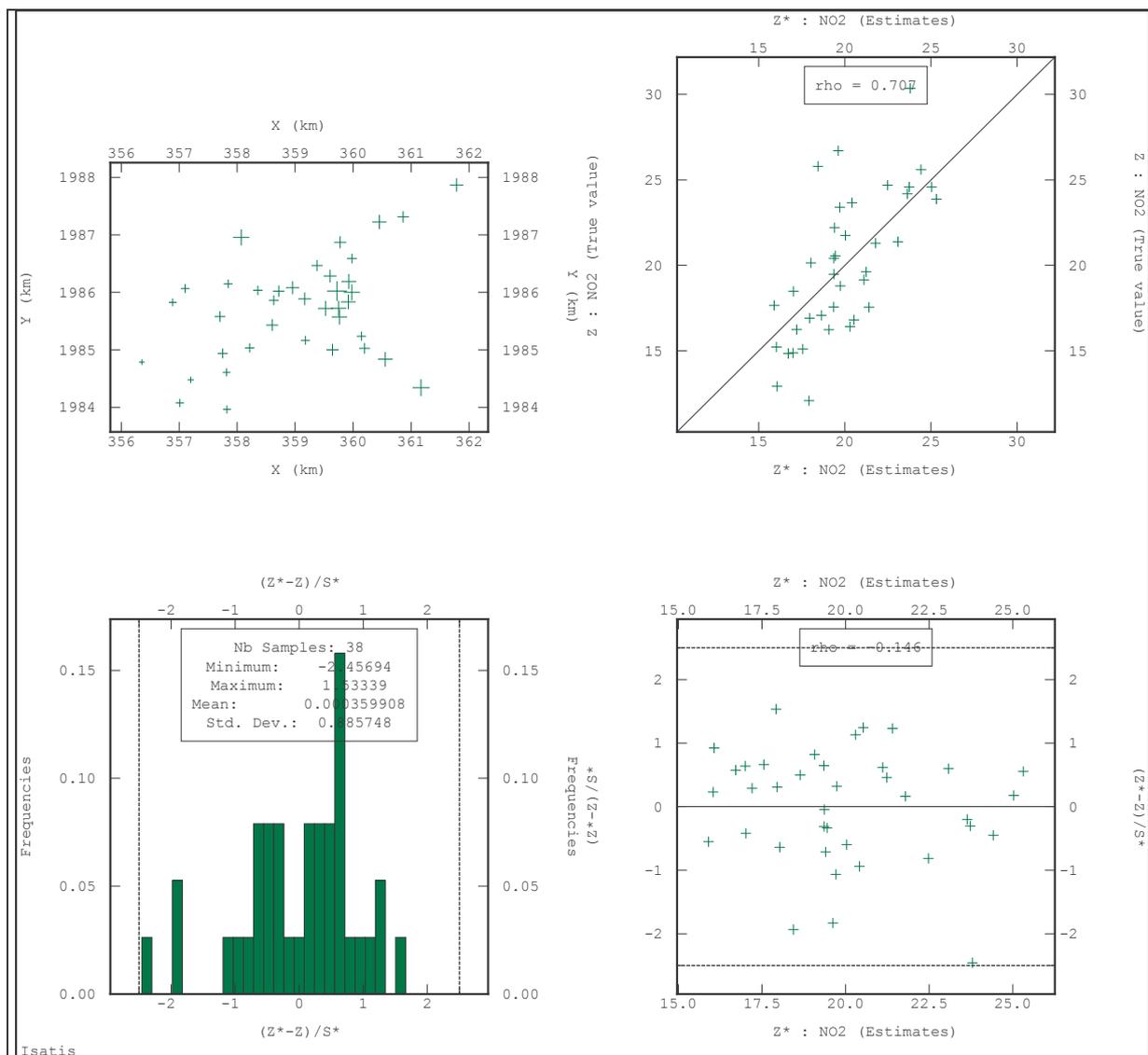
Carte, histogramme et nuée variographique



Points éliminés du calcul du variogramme : site n° 27 (hangar à peinture)

Variogramme modélisé et validation croisée



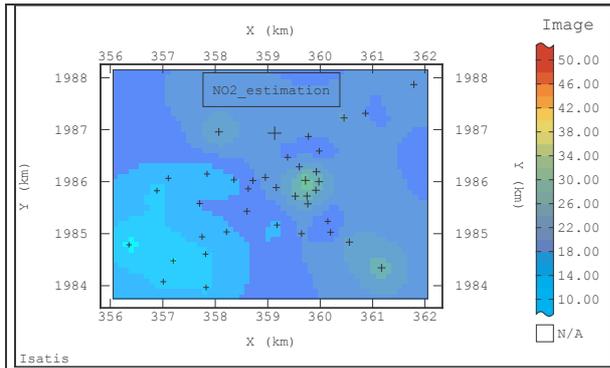


Les estimations par validation croisée sont plus précises que pour les deux années précédentes (le point 27 n'a pas été pris en compte).

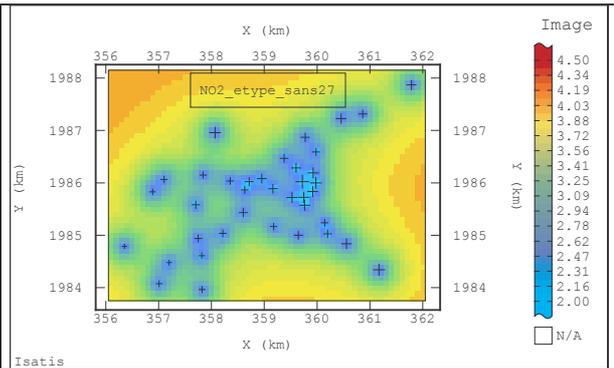
Résultats numériques de la validation croisée (sans 27)

	Moyenne	Variance
Erreur	-0.011	8.74
Erreur standardisée	-0.0004	0.79
Erreur relative	12,2	89,1 (é.-type = 9,4)

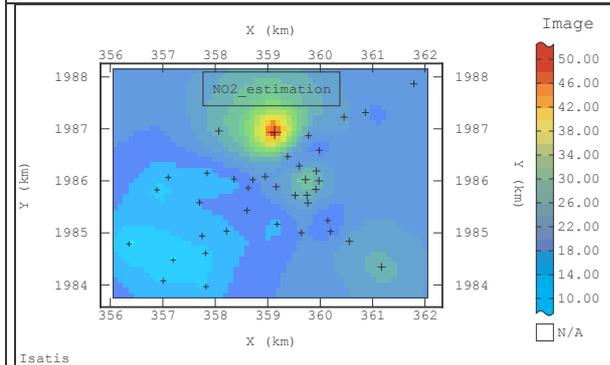
Les cartes d'estimation ci-après montrent le poids que prend localement le point 27 lorsqu'il est réintroduit dans le krigeage. L'échantillonnage ne permet pas de dire si la tache de concentration autour de ce site est ou non réaliste.



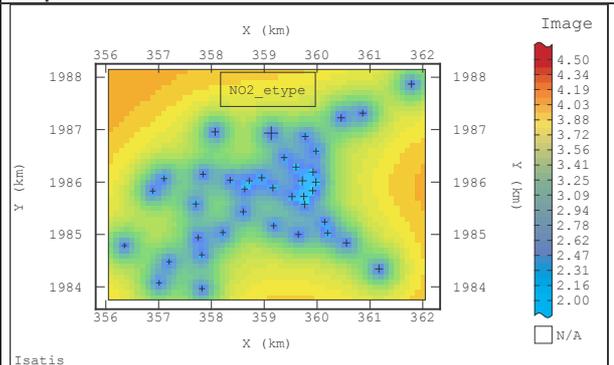
Estimation sans le point 27



Ecart-type de l'erreur de krigeage. Sans le point 27.



Estimation avec le point 27



Ecart-type de l'erreur de krigeage. Avec le point 27.

BENZENE

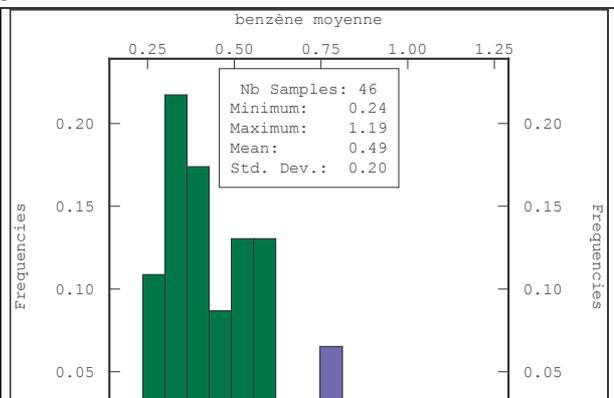
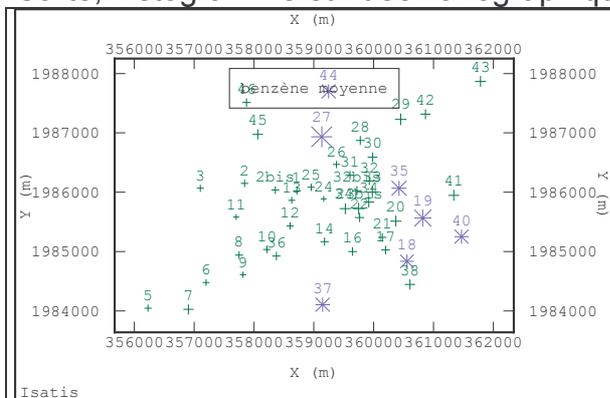
Caractéristiques du variogramme

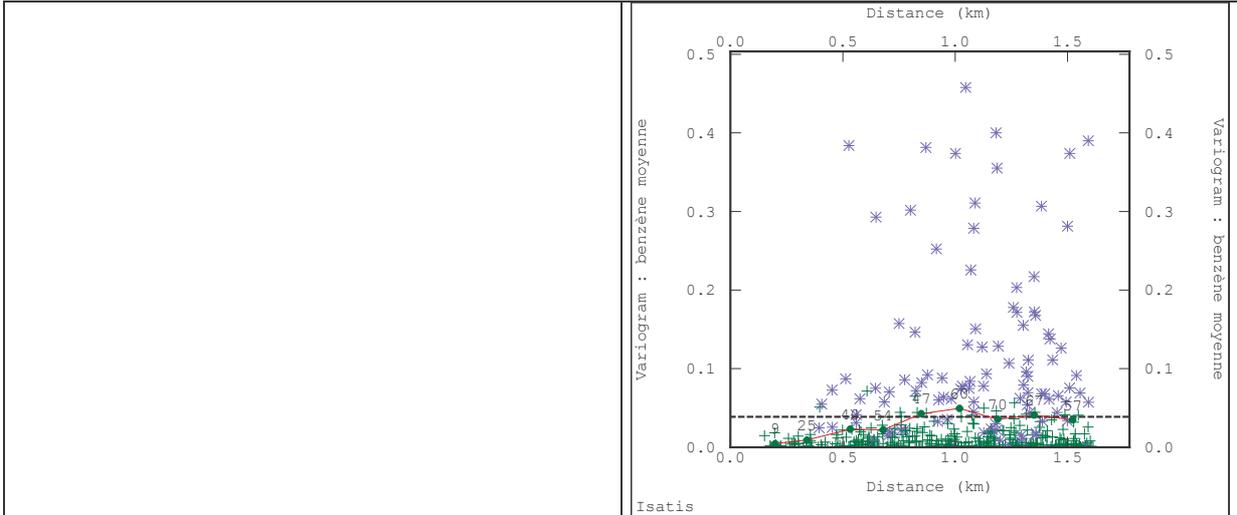
Effet de pépite.

Structure sphérique de portée voisine de 1500 m

2003

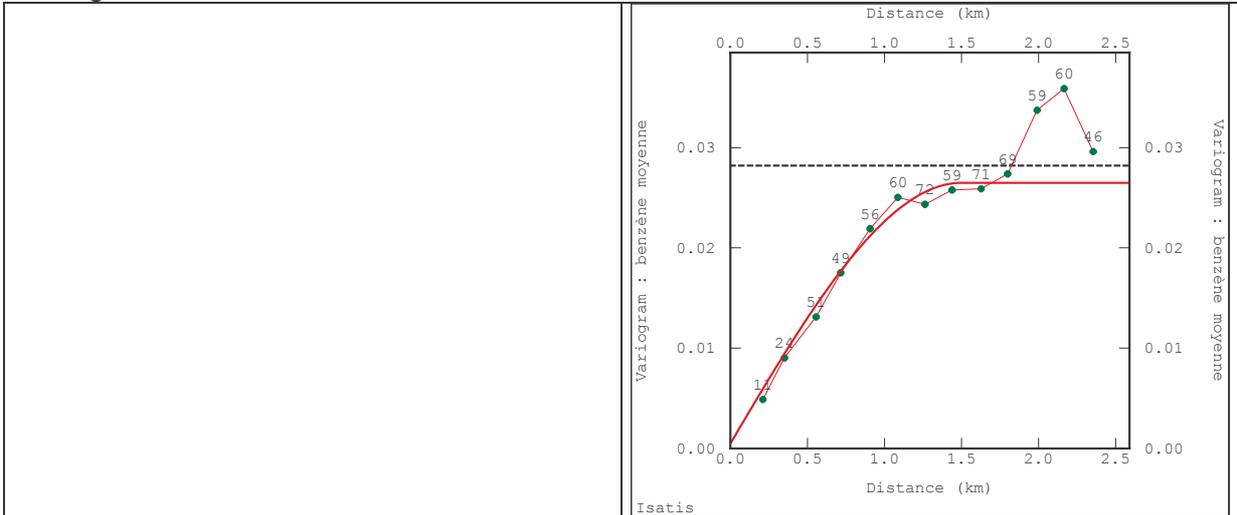
Carte, histogramme et nuée variographique

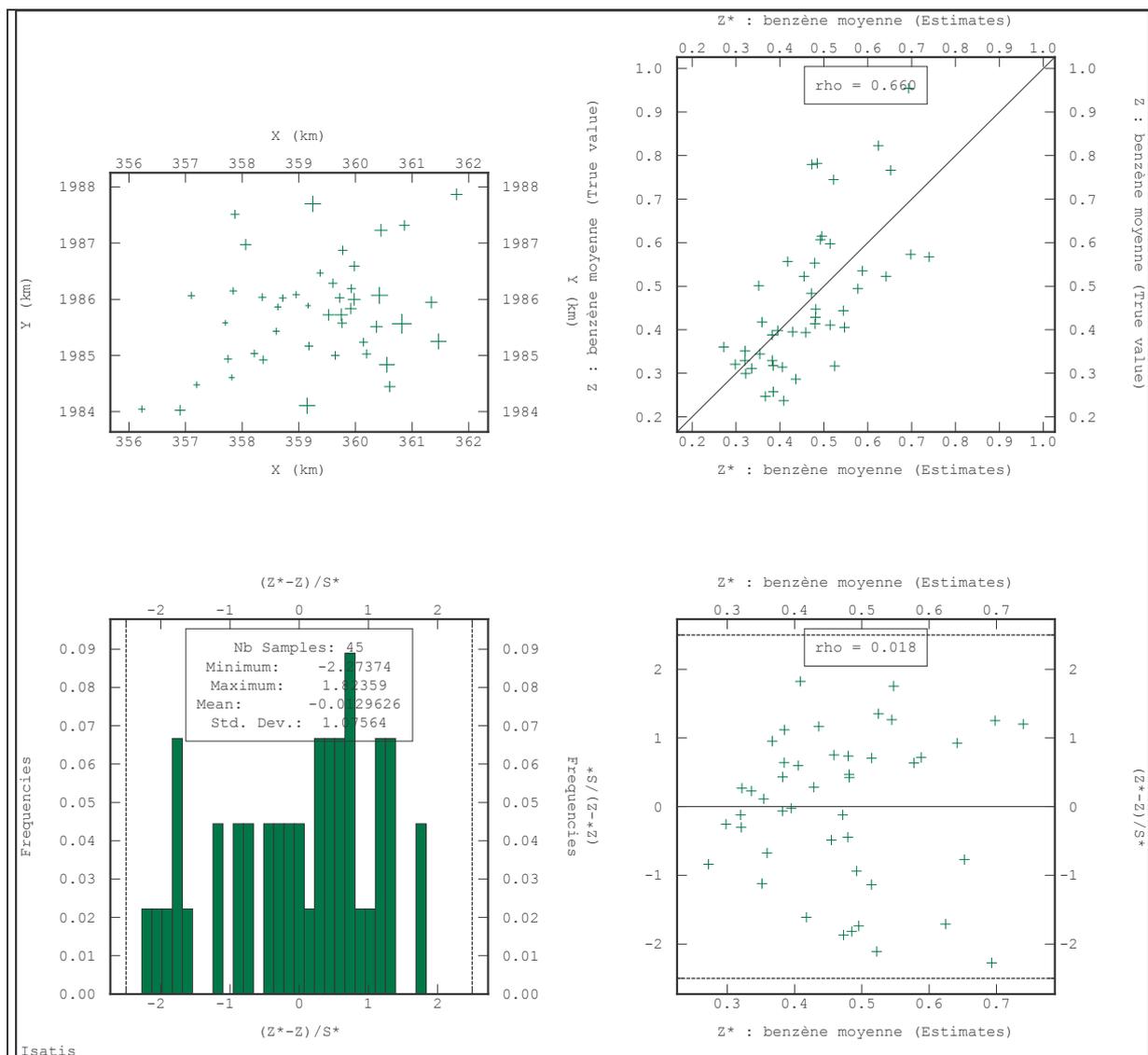




Points éliminés du calcul du variogramme : site n° 27 (hangar à peinture)

Variogramme modélisé et validation croisée



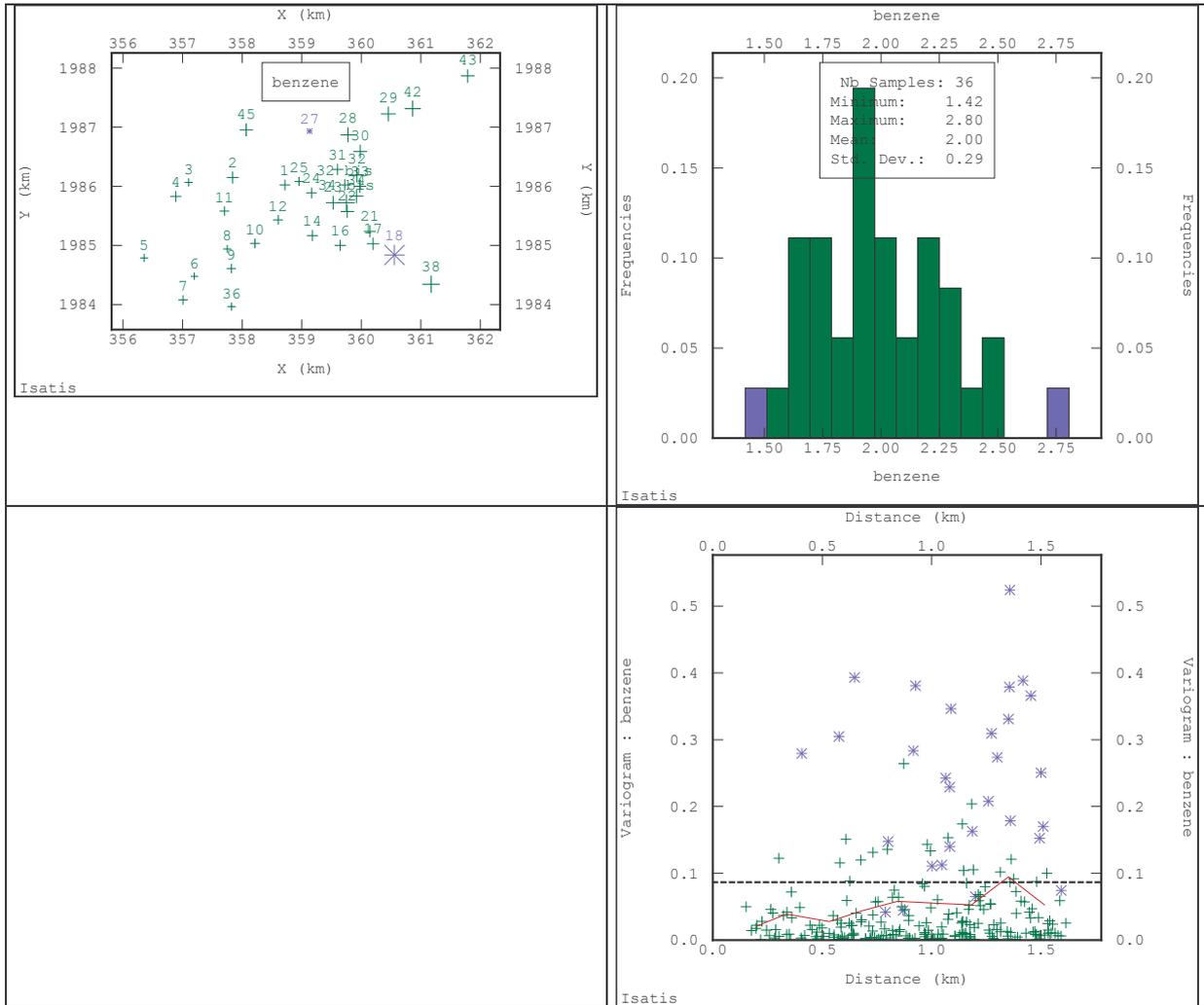


Résultats numériques de la validation croisée

	Moyenne	Variance
Erreur	-0.004	0.016
Erreur standardisée	-0.013	1.157
Erreur relative [%]	21,9	261,3 (é.-type = 16,2)

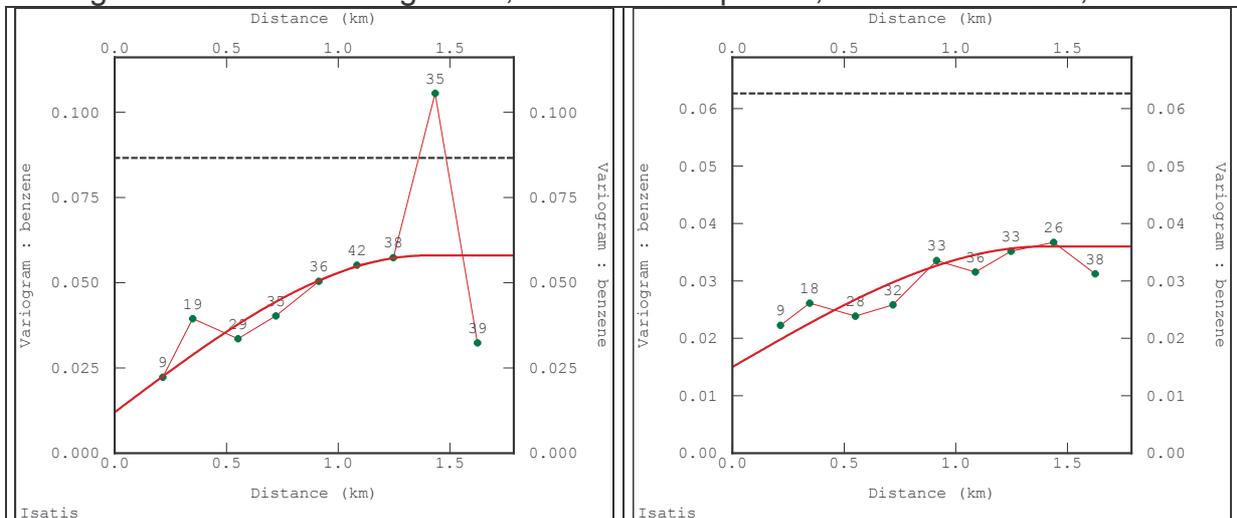
2004

Carte, histogramme et nuée variographique



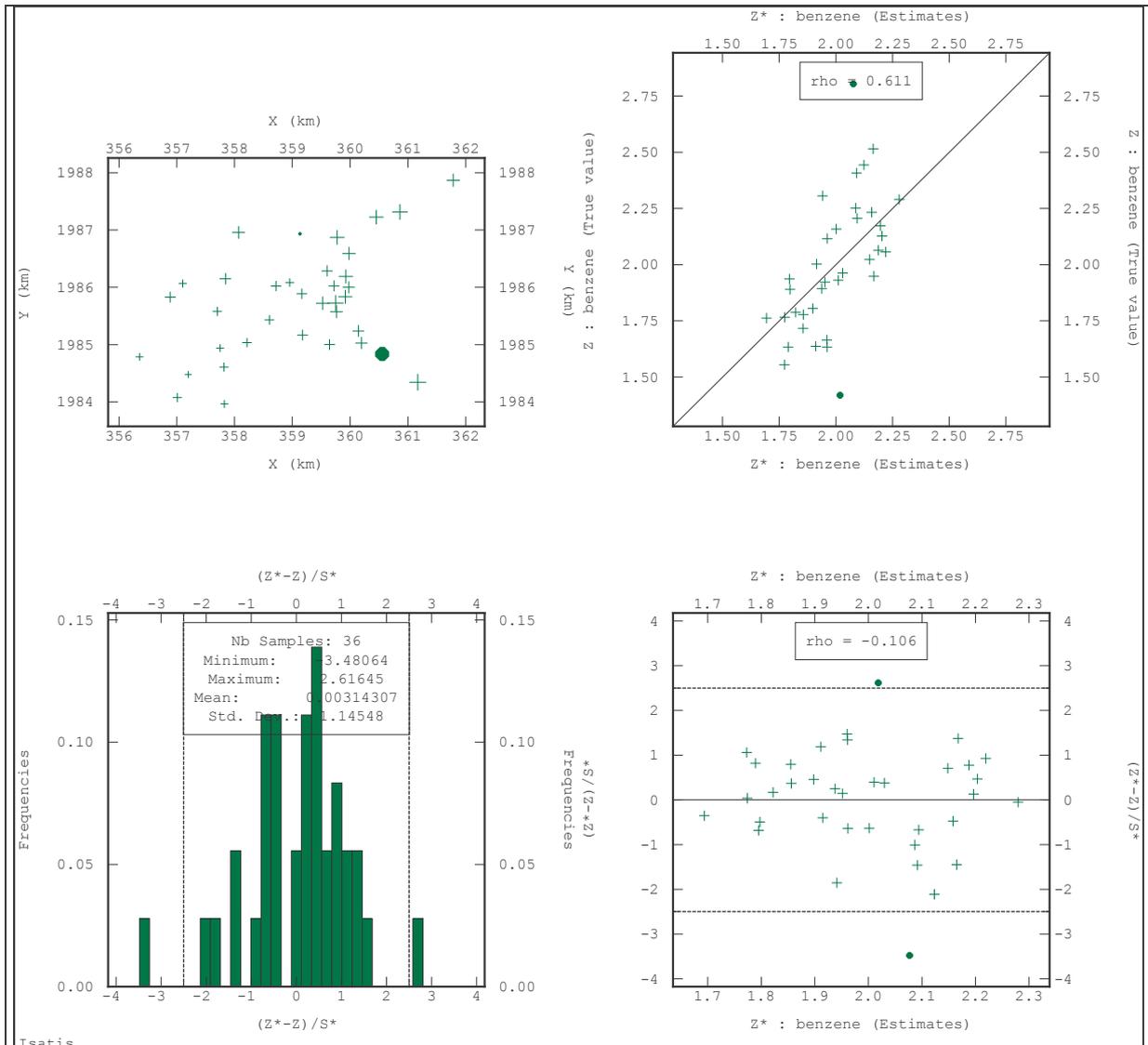
Points éliminés du calcul du variogramme : deux cas sont considérés : 1) avec tous les points ; 2) sans les sites n°18 (parking, proximité d'une route) et n° 27 (hangar à peinture). Mais ici, à l'inverse de ce qui a été observé pour le NO₂, et alors qu'on aurait pu s'attendre aussi à une forte teneur, la concentration mesurée au point 27 est la plus basse du domaine.

Variogramme modélisé : à gauche, avec tous les points ; à droite : sans 18, sans 27



On se contente de présenter les résultats de la validation croisée pour le modèle fondé sur l'ensemble des points (ce modèle se révèle légèrement plus satisfaisant, notamment pour l'estimation des plus fortes teneurs).

Validation croisée

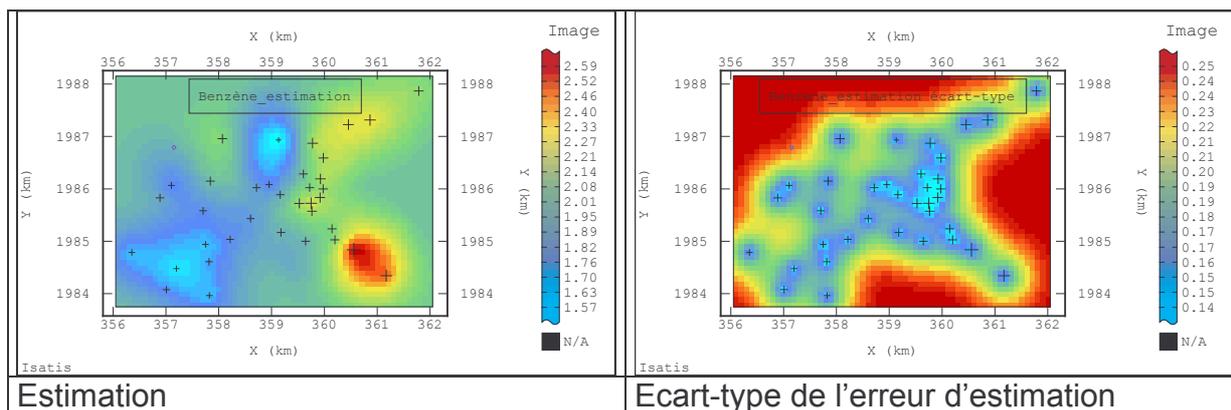


Le point de plus forte concentration au sud-est du domaine est logiquement sous-estimé.

Résultats numériques de la validation croisée (avec 18 et 27)

36 points	Moyenne	Variance
Erreur	-0,0009	0,055
Erreur standardisée	-0,003	1,31
Erreur relative [%]	8,9	66,8 (é.-type=8,2)

Les cartes d'estimation ci-après montrent le poids que prennent localement le point 27 (tache bleue au nord) et les points 18 et 38 (tache rouge au sud-est). L'échantillonnage ne permet pas de dire si les taches de concentration autour de ces sites sont ou non réalistes.

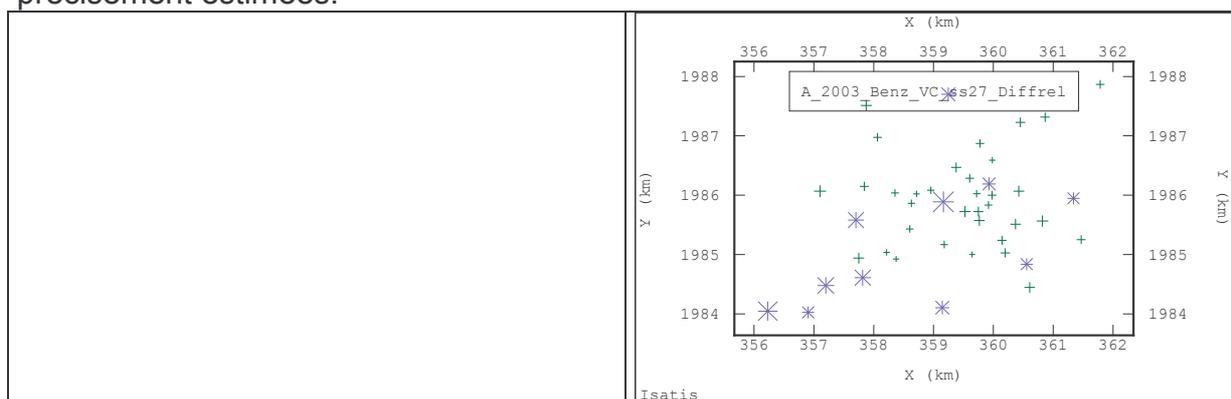


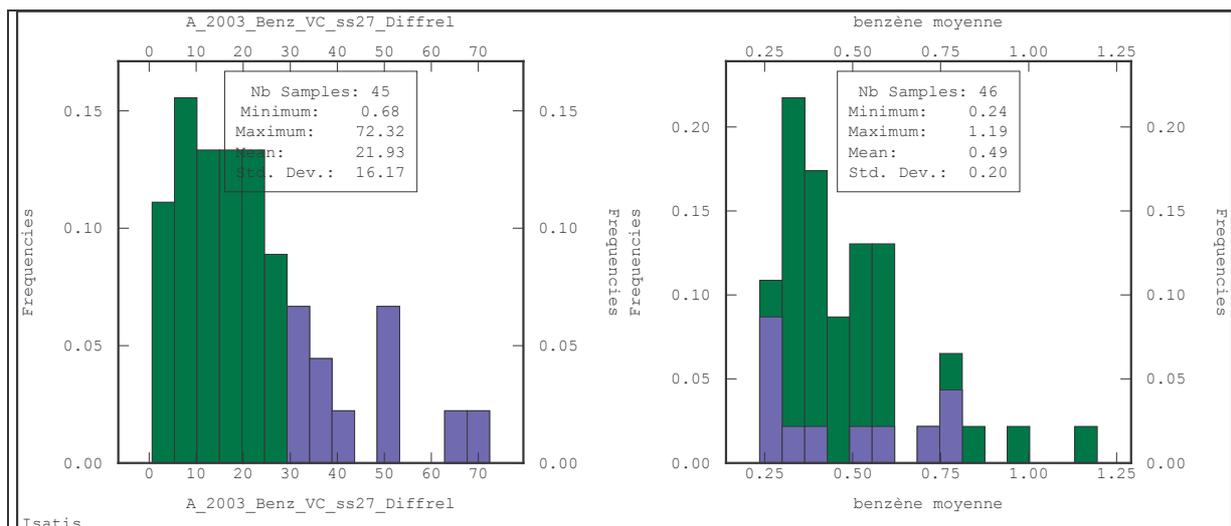
Cartographie du NO₂ et du benzène, remarques générales

L'étude des données ne montre pas d'influence particulière des décollages ou atterrissages au pas de temps considéré (supérieur à 2 semaines) mais elle indique une variabilité locale des concentrations liée à la configuration du site. Des hausses ponctuelles de concentration sont ainsi observées sur des zones de stationnement temporaire ou près d'un hangar à peinture. La répartition des données ne permet pas toujours d'évaluer l'étendue spatiale de ces influences.

Il est néanmoins possible de modéliser une structure spatiale et d'élaborer une cartographie ; hors du cœur de la plate-forme, l'estimation est cependant moins précise (voir notamment les écarts-types de krigeage et les figures ci-dessous).

Exemple du benzène, année 2003. Carte des erreurs relatives de validation croisée (sans le point 27). A gauche : histogramme des erreurs relatives ; à droite : histogramme des valeurs de concentration. A cause de la variabilité locale des concentrations, deux valeurs situées au cœur de la plate-forme ne sont pas précisément estimées.





La stratégie de surveillance adoptée par AIRAQ qui, chaque année, a répété le même plan d'échantillonnage, a rendu possible la comparaison entre les campagnes de mesure et a ainsi permis de confirmer les observations faites en 2001 : établi que les concentrations moyennes par quinzaine sont plus sensiblement influencées par le trafic automobile lié à l'activité aéroportuaire que par le mouvement des avions.

Compte tenu de ce résultat et des remarques précédentes, un échantillonnage destiné à cartographier les concentrations de NO₂ et de benzène **sur la zone aéroportuaire** n'a pas besoin d'être orienté préférentiellement le long des pistes de décollage ou d'atterrissage. Afin de mieux cerner la variabilité des concentrations, une **répartition régulière dans tout le domaine, avec un espacement entre points inférieur ou égal à 500 m**, peut être préconisée.

ANNEXE 2 : Aéroport d'Orly

NO₂ Benzène

Une campagne de mesure du NO₂ et du benzène par tubes à échantillonnage passif a été conduite par AIRPARIF autour de l'aéroport d'Orly du 18 février au 15 avril 2003 (4 périodes consécutives de 2 semaines chacune).

Attention : à la différence des campagnes menées par AIRAQ, les mesures ne concernent pas la partie située dans l'enceinte de l'aéroport. Le domaine d'intérêt est ici la **périphérie de la plate-forme aéroportuaire**.

Le plan d'échantillonnage, composé de 119 sites de fond, est de type radial. Il se répartit dans une couronne encerclant l'aéroport jusqu'à une distance de 5 km (à l'intersection de 12 radiales et de cercles concentriques).

Sa densité est augmentée dans le prolongement des pistes d'atterrissage et de décollage les plus empruntées.

Pour 116 de ces sites, on dispose de mesures de NO₂. Pour 54 d'entre eux, on dispose de mesures de benzène.

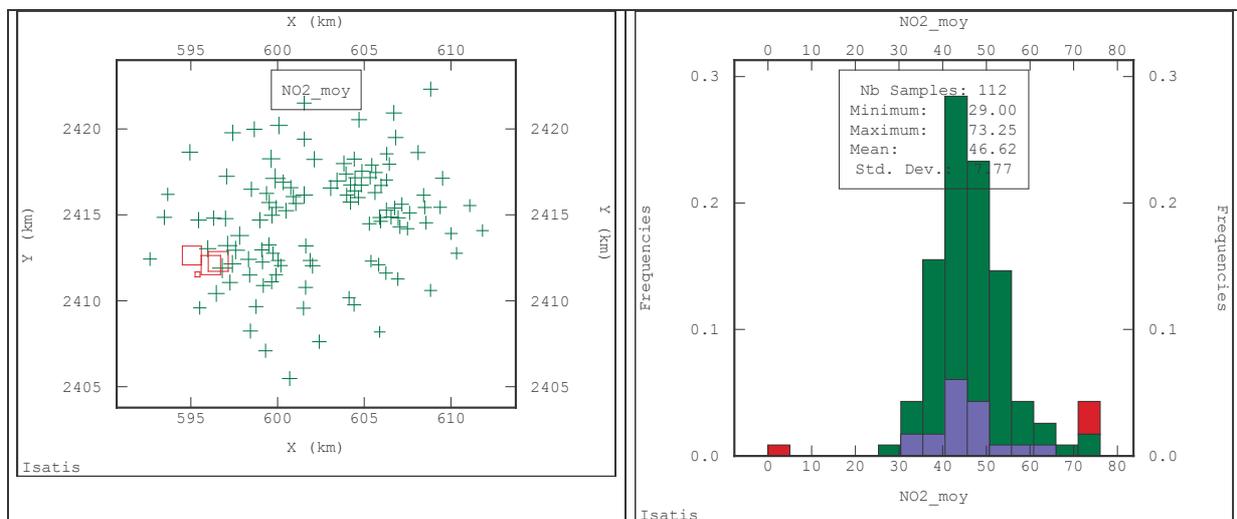
Le travail porte ici sur les **concentrations moyennes sur la campagne**.

NO₂

1) Etude variographique du jeu de données original

Les moyennes calculées à partir d'une seule période de mesure correspondent aux extrêmes de l'histogramme ou en sont éloignées ; en outre, elles masquent en partie la structure du variogramme : les sites correspondants sont enlevés du jeu de données.

Les moyennes calculées à partir de 2 ou 3 mesures ne se distinguent pas du reste de la distribution et ne perturbent ni les statistiques ni le variogramme : les sites correspondants sont conservés.

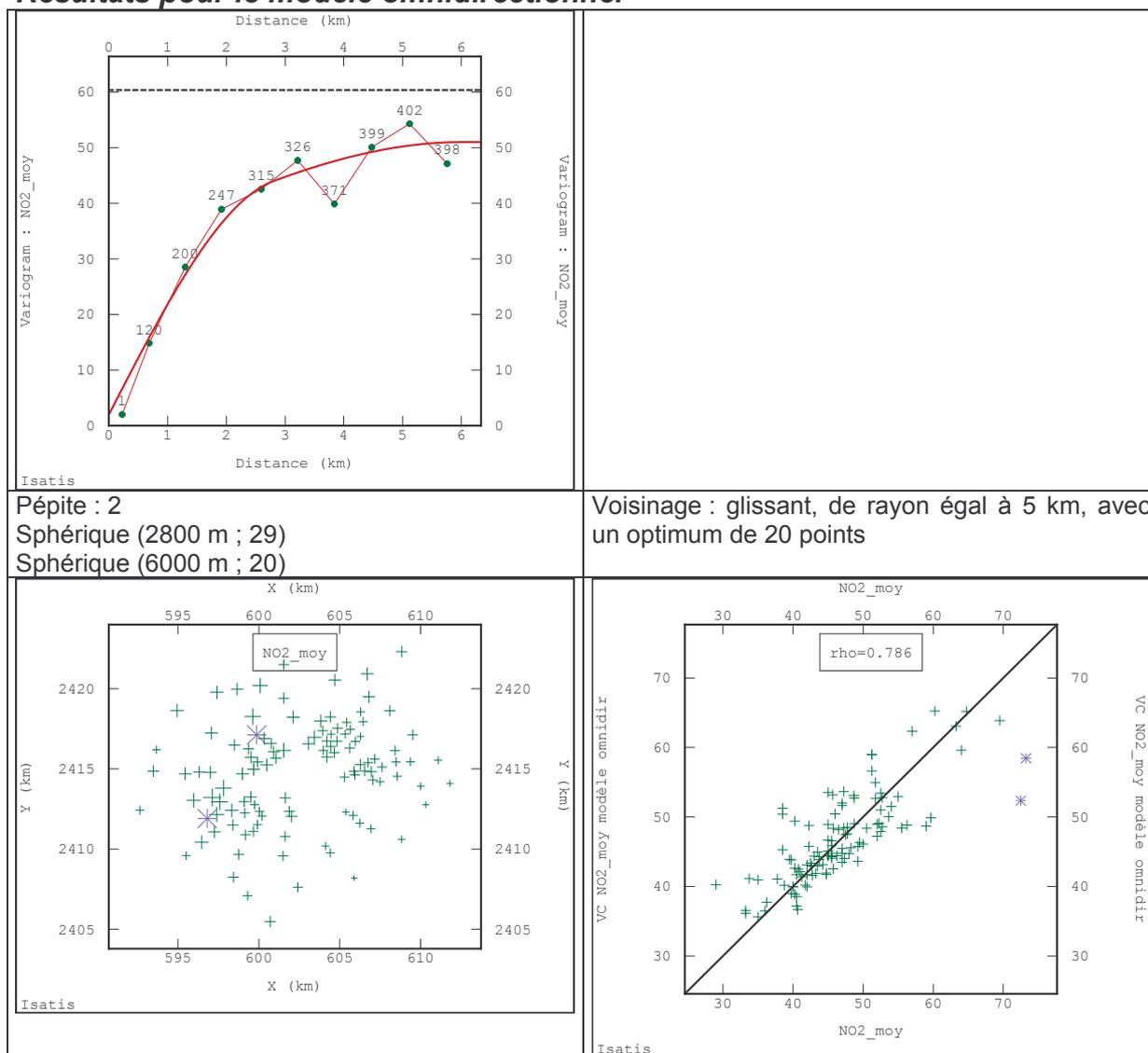


En rouge : points éliminés ; en bleu : points dont la moyenne est calculée à partir de 2 ou 3 mesures

Le jeu de données finalement sélectionné comporte un total de 112 sites. Il se caractérise par des niveaux de concentration assez élevés : la plupart des valeurs sont comprises entre 30 et 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Deux modèles différents de variogramme sont ajustés : un modèle omnidirectionnel et un modèle bidirectionnel.

Résultats pour le modèle omnidirectionnel



Les deux valeurs en bleu correspondent aux deux points de plus forte concentration.

Résultats numériques

	Moyenne	Variance
Erreur	0,226	23,19
Erreurs standardisée	0,027	1,103

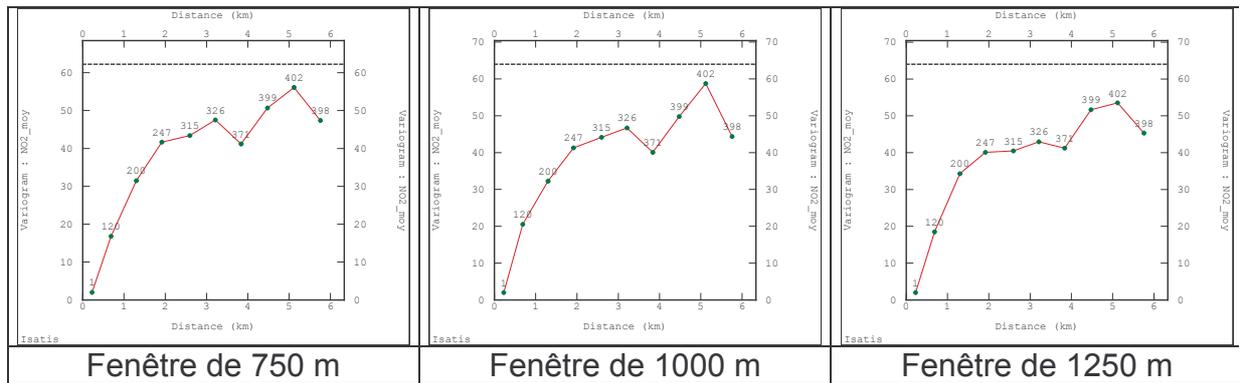
Statistiques des erreurs relatives de validation croisée (en valeur absolue) [%] :

min	P5	P50	P95	max	moy	e-type
0.04	-0.29	5.8	21.9	38.8	7.3	7.2

REMARQUE :

Les premiers points du variogramme peuvent être influencés par les zones les plus riches en sites de mesure. Pour s'affranchir de cet effet, on a également calculé le variogramme expérimental en appliquant l'option de *declustering* proposée par Isatis. Cette procédure consiste à pondérer les données à l'intérieur d'une fenêtre glissante de façon que le poids total à l'intérieur de cette fenêtre (et non plus le poids de chaque donnée) soit de 1.

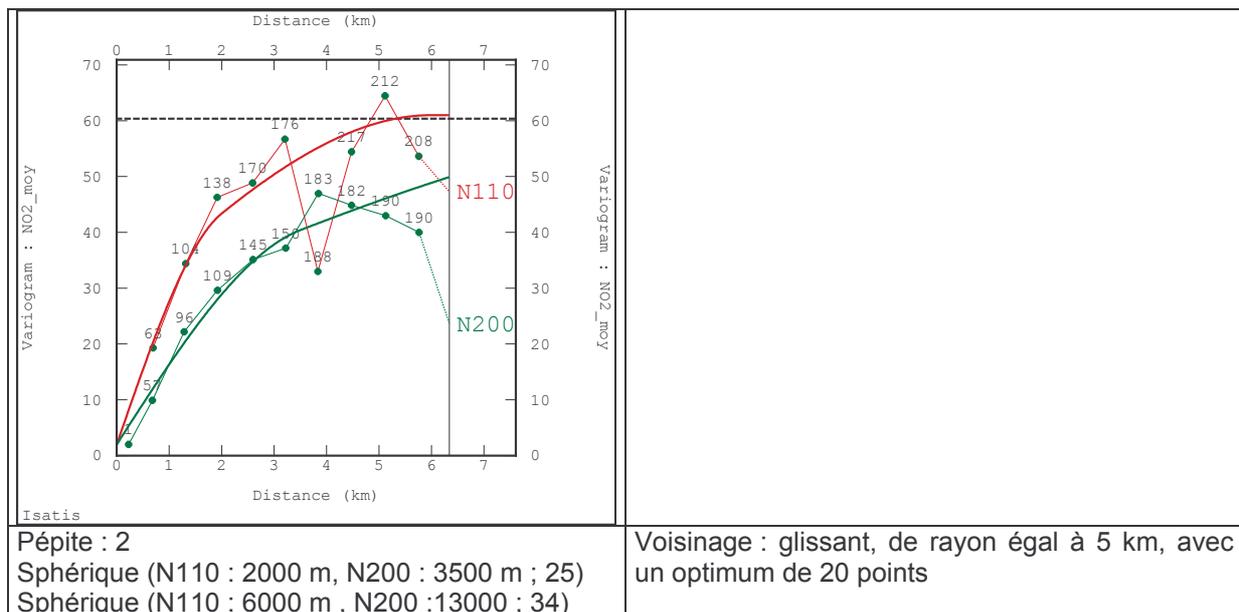
Trois largeurs de fenêtre ont été testées : 750 m, 1000 m et 1250 m.

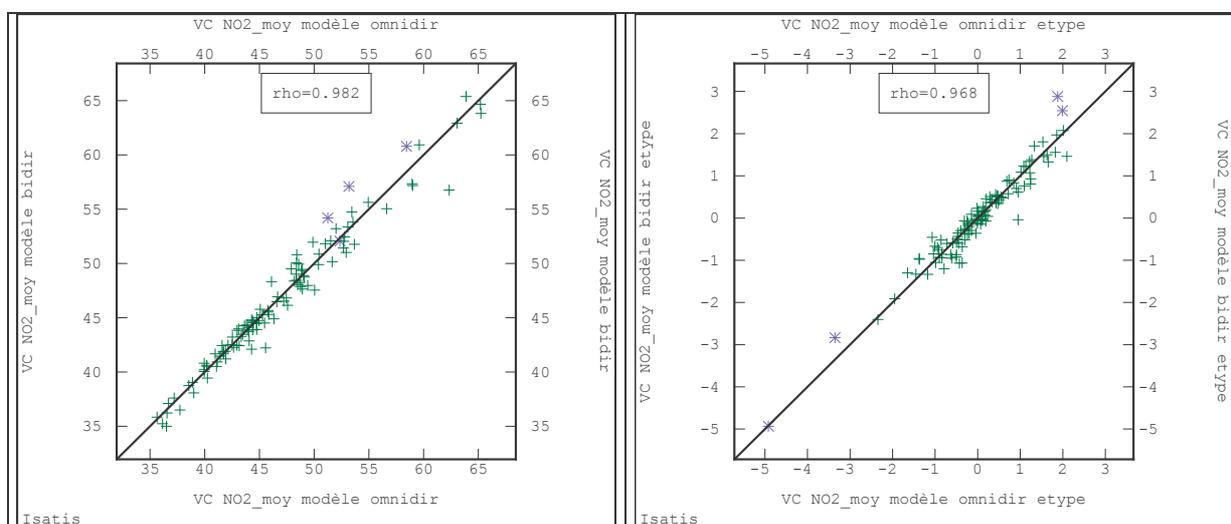
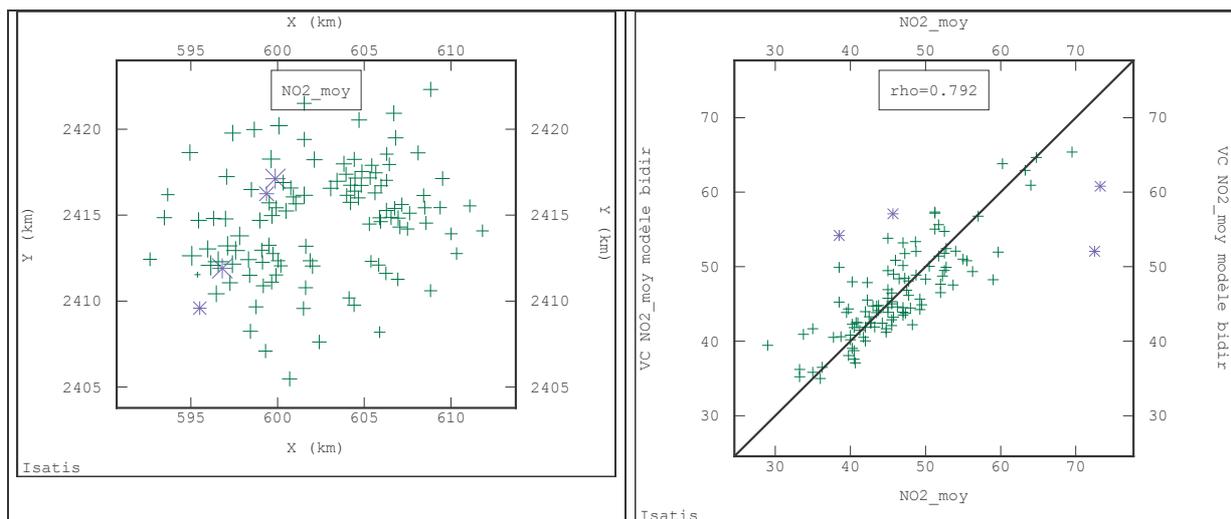


Le *declustering* ne modifie pas fondamentalement le variogramme expérimental pour les points situés avant la portée. Il n'y a donc pas de biais significatif d'échantillonnage.

Résultats pour le modèle bidirectionnel

Les résultats obtenus pour le modèle bidirectionnel sont très peu différents des résultats précédents (aussi bien les valeurs estimées que les écarts-types d'estimation).





Comparaison entre les concentrations estimées dans le cas d'un modèle omnidirectionnel (abscisses) et d'un modèle bidirectionnel (ordonnées)

Comparaison entre les écarts-types d'estimation dans le cas d'un modèle omnidirectionnel (abscisses) et d'un modèle bidirectionnel (ordonnées)

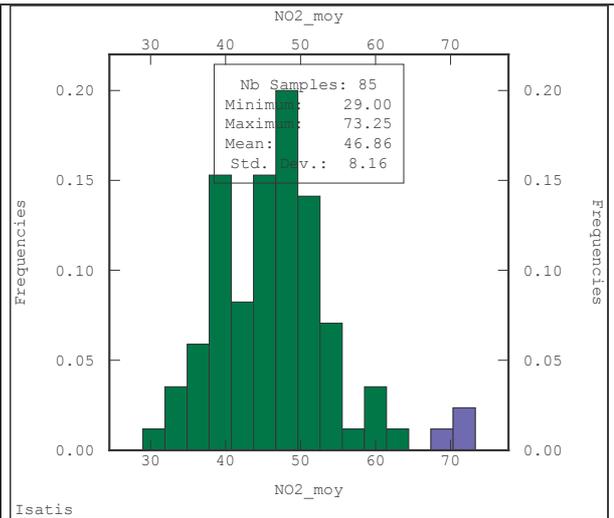
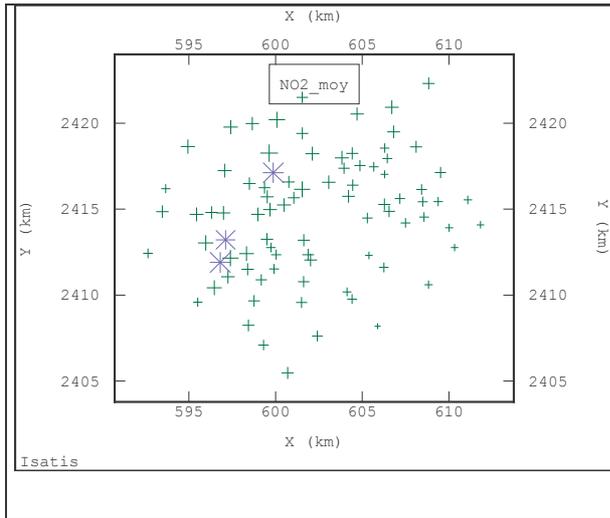
Résultats numériques :

	Moyenne	Variance
Erreur	0,141	22,62
Erreurs standardisée	0,014	1,102

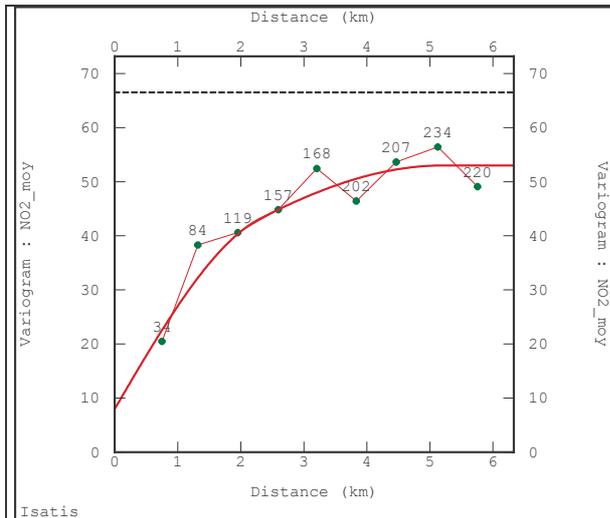
2) Etude variographique du jeu de données dégradé n°1

L'échantillonnage initial est resserré dans le prolongement des pistes. La dégradation consiste à ne conserver dans ces zones qu'un seul point par km².

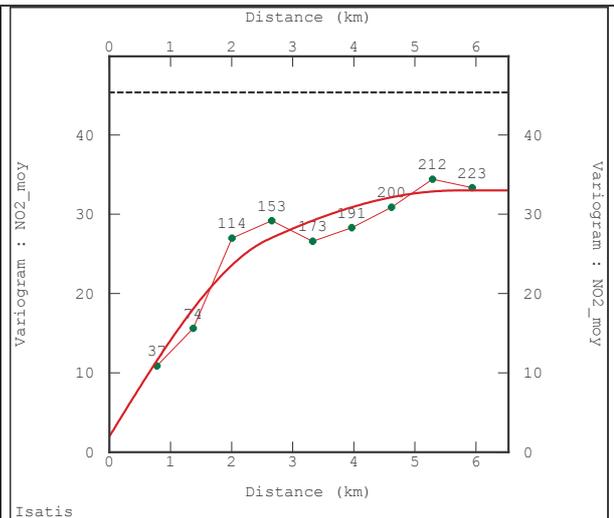
Le jeu de données réduit, après élimination des points sans donnée valide, compte 85 sites de mesure. Lorsqu'on s'éloigne de l'aéroport, la distance entre sites est de l'ordre du kilomètre.



Trois points de plus forte concentration (sites n°3, 101, 112, en bleu sur les figures) se détachent de l'histogramme et augmentent sensiblement la variabilité des données. Le variogramme est calculé avec et sans ces points. Aucune anisotropie marquée n'est mise ici en évidence.



Pépite : 8
Sphérique (2300 m ; 19)
Sphérique (5200 m ; 26)

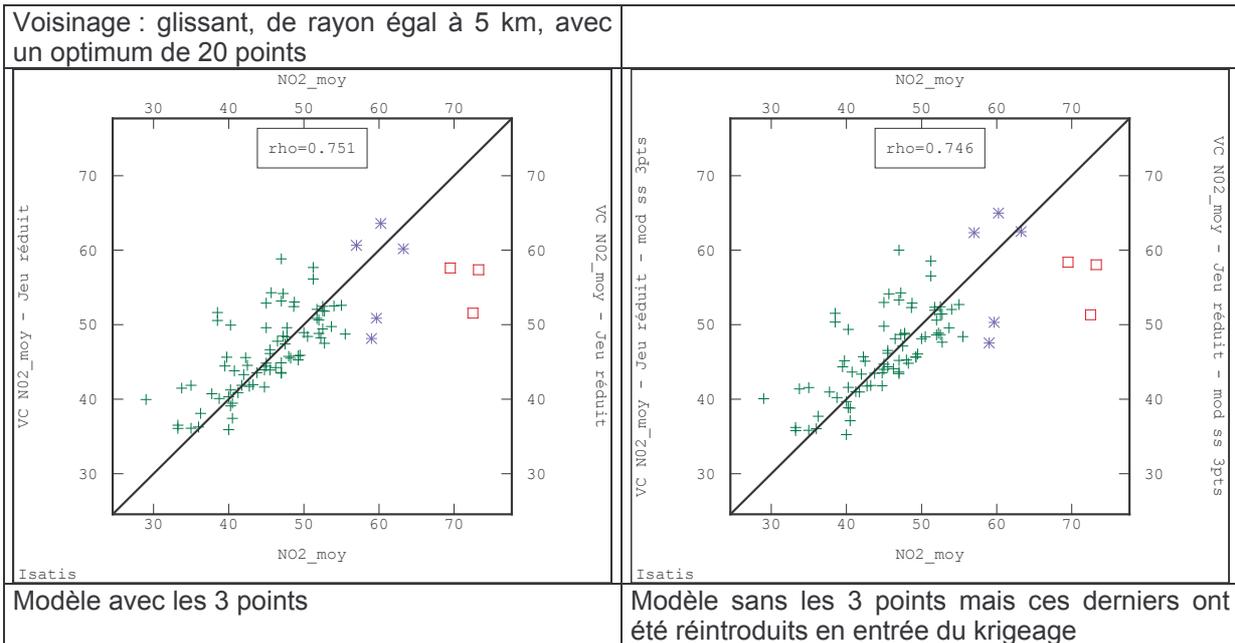


Pépite : 2
Sphérique (2600 m ; 14)
Sphérique 5700 m ; 17)

En plus de la validation croisée, le krigeage est effectué sur le complémentaire du jeu de données dégradé, c'est-à-dire aux 27 points écartés du jeu de données initial.

Les estimations obtenues par les deux modèles, aussi bien en validation croisée qu'en évaluation sur le complémentaire, sont quasiment identiques. Le modèle sans les 3 points a surtout pour conséquence d'abaisser l'écart-type de krigeage (ce qui est logique puisque l'effet de pépite et le palier sont plus élevés).

Validation croisée



Résultats numériques :

Modèle établi sur l'ensemble du jeu réduit		
85 points	Moyenne	Variance
Erreur	0,255	30,32
Erreur standardisée	0,030	0,906
Modèle établi sans les 3 valeurs les plus fortes		
82 points	Moyenne	Variance
Erreur	0,166	21,65
Erreur standardisée	0,025	1,111

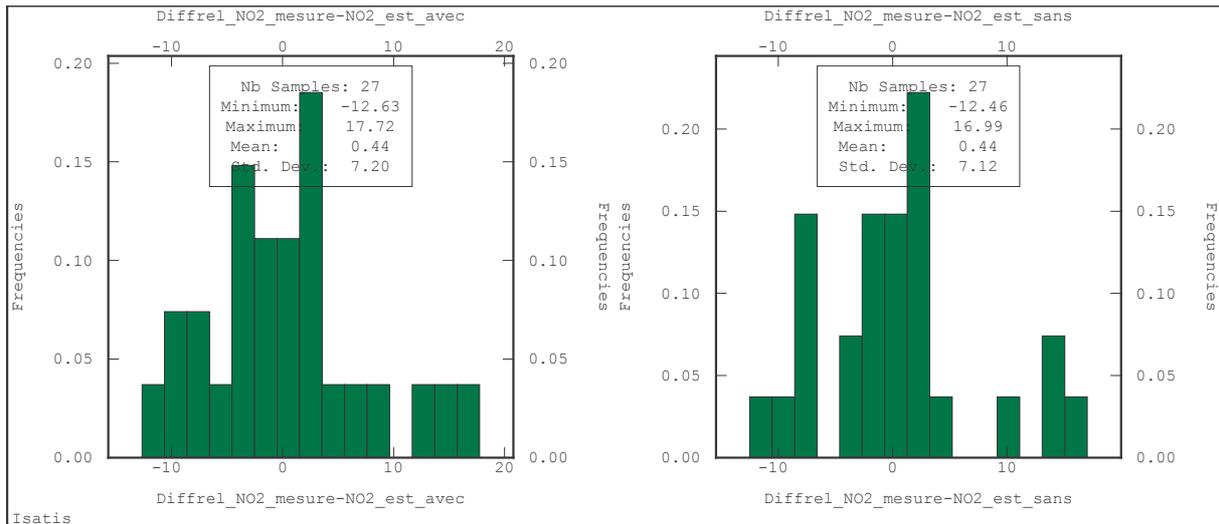
Statistiques des erreurs relatives (en valeur absolue) [%] :

Résultats pour le modèle établi sur l'ensemble du jeu réduit						
min	P5	P50	P95	max	moy	e-type
0.11	0.69	6.6	22.6	38.2	8.4	7.7
Résultats pour le modèle établi sans les 3 valeurs les plus fortes, mais après avoir réintroduit ces dernières en entrée du krigeage						
min	P5	P50	P95	max	moy	e-type
0.11	0.61	6.6	27.7	38.2	8.5	8.1

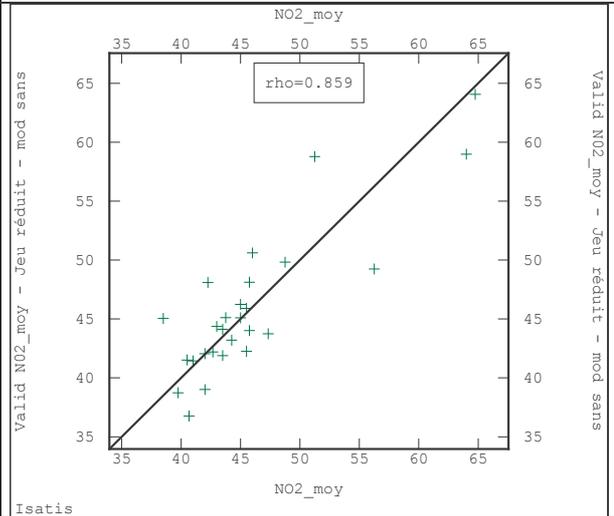
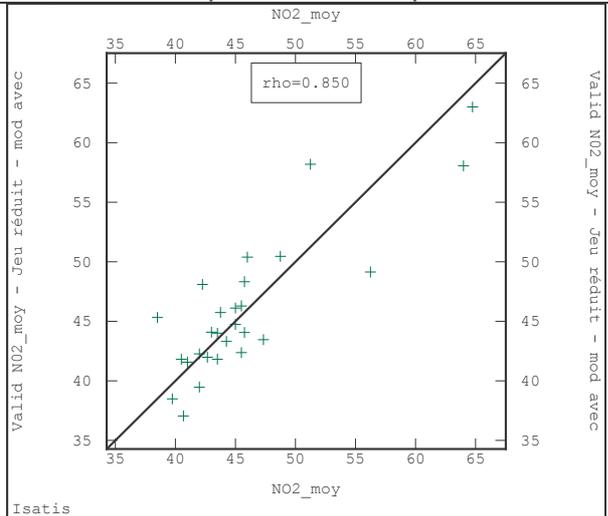
L'erreur maximale correspond à la sous-estimation d'un des 3 points.

Krigeage sur les points éliminés du jeu initial

L'écart relatif entre les concentrations estimées et mesurées s'étend de -13% à 18% au maximum :

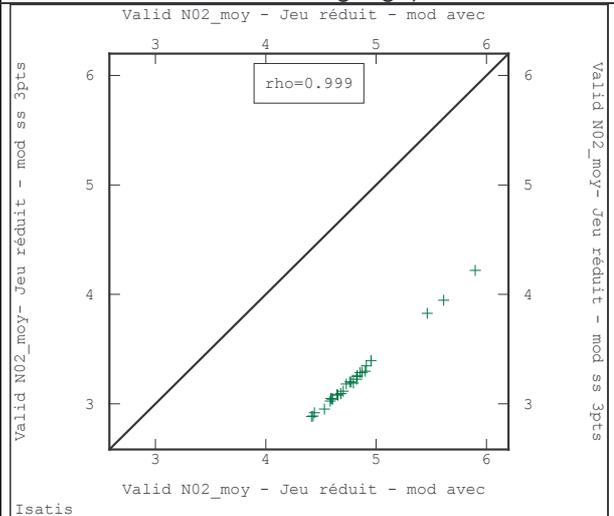
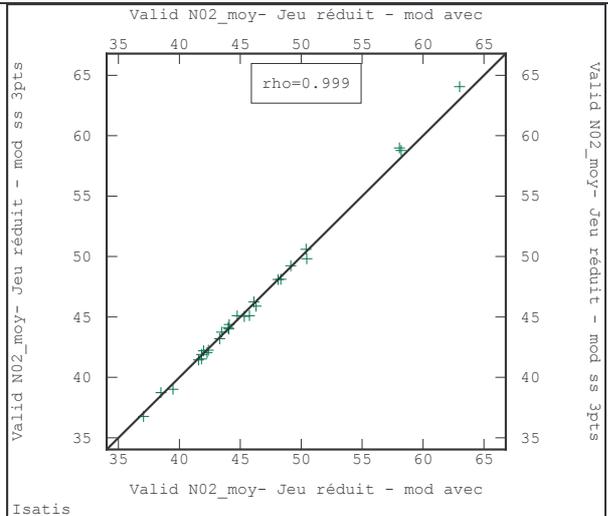


Voisinage : glissant, de rayon égal à 5 km, avec un optimum de 20 points



Modèle avec les 3 points

Modèle sans les 3 points (mais les 3 points sont réintroduits en entrée du krigeage)

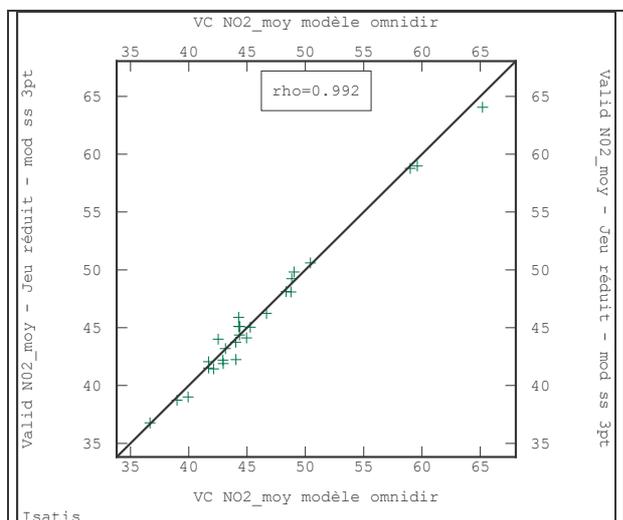


Comparaison entre les estimations obtenues par les 2 modèles

Comparaison entre les écarts-types de krigeage

Effet de la dégradation

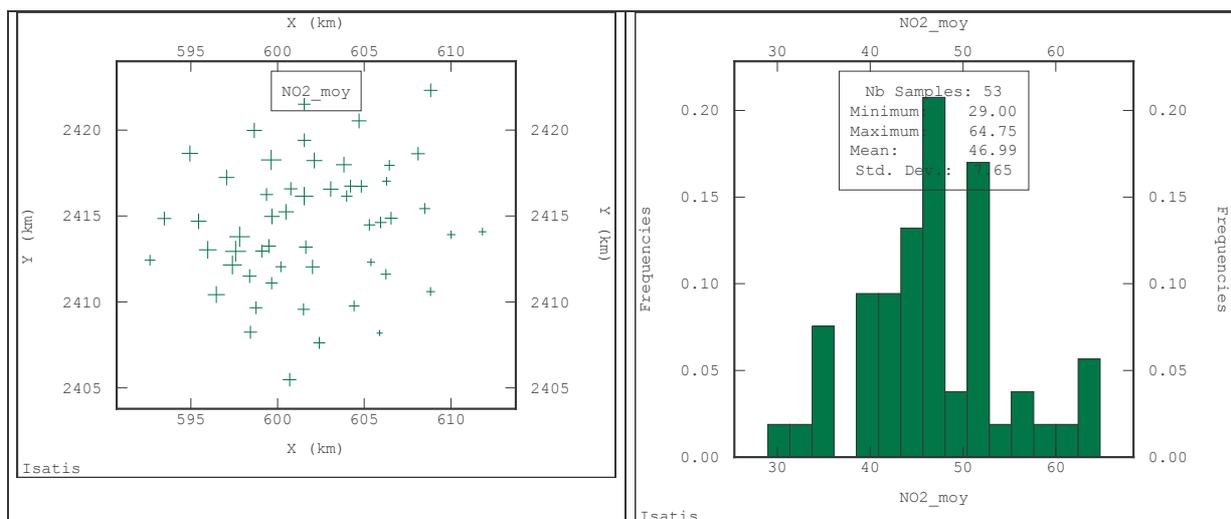
Le graphique ci-dessous compare, pour les **points du jeu de données complémentaire**, les estimations obtenues par validation croisée à partir du jeu de données entier (modèle omnidirectionnel) et les estimations obtenues par krigeage à partir du jeu de données réduit (modèle sans les 3 points).



Sur toute la gamme de valeurs, les résultats sont proches. Dans les zones où l'échantillonnage était auparavant plus dense, la dégradation du jeu de données n'a pas d'effet marqué sur l'estimation.

3) Etude variographique du jeu de données dégradé n°2

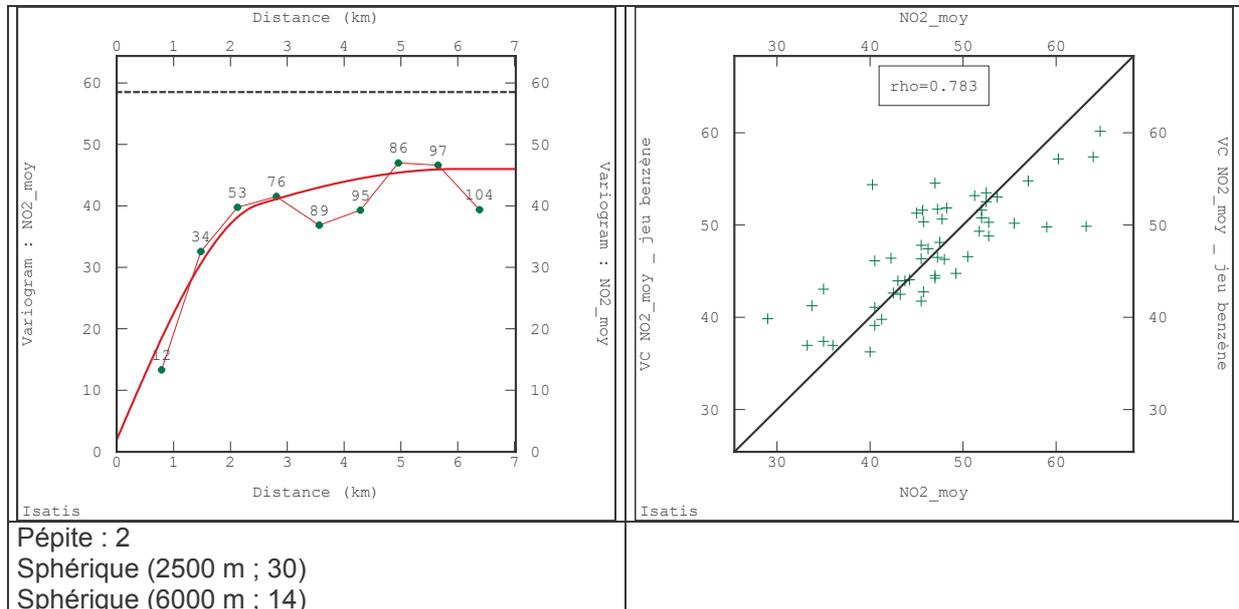
On utilise le plan d'échantillonnage défini par AIRPARIF pour le benzène, ce qui représente un total de 52 sites dotés de données valides.



Plusieurs points ressortent de la nuée variographique. Comme les paires de points de mesure auxquelles ils correspondent ne se rattachent pas un ou deux sites en

particulier mais se trouvent en différents endroits du domaine, toutes les données sont conservées dans le calcul du variogramme.

Validation croisée



Résultats numériques :

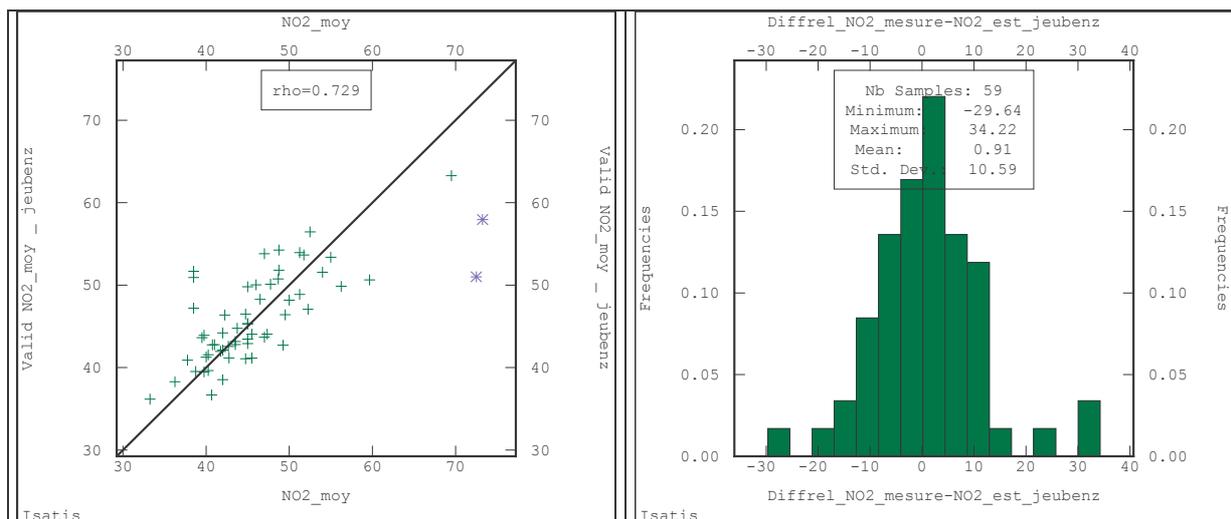
Modèle établi sur l'ensemble du jeu réduit		
85 points	Moyenne	Variance
Erreur	0.316	22.74
Erreur standardisée	0.042	0.623

Statistiques des erreurs relatives (en valeur absolue) [%] :

Modèle établi sur l'ensemble du jeu réduit						
min	P5	P50	P95	max	moy	e-type
0.06	0.41	5.9	23.0	37.8	7.9	7.9

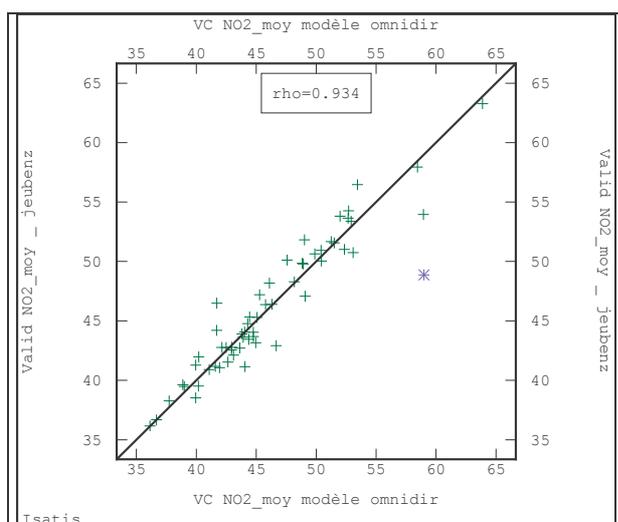
Krigeage sur les points éliminés du jeu initial

L'écart relatif entre les concentrations estimées et mesurées s'étend de -30% à 35%.



Effet de la dégradation

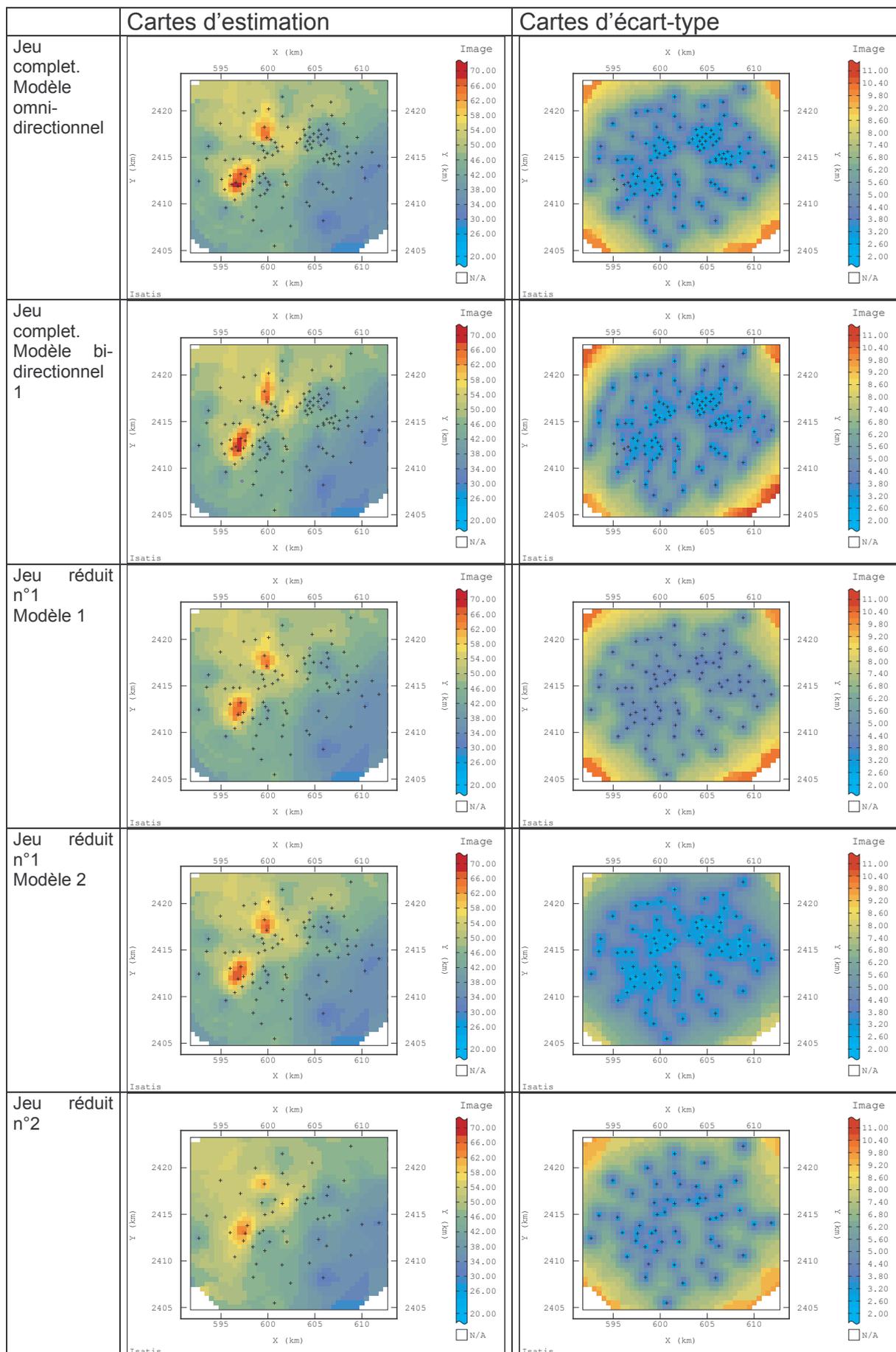
Le graphique ci-dessous compare, pour les **points du jeu de données complémentaire**, les estimations obtenues par validation croisée à partir du jeu de données entier (modèle omnidirectionnel) et les estimations obtenues par krigeage à partir du jeu de données dégradé.



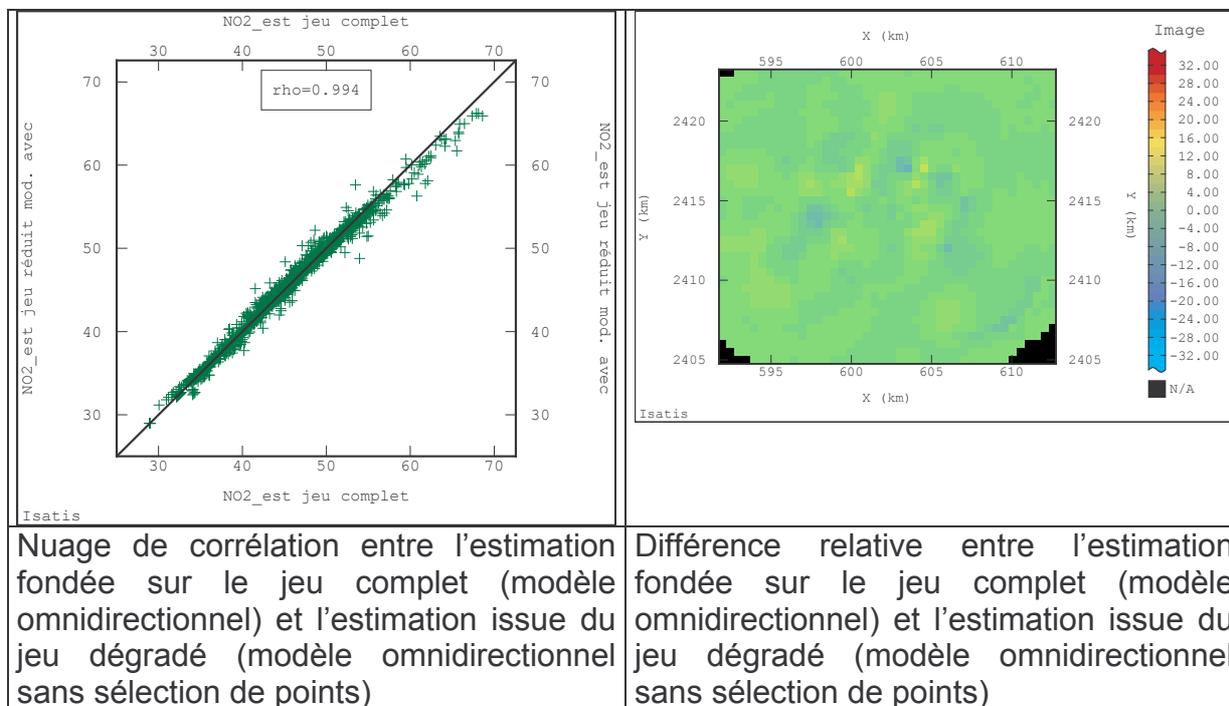
Sur toute la gamme de valeurs, les résultats sont proches. Deux points de concentration élevée sont plus fortement sous-estimés avec le jeu dégradé.

4) Estimation sur la grille

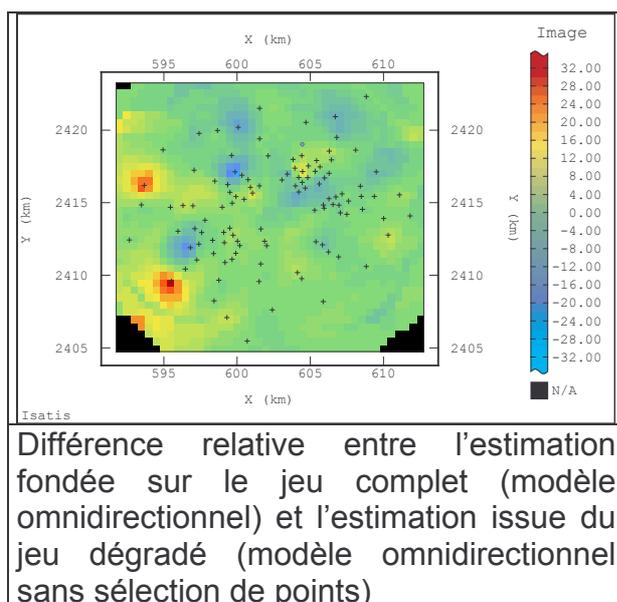
Les concentrations de NO₂ sont estimées sur le domaine d'étude selon une maille de 500 m de côté.



Les cartographies obtenues après la première dégradation sont très similaires aux cartographies de départ. On note principalement le petit effet de l'anisotropie et, en ce qui concerne l'écart-type de l'erreur de krigeage, l'impact du modèle choisi. Quel que soit le modèle de variogramme, la différence relative entre l'estimation fondée sur le jeu complet et l'estimation issue du jeu dégradé n'excède pas 10%.



La cartographie obtenue après la seconde dégradation est plus lisse et moins précise. L'écart par rapport à la carte initiale peut atteindre localement 30% dans des endroits où se trouvaient auparavant des données.



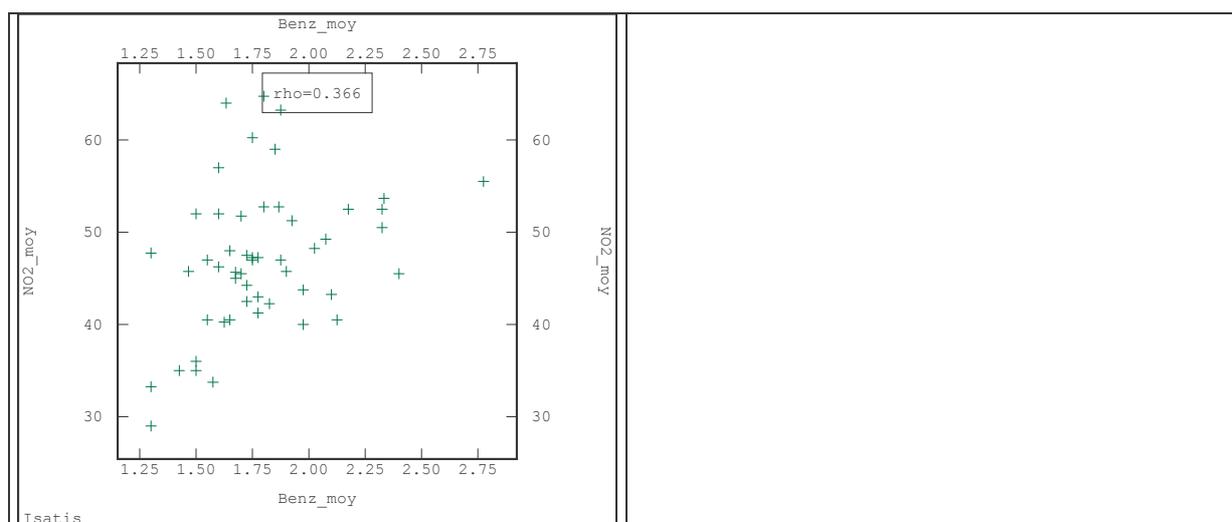
5) Conclusion sur l'échantillonnage du NO₂

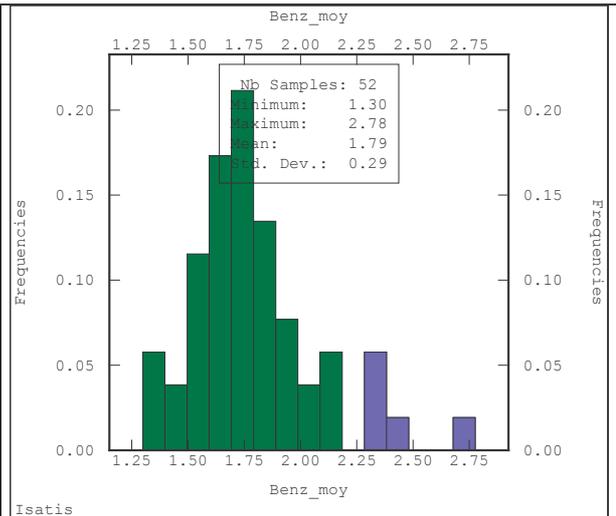
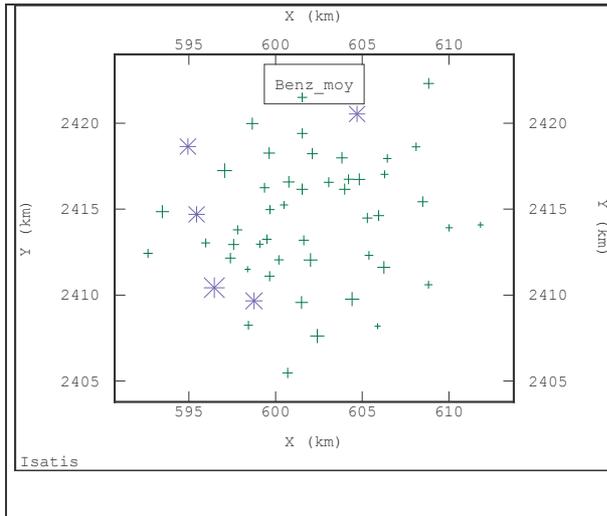
L'étude conduite par AIRPARIF montre qu'aux pas de temps considérés pour l'échantillonnage passif, l'impact spécifique du mouvement des avions et des activités aéroportuaires n'est pas aisément identifiable. Les concentrations de NO₂ mesurées autour de l'aéroport résultent des contributions de sources multiples, en particulier des axes routiers qui traversent le domaine d'étude. L'influence de Paris est également visible dans la partie nord. Ainsi, cartographier le NO₂ autour de l'aéroport revient à cartographier le NO₂ dans une zone urbanisée complexe. Dans cette étude, le passage d'un échantillonnage radial à un échantillonnage régulièrement réparti, selon une densité d'un point par kilomètre carré, se montre adapté. Il permet de détecter et de modéliser une structure spatiale et conduit à une estimation de précision satisfaisante.

BENZENE

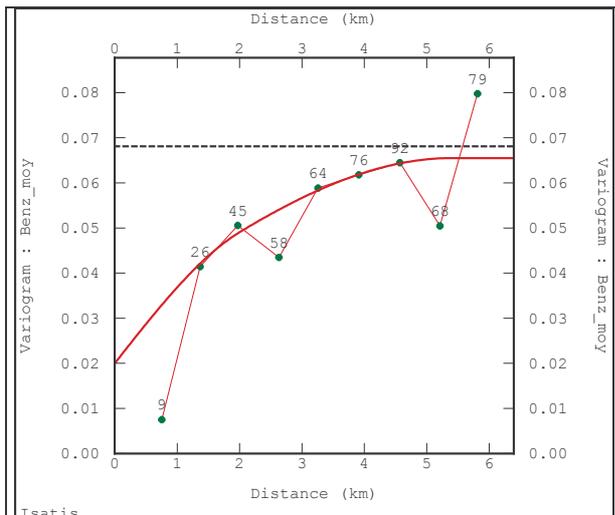
Remarque préliminaire :

Les concentrations de NO₂ et de benzène sont faiblement corrélées (deux nuages semblent en fait se distinguer dans la figure ci-dessous). On se limite à l'étude du benzène seul.





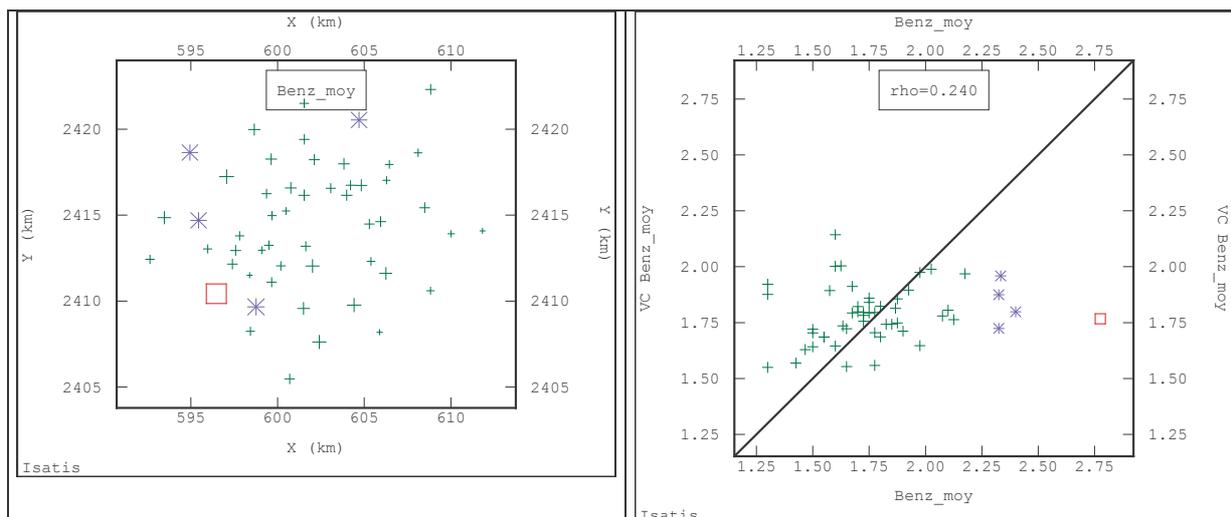
Le pourtour du domaine se caractérise par des concentrations plus élevées. Le point de concentration maximale (site n°93 au sud-ouest), voisin de valeurs plus faibles, masque en grande partie la structure spatiale sur les premiers kilomètres : il est retiré du calcul du variogramme. Le modèle ajusté est omnidirectionnel ; il comporte un effet de pépite relativement important.



Pépite : 0.02
 Sphérique (2000 m ; 0.0105)
 Sphérique (5400 m ; 0.035)

Le nuage de corrélation entre les concentrations mesurées et estimées par validation croisée est assez dispersé, avec une sous-estimation de certaines valeurs fortes et une surestimation de quelques valeurs faibles ou modérées.

Voisinage : glissant, de rayon égal à 6 km, avec un optimum de 20 points



Résultats numériques :

Modèle établi sur l'ensemble du jeu réduit		
85 points	Moyenne	Variance
Erreur	0.316	22.74
Erreur standardisée	0.042	0.623

Statistiques des erreurs relatives (en valeur absolue) [%] :

Modèle établi sur l'ensemble du jeu réduit						
min	P5	P50	P95	max	moy	e-type
0.04	1.2	8.7	36.3	47.8	11.9	10.8

Conclusion sur l'échantillonnage du benzène

A cause du nombre limité de points et des résultats de validation croisée, l'étude du benzène n'est pas poussée plus loin. A moins de disposer de variables auxiliaires adéquates sur l'ensemble du domaine, l'établissement d'une cartographie précise nécessite un échantillonnage plus dense. D'après l'analyse variographique, la portée du phénomène serait voisine de celle du NO₂. Les indications d'échantillonnage émises pour le NO₂ pourraient donc s'appliquer.

ANNEXE 3 : Aéroports du Bourget et de Roissy

Plusieurs campagnes de mesures des teneurs en NO₂ et benzène par échantillonnage passif ont été réalisées durant 3 périodes de 15 jours durant l'hiver et l'été 2002 dans une zone définie par un rayon de 5 km autour des deux plates-formes aéroportuaires de Roissy-Charles-de-Gaulle et du Bourget. Sa superficie est de 466 km² et englobe 59 communes sur 3 départements.

Le plan d'échantillonnage est de type radial avec une répartition relativement homogène sur toute la zone, et une densification des sites de mesure aux abords des plates-formes. 12 radiales partant du centre des plates-formes ont ainsi été tracées puis des périmètres demi-kilométriques jusqu'à 2 km, et kilométriques entre 2 et 5 km ont été considérés. Les sites ont été placés au plus proche des intersections entre radiales et périmètres. Enfin, des points supplémentaires ont été ajoutés dans le prolongement des pistes d'atterrissage et de décollage.

On dispose d'environ 180 sites de fond pour le NO₂ et d'une cinquantaine pour le benzène. Les concentrations moyennes ont été considérées dans cette étude, à condition qu'au moins deux semaines de mesure aient été renseignées pour chaque saison.

A noter que durant les périodes de campagne de mesures, les conditions météorologiques présentaient deux effets antagonistes : d'une part, des vents dominants de secteur sud-ouest favorisant le transport de la pollution du centre vers la zone d'étude, et une fréquence importante de vents forts (> 4 m/s) sur les périodes de campagne, favorisant la dispersion des polluants.

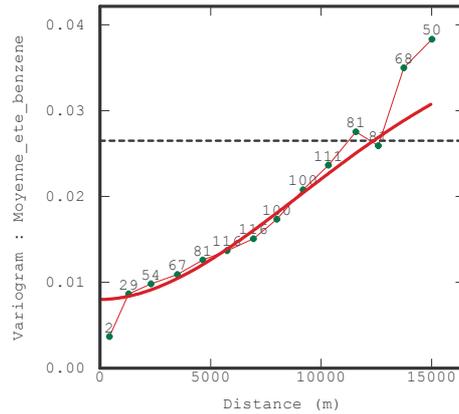
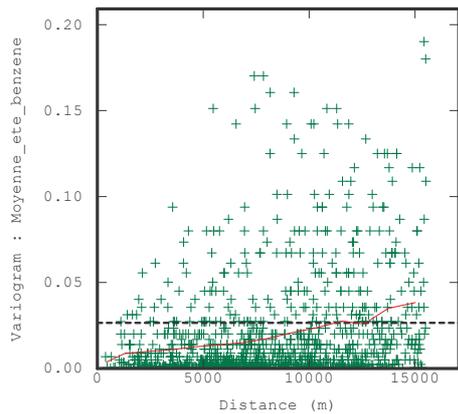
Etude de la portée du phénomène

Benzène

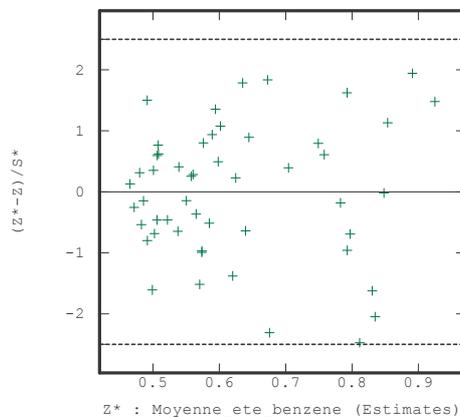
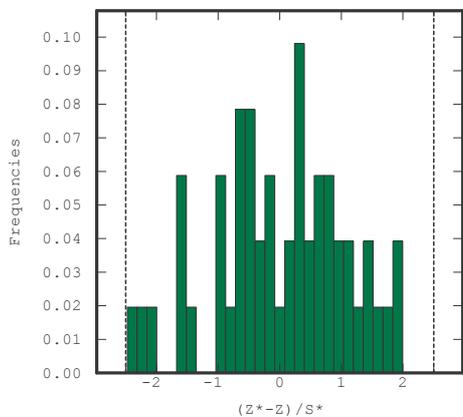
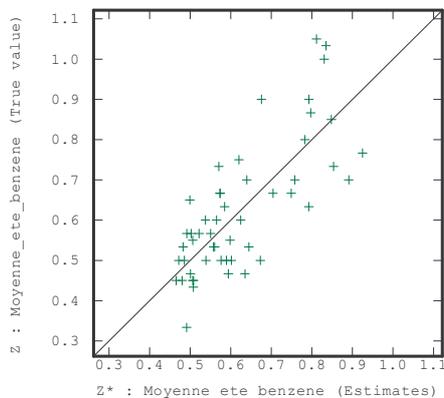
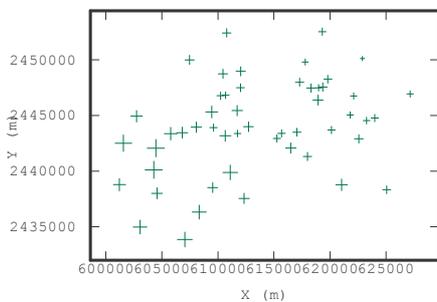
CAMPAGNE ESTIVALE

1 VARIOGRAMME EXPERIMENTAL ET MODELISE

51 points ont été conservés sur un total de 54. Le variogramme choisi est omnidirectionnel selon 14 pas de 1150 m (un modèle bidirectionnel a également été testé, sans incidence significative sur l'estimation). Le modèle retenu est la somme d'un effet pépité (0,008) et d'un modèle cubique (30 km ; 0,03).



2 VALIDATION CROISEE

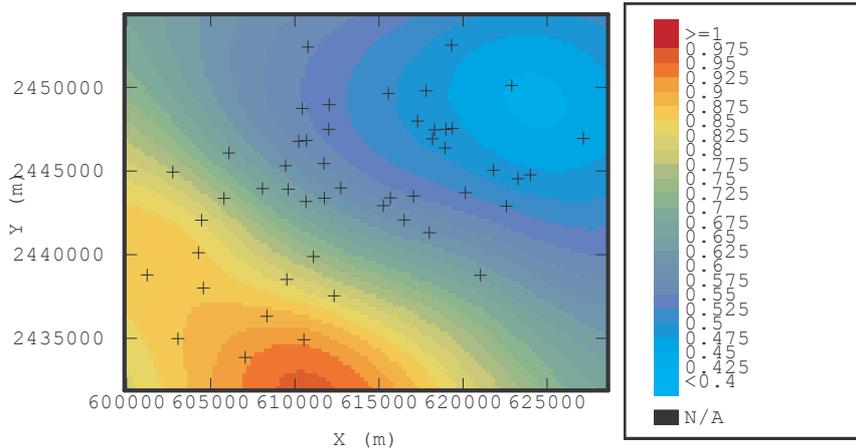


Toutes les données sont robustes.

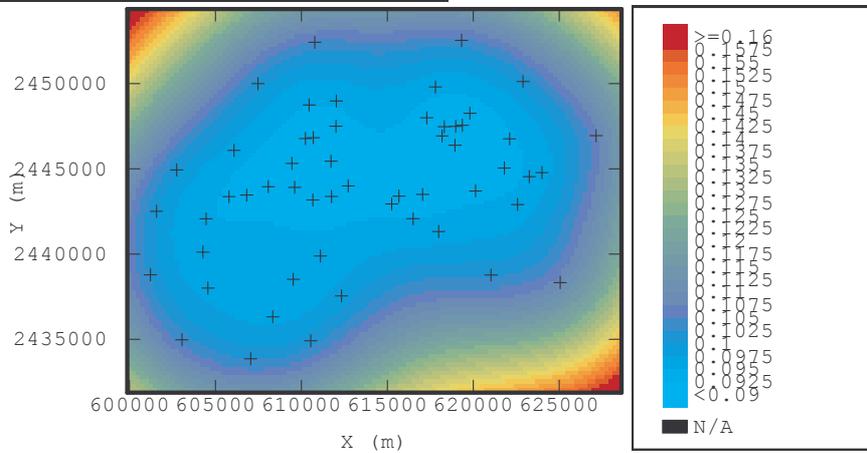
	Moyenne	Variance
51 points		
Erreur	0,00080	0,01124
Erreur standardisée	0,00366	1,15516

3 INTERPOLATION PAR KRIGEAGE SUR UNE GRILLE DE 250 × 250 M

3.1 Carte des estimations de benzène



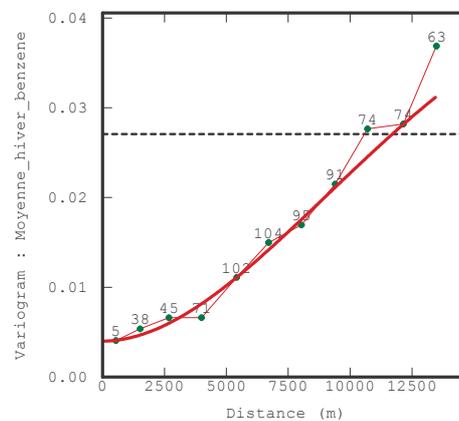
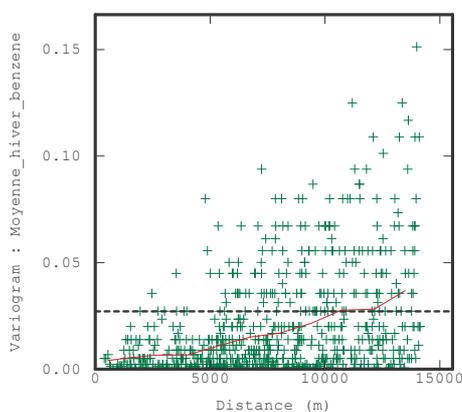
3.2 Carte des écarts-types de krigeage



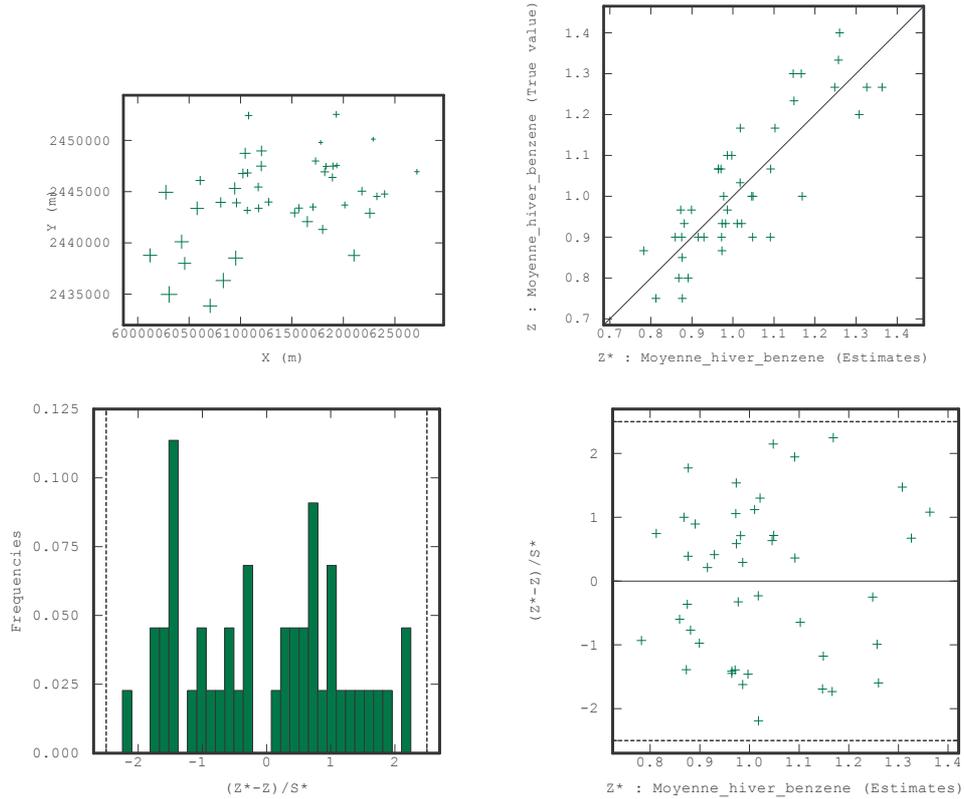
CAMPAGNE HIVERNALE

1 VARIOGRAMME EXPERIMENTAL ET MODELISE

44 points ont été conservés sur un total de 49. Le variogramme choisi est omnidirectionnel selon 11 pas de 1350 m (un modèle bidirectionnel a également été testé, sans incidence significative sur l'estimation). Le modèle retenu est la somme d'un effet pépité (0,004) et d'un modèle cubique (30 km ; 0,04).



2 VALIDATION CROISEE

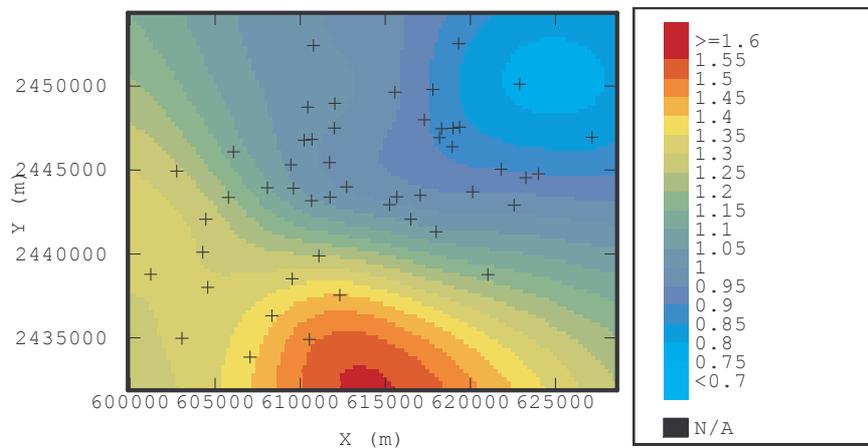


Toutes les données sont robustes.

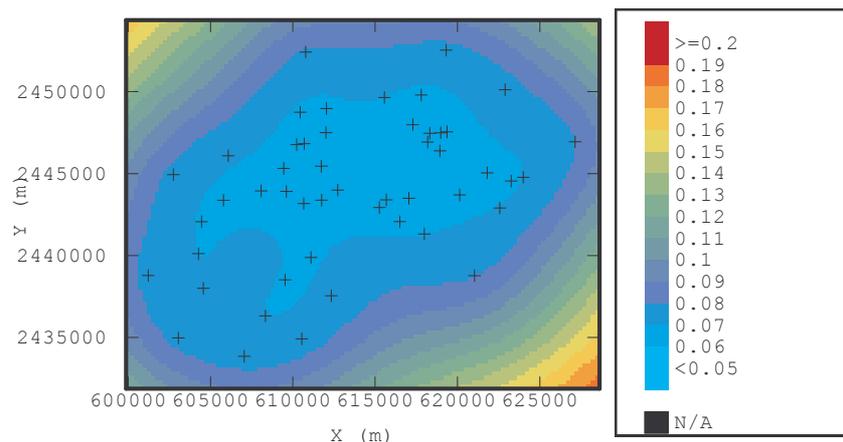
44 points	Moyenne	Variance
Erreur	0,00059	0,00831
Erreur standardisée	0,00277	1,44008

3 INTERPOLATION PAR KRIGEAGE SUR UNE GRILLE DE 250 × 250 M

3.1 Carte des estimations de benzène



3.2 Carte des écarts-types de krigeage



⊗ **Conclusion** : les campagnes de mesures menées en 2002 autour des aéroports de Roissy-Charles de Gaulle et du Bourget ont mis en évidence une pollution au benzène liée principalement au trafic routier généré par les activités aéroportuaires et à l'influence des émissions de l'agglomération parisienne. L'étude géostatistique reflète la prédominance du transport moyenne distance en provenance de cette agglomération avec une portée de 12,5 km environ pour les 2 saisons.

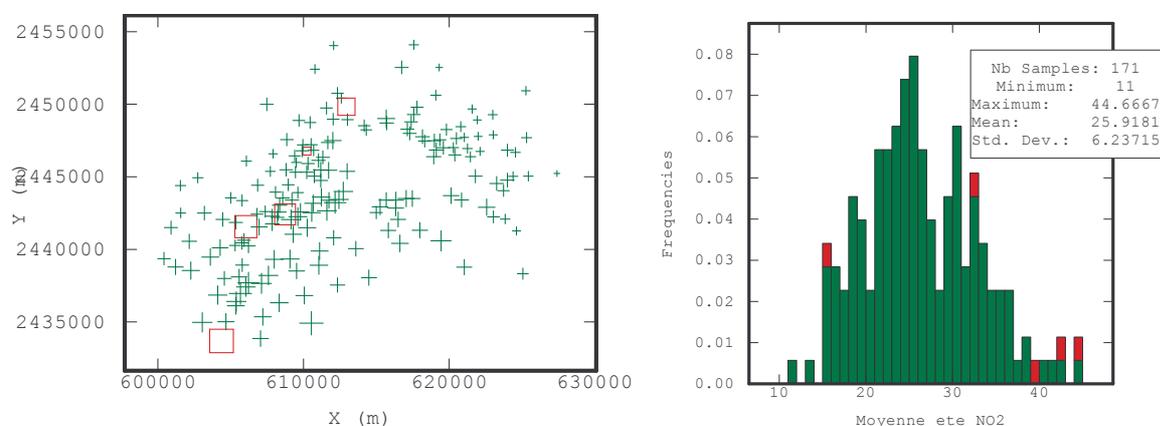
Etude de la portée du phénomène

NO₂

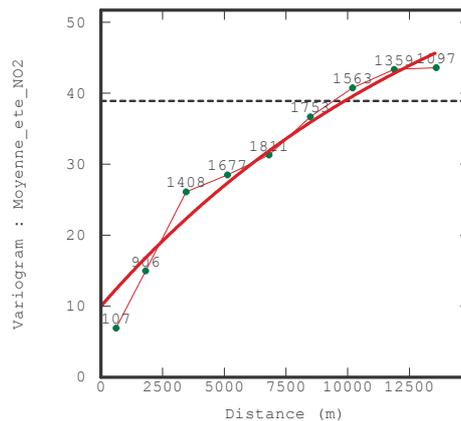
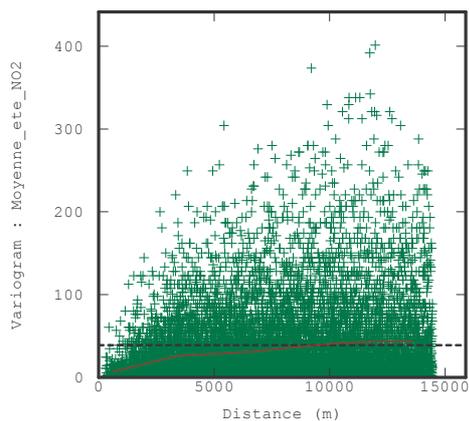
CAMPAGNE ESTIVALE

1 VARIOGRAMME EXPERIMENTAL ET MODELISE

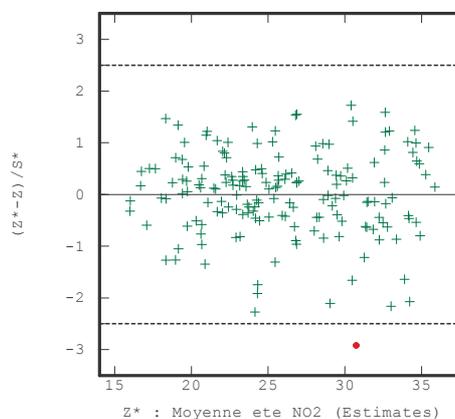
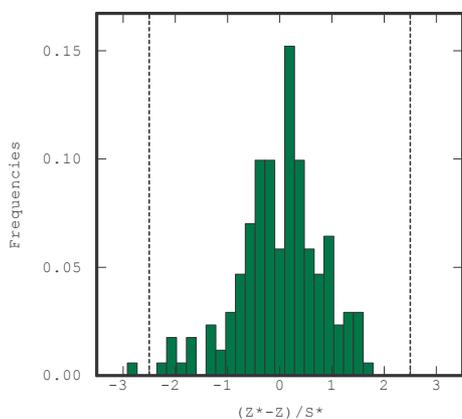
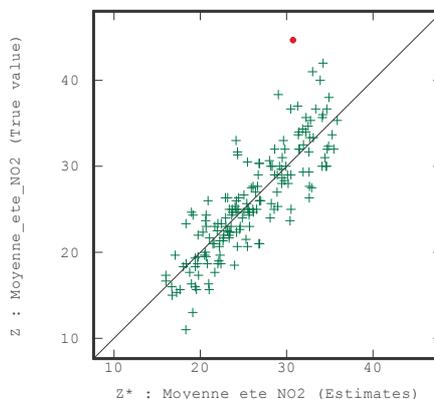
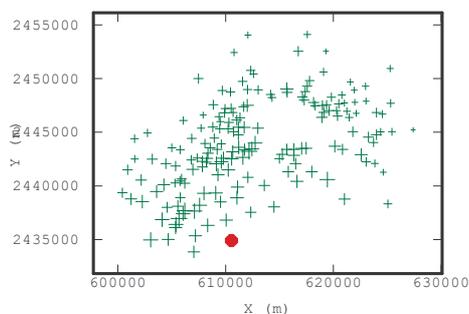
171 points ont été conservés sur un total de 176.



Le variogramme choisi est omnidirectionnel selon 9 pas de 1700 m. Le modèle retenu est la somme d'un effet pépité (10) et d'un modèle exponentiel (45 km ; 60).



2 VALIDATION CROISEE



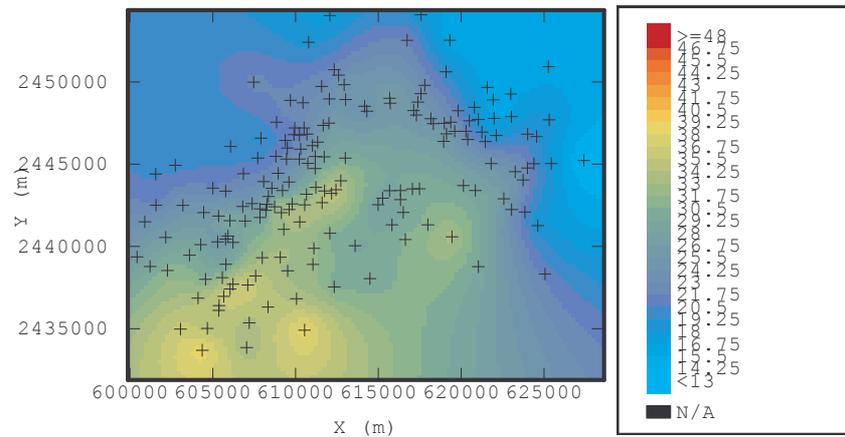
1 donnée est non robuste.

170 points	Moyenne	Variance
Erreur	0,09404	9,94275
Erreur standardisée	0,01868	0,62090

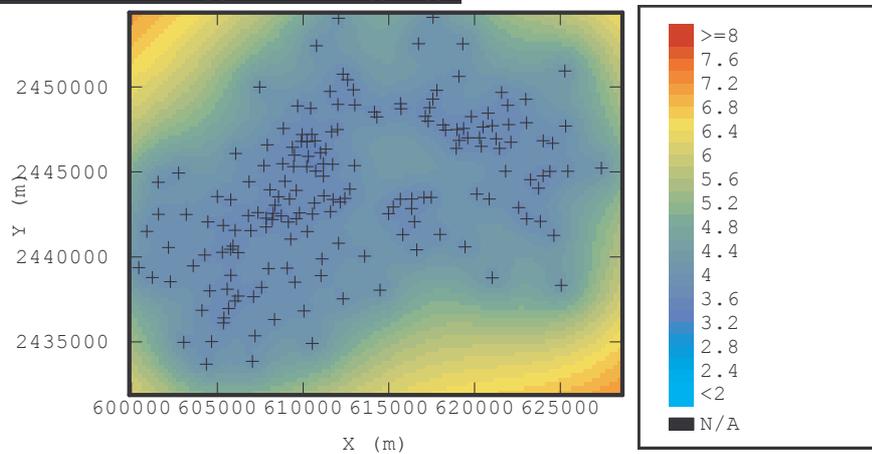
Plusieurs doubles structures de variogramme ont également été testées mais la robustesse de ces modèles s'est avérée moins bonne qu'avec une structure simple.

3 INTERPOLATION PAR KRIGEAGE SUR UNE GRILLE DE 250 x 250 M

3.1 Carte des estimations de NO₂



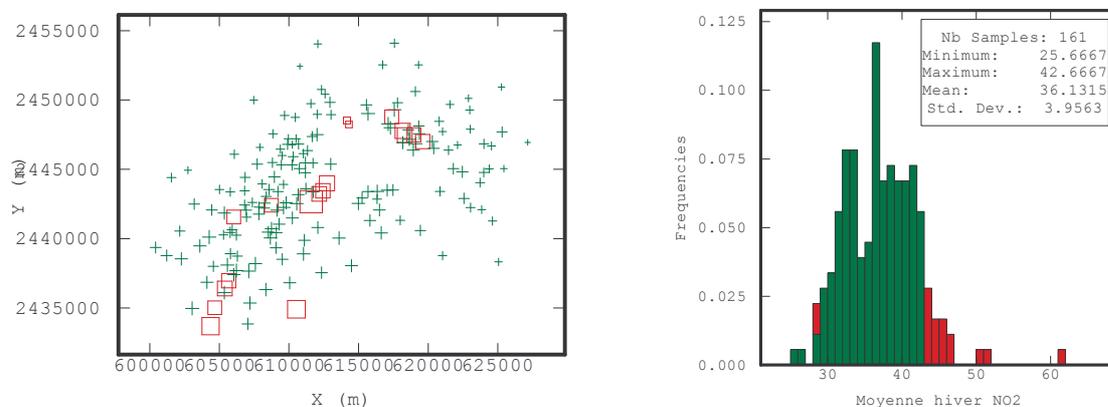
3.2 Carte des écarts-types de krigeage



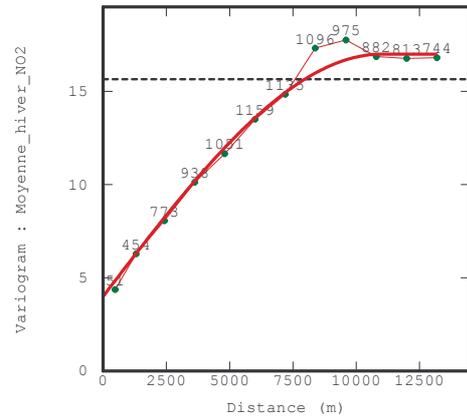
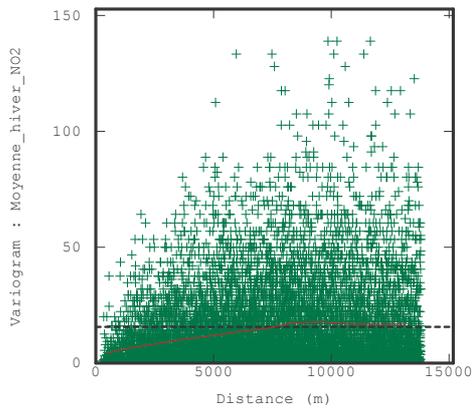
CAMPAGNE HIVERNALE

1 VARIOGRAMME EXPERIMENTAL ET MODELISE

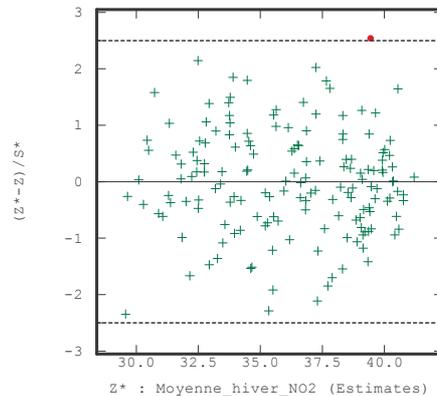
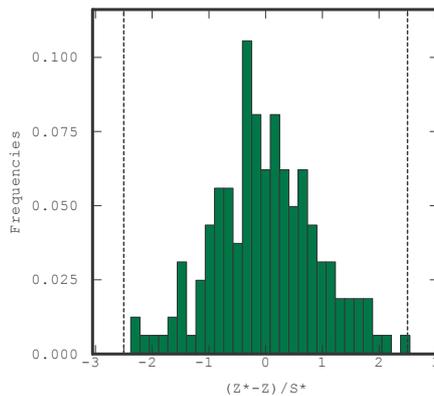
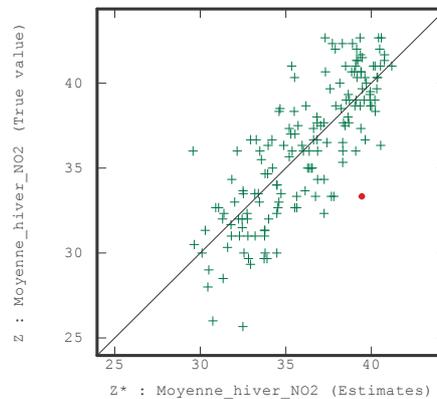
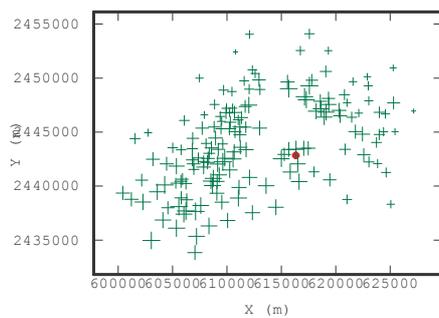
161 points ont été conservés sur un total de 179.



Le variogramme choisi est omnidirectionnel selon 12 pas de 1200 m. Le modèle retenu est la somme d'un effet pépite (4) et d'un modèle sphérique (11 km ; 13).



2 VALIDATION CROISEE

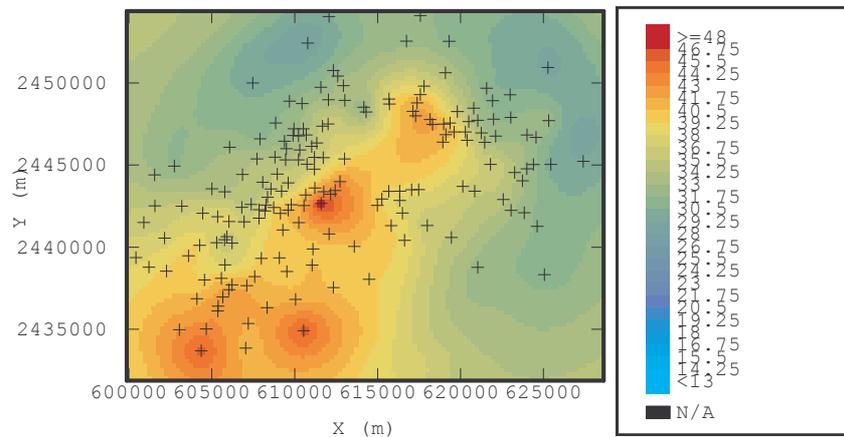


1 donnée est non robuste.

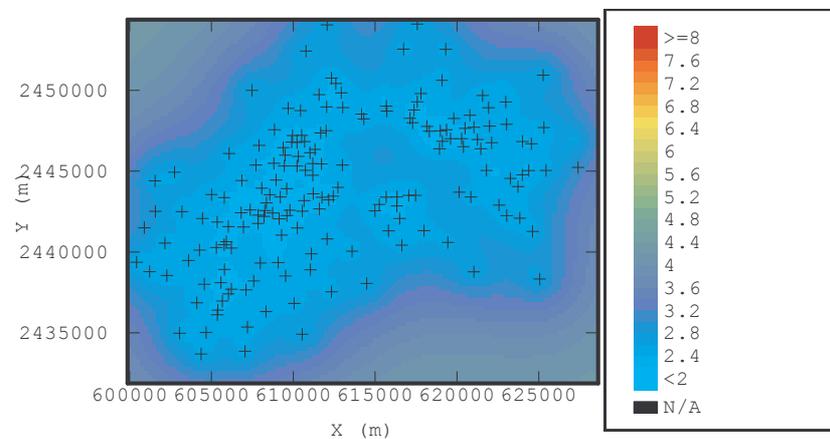
160 points	Moyenne	Variance
Erreur	-0,00587	5,39081
Erreur standardisée	-0,01030	0,81454

3 INTERPOLATION PAR KRIGEAGE SUR UNE GRILLE DE 250 × 250 M

3.1 Carte des estimations de NO₂



3.2 Carte des écarts-types de krigeage

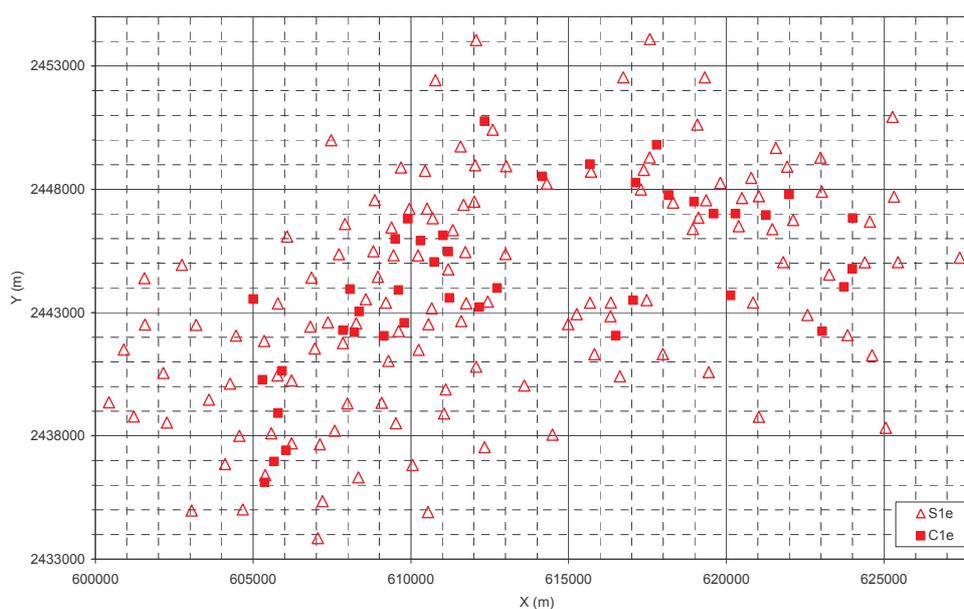
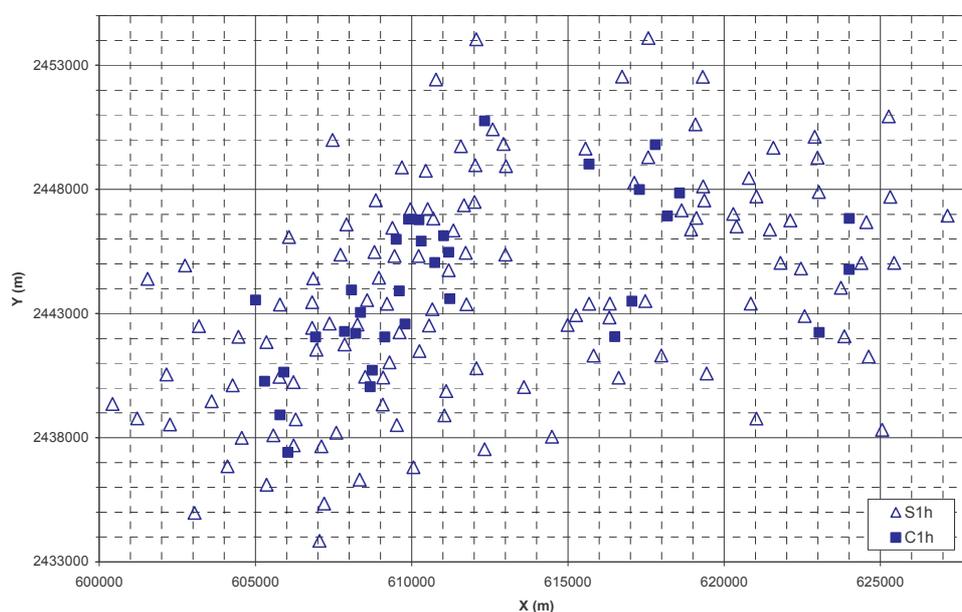


☒ Conclusion : les zones présentant des teneurs plus élevées d'après l'estimation géostatistique correspondent à des intersections de grands axes contournant l'agglomération parisienne ou rejoignant la zone aéroportuaire : Porte de la Villette, intersection N3/A3/A86, intersection A3/A104 avec la ZAC de Paris Nord 2. On observe également des valeurs plus élevées au nord-est de l'aéroport de Roissy, sans pouvoir déterminer s'il s'agit d'une influence locale liée à l'activité de l'aéroport ou d'un report du transport moyenne distance, la zone même de l'aéroport n'étant pas renseignée.

La portée du phénomène est de l'ordre de 10 km en été, et 7,5 km en hiver.

Pour les deux saisons, les données ont été sélectionnées selon un maillage carré régulier de 1 km de côté ; cette sélection sera notée S1i, avec i = e (été) ou h (hiver). A chaque sélection correspond un jeu de données complémentaires (non sélectionnées), appelé C1i.

Pour constituer chaque sélection, le maillage a été calé sur le domaine d'étude et le point le plus proche du centre de la maille a été choisi. Compte tenu de l'échantillonnage de départ, cela revient principalement à dé-densifier les zones proches des aéroports (bouts de pistes).



Les caractéristiques statistiques des différents jeux de données sont rassemblées dans le tableau suivant.

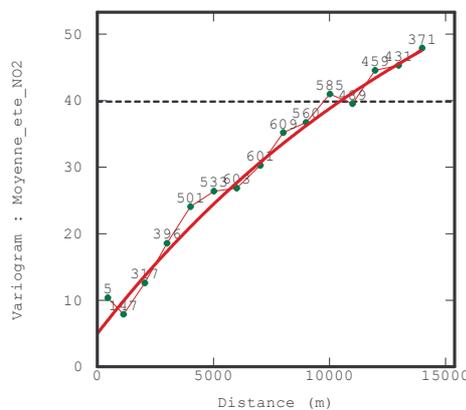
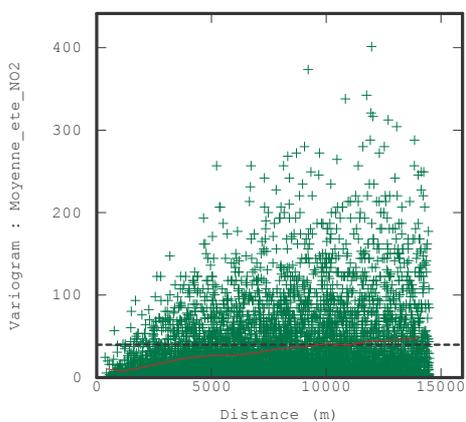
Tableau - Caractéristiques statistiques des jeux de données étudiés

	Eté				Hiver			
	J _{0e}	J _{1e}	S _{1e}	C _{1e}	J _{0h}	J _{1h}	S _{1h}	C _{1h}
Nombre de données	176	171	130	41	179	161	127	34
Minimum	11,0	11,0	11,0	15,3	25,7	25,7	25,7	29,7
Percentile 25	21,7	21,7	21,3	22,3	33,3	33,0	32,8	33,5
Médiane	25,0	25,0	25,0	25,0	36,7	36,3	36,5	36,0
Percentile 75	30,4	30,0	30,0	30,3	40,3	39,3	39,3	39,7
Maximum	44,7	44,7	44,7	42,0	61,3	42,7	42,7	42,3
Etendue	33,7	33,7	33,7	26,7	35,6	17,0	17,0	12,6
Moyenne	26,2	25,9	25,7	26,5	37,0	36,1	36,1	36,4
Ecart-type	6,6	6,2	6,3	6,0	5,0	4,0	4,1	3,4
Variance	43,2	38,9	39,9	35,4	25,2	15,7	16,7	11,7
CV%	25	24	25	22	14	11	11	9

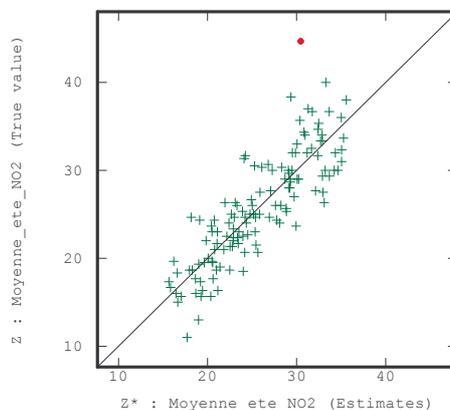
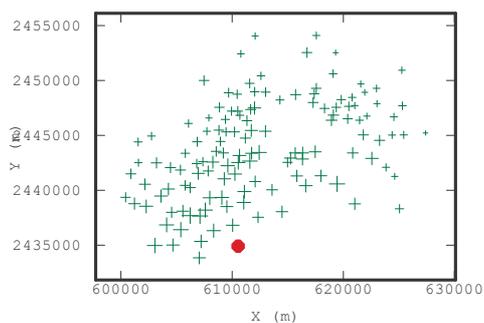
CAMPAGNE ESTIVALE

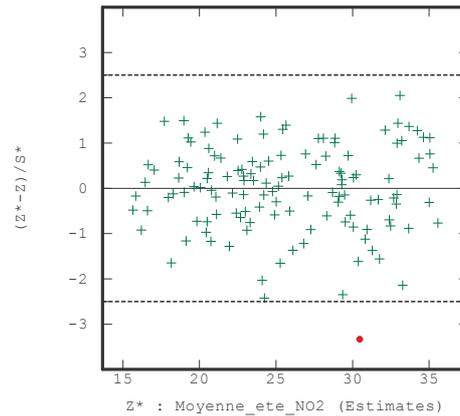
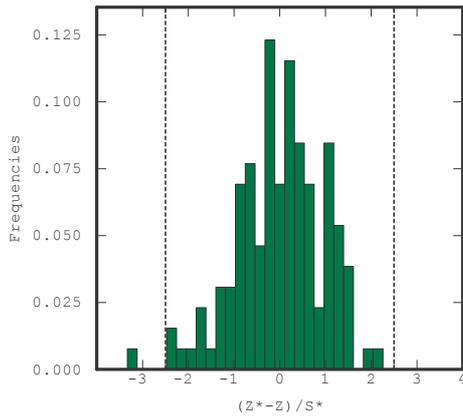
1 VARIOGRAMME EXPERIMENTAL ET MODELISE

Tous les points ont été conservés. Le variogramme choisi est omnidirectionnel avec 15 pas de 1000 m. Le modèle retenu est la somme d'un effet pépité (5) et d'un modèle sphérique (50 km ; 75).



2 VALIDATION CROISEE ET TEST SUR LE COMPLEMENTAIRE

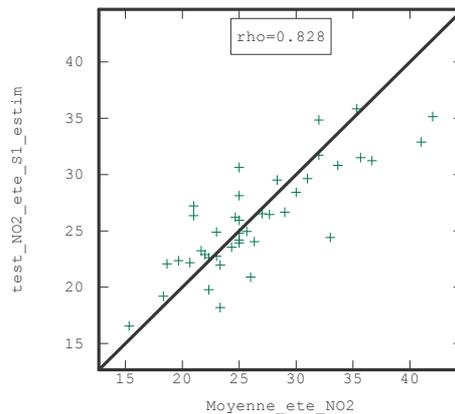




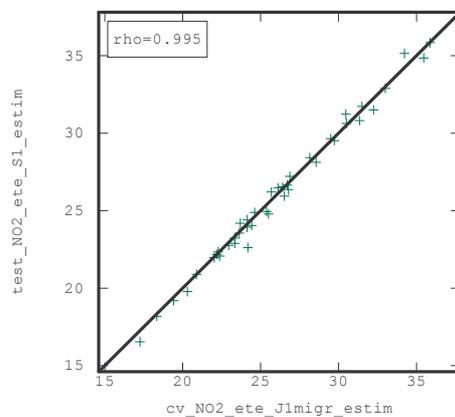
1 donnée est non robuste.

129 points	Moyenne	Variance
Erreur	0,10402	9,91806
Erreur standardisée	0,02514	0,83564

On teste le modèle de variogramme pour estimer les concentrations de NO₂ aux points complémentaires du jeu C1e.



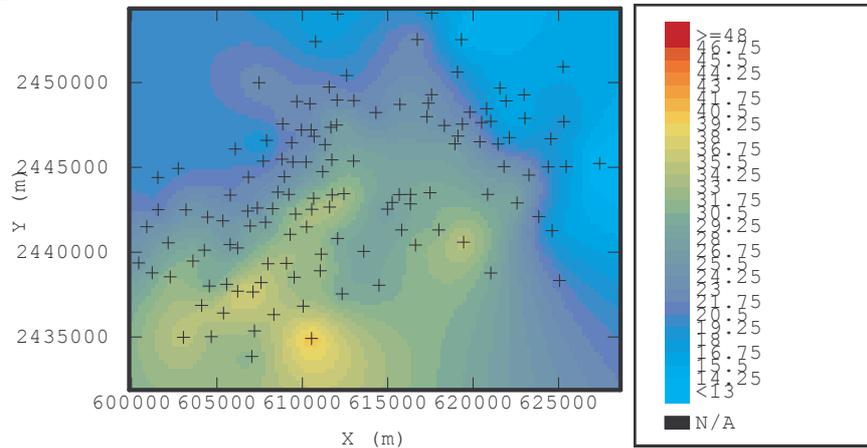
On peut ensuite comparer les valeurs obtenues par krigeage à partir du jeu réduit à celles obtenues à partir de la validation croisée sur le jeu complet (J1e).



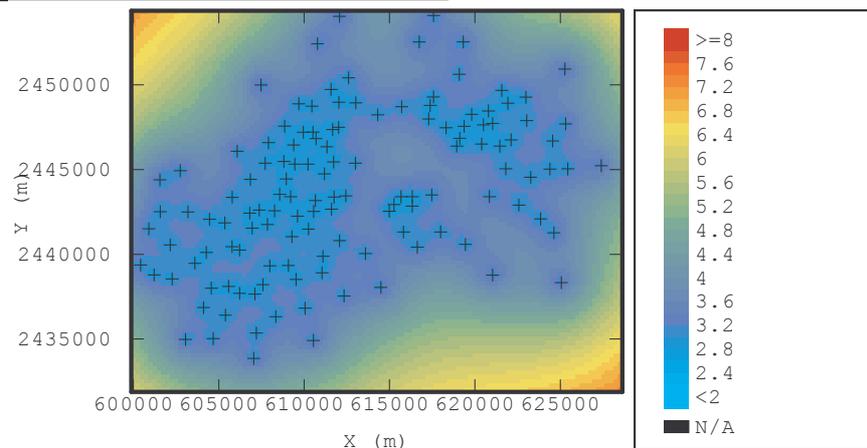
La très bonne corrélation observée indique une influence non significative de la dégradation du maillage sur l'estimation, ce qui est cohérent avec une influence négligeable à ce pas de temps d'échantillonnage des décollages/atterrissages sur les zones aéroportuaires.

3 INTERPOLATION PAR KRIGEAGE SUR UNE GRILLE DE 250 x 250 M

3.1 Carte des estimations de NO₂



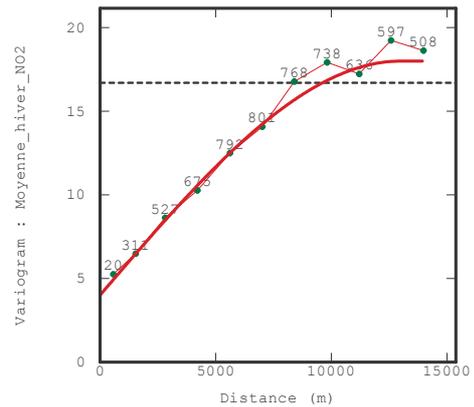
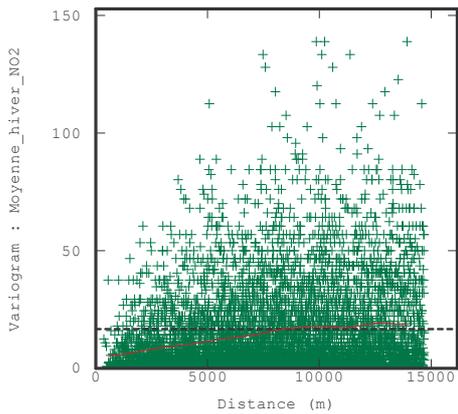
3.2 Carte des écarts-types de krigeage



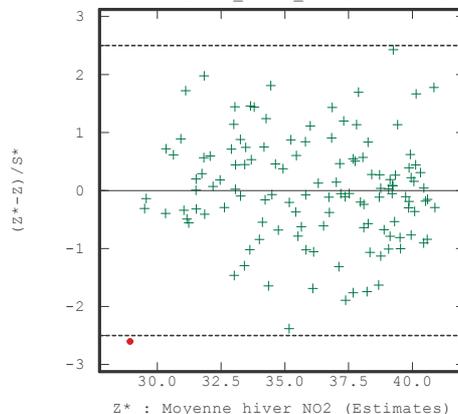
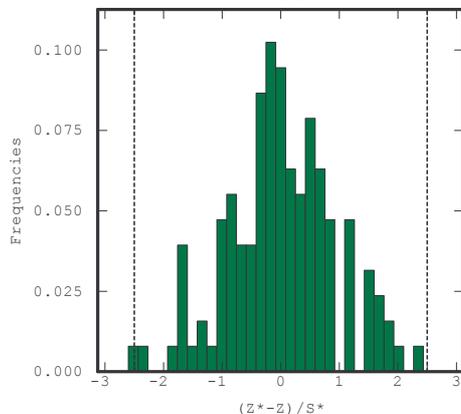
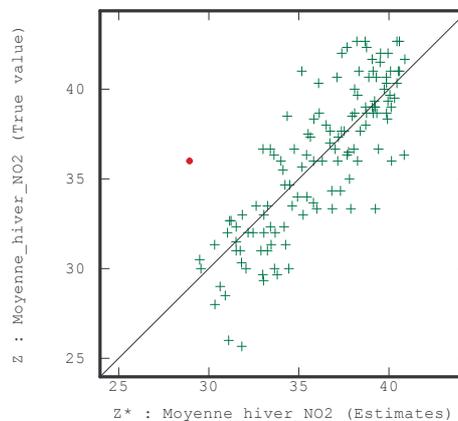
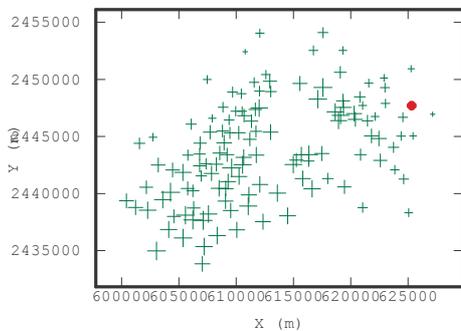
CAMPAGNE HIVERNALE

1 VARIOGRAMME EXPERIMENTAL ET MODELISE

Tous les points ont été conservés. Le variogramme choisi est omnidirectionnel avec 11 pas de 1400 m. Le modèle retenu est la somme d'un effet pépité (4) et d'un modèle sphérique (13 km ; 14).



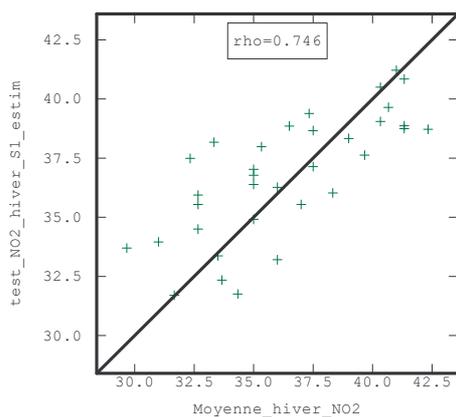
2 VALIDATION CROISEE ET TEST SUR LE COMPLEMENTAIRE



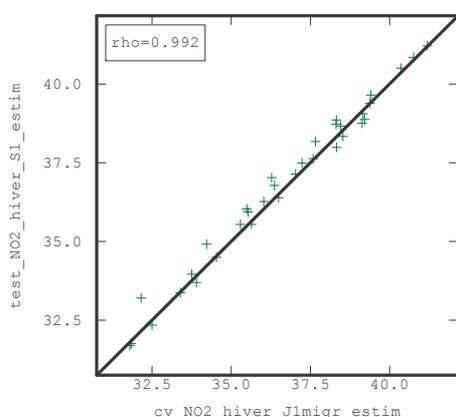
1 donnée est non robuste.

126 points	Moyenne	Variance
Erreur	0,08896	5,32615
Erreur standardisée	0,02640	0,78994

On teste le modèle de variogramme pour estimer les concentrations de NO₂ aux points complémentaires du jeu C1h.



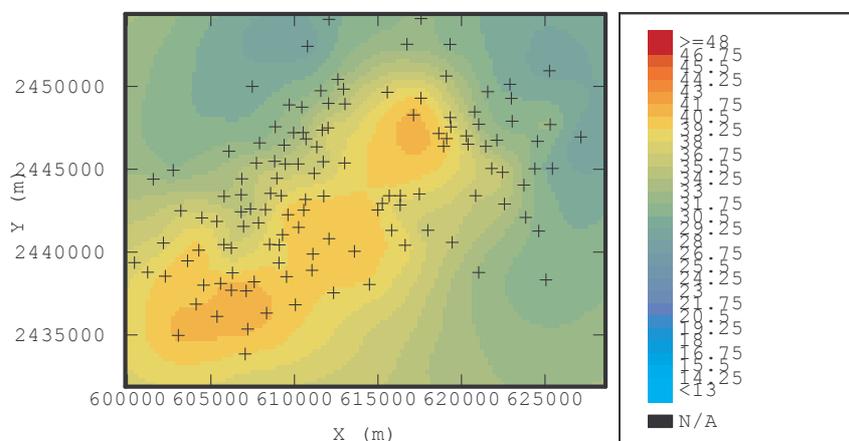
On peut ensuite comparer les valeurs obtenues aux points complémentaires, par krigeage à partir du jeu réduit à celles obtenues à partir de la validation croisée sur le jeu complet (J1h).



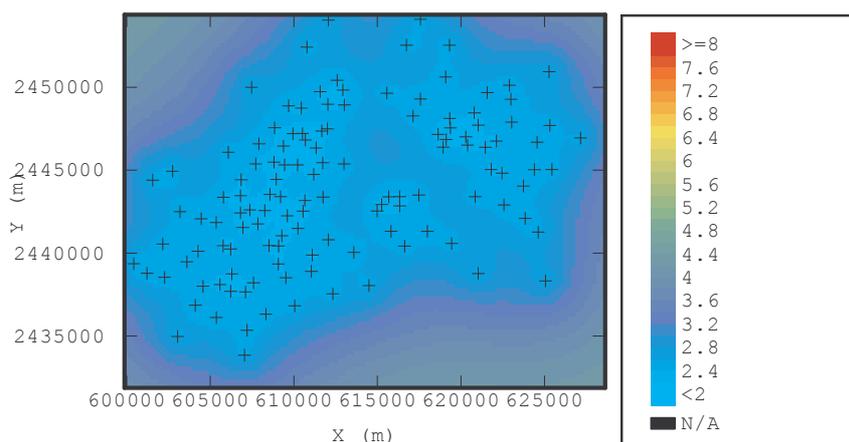
La conclusion est ici la même que pour la campagne estivale : les points en bouts de piste n'ont pas d'intérêt significatif pour l'estimation des concentrations au pas de temps considéré.

3 INTERPOLATION PAR KRIGEAGE SUR UNE GRILLE DE 250 × 250 M

3.1 Carte des estimations de NO₂



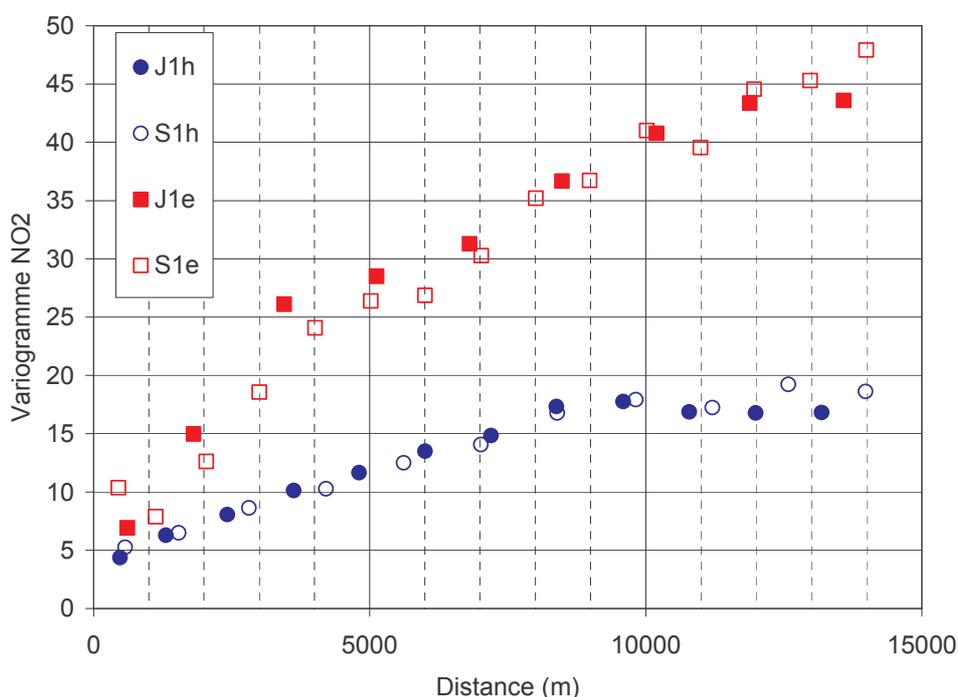
3.2 Carte des écarts-types de krigeage



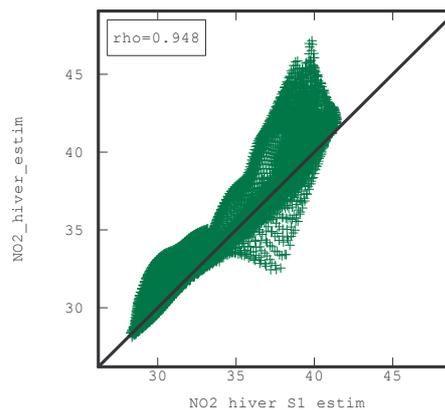
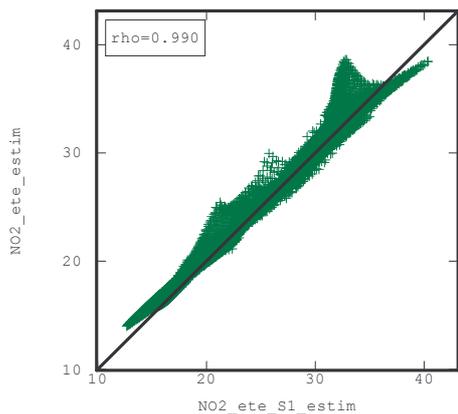
COMPARAISON ENTRE L'ESTIMATION DE REFERENCE ET LES ESTIMATIONS OBTENUES A PARTIR DES DIFFERENTES SELECTIONS

Les portées des variogrammes dégradés sont d'environ 10 km pour les deux saisons. Toutefois, on ne note pas de différence significative entre les variogrammes expérimentaux de référence et ceux pour lesquels le maillage a été dégradé.

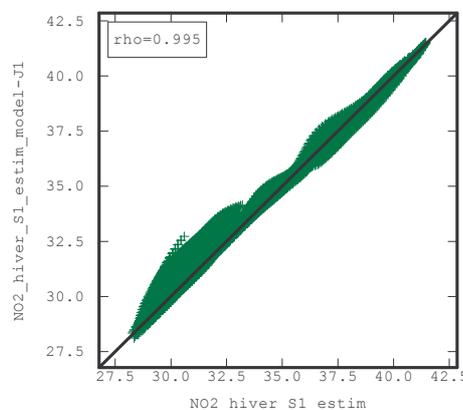
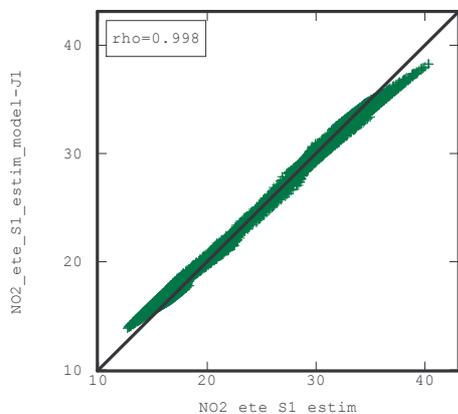
Comparaison des variogrammes de référence et dégradés pour les deux saisons



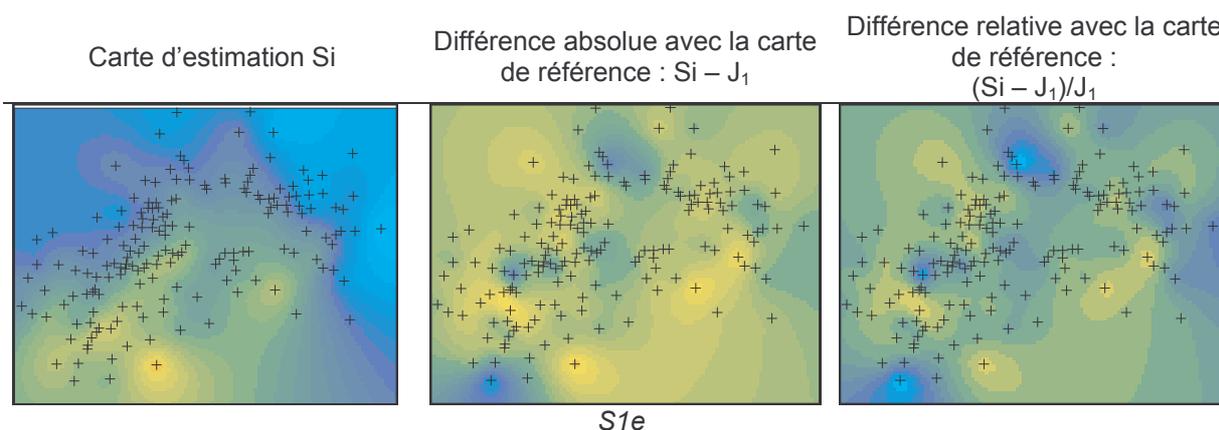
Si on représente les corrélations en tout point de la grille de référence entre les estimations obtenues avec le modèle de référence et avec les différentes sélections, on observe une bonne corrélation pour la saison estivale. En revanche, les concentrations hivernales les plus fortes apparaissent globalement légèrement sous-estimées avec le modèle dégradé.

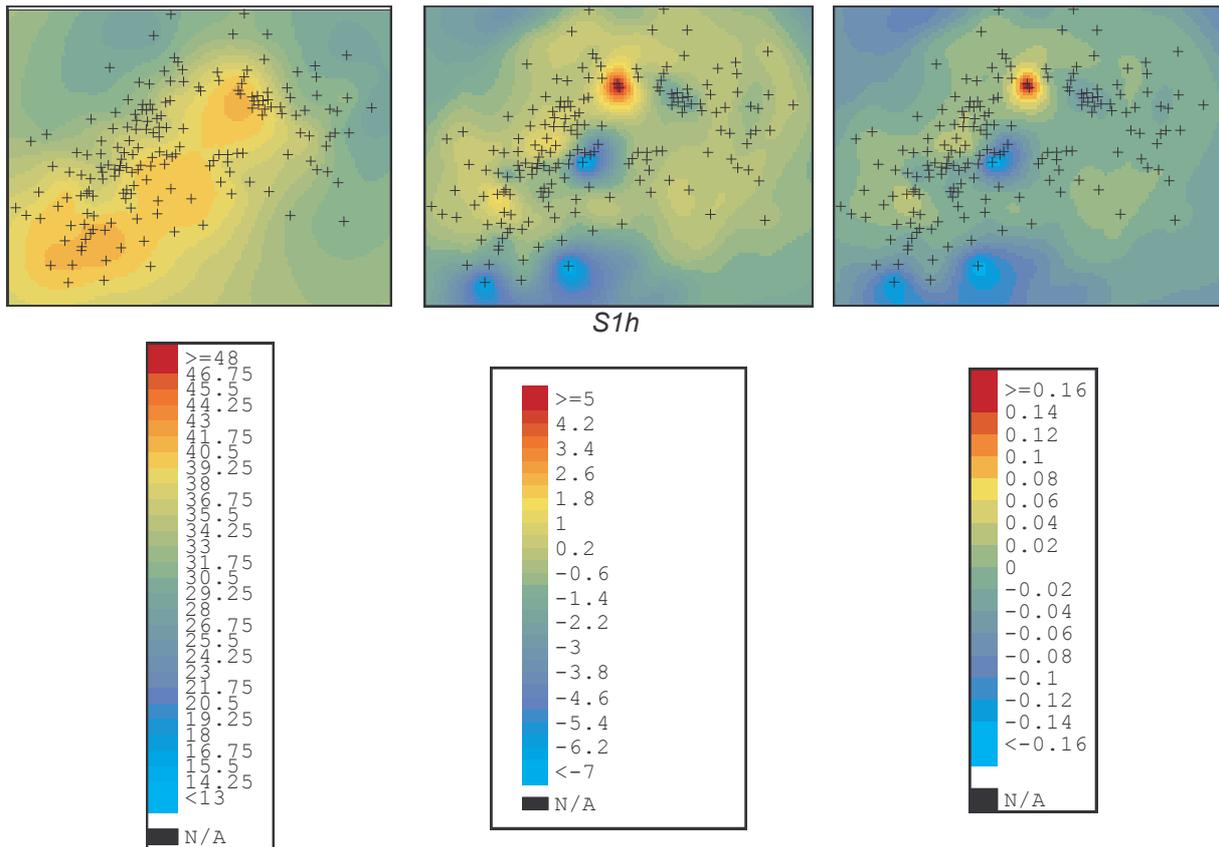


Pour évaluer la robustesse du modèle de référence, on représente également les corrélations entre les estimations calculées à partir du modèle de la sélection et à partir du modèle de référence pour le même jeu de données.



Finalement, à partir de la carte de référence et des cartes de krigeage des différentes sélections, on peut calculer les différences absolue et relative avec la carte de référence.





Logiquement, ce sont les points présentant les concentrations les plus faibles ou les plus fortes de la zone qui sont moins bien estimés avec l'échantillonnage dégradé. Cependant, l'estimation reste acceptable puisqu'elle ne dépasse pas 16%.

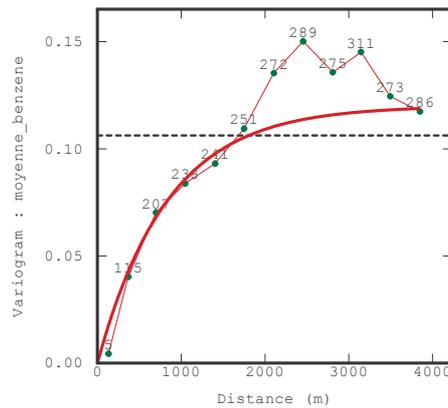
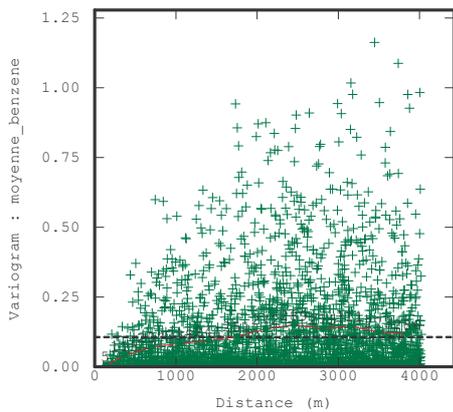
⊗ Conclusion : Compte tenu de la fréquence d'échantillonnage, les conclusions de cette étude rejoignent celles de l'aéroport d'Orly : le resserrement de l'échantillonnage spatial dans le prolongement des pistes n'apporte pas d'informations pertinentes pour mesurer l'influence du trafic aérien sur les concentrations de la zone.

Par ailleurs, l'étude variographique a montré que sur cette zone, les activités aéroportuaires ne constituaient pas des sources de NO₂ et de benzène significatives, mais bien que les concentrations en polluants étaient liées au trafic local (présence de grands axes autoroutiers générant localement de fortes concentrations) et au transport moyenne distance en provenance du centre de l'agglomération parisienne. Dans ces conditions, le passage d'un échantillonnage circulaire centré sur les zones aéroportuaires (avec des cercles distants de 500 m jusqu'à 2 km et de 1 km au-delà) correspondant à l'échantillonnage de référence, à un maillage carré (mailles de 1 km de côté) correspondant à l'échantillonnage dégradé, permet de conserver une bonne estimation (différence maximale d'environ 16%) des valeurs de concentration en NO₂ sur l'ensemble de la zone.

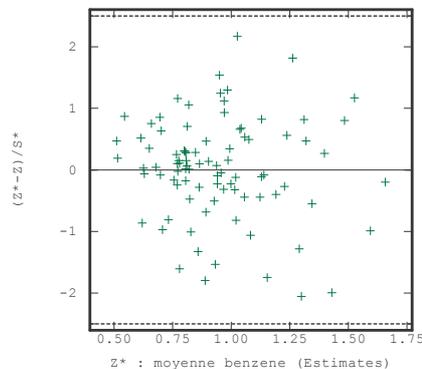
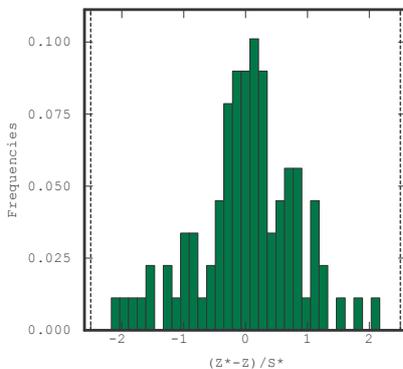
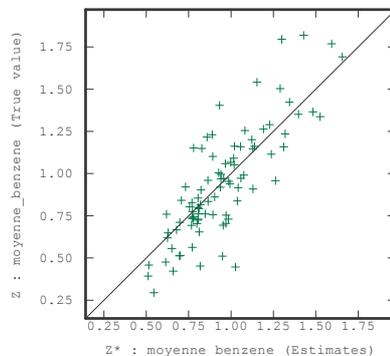
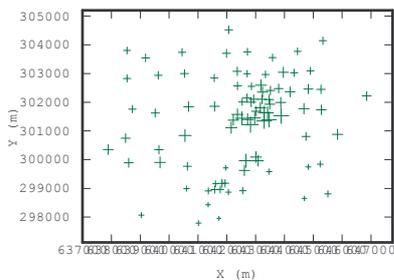
CAMPAGNE 2001

1 VARIOGRAMME EXPERIMENTAL ET MODELISE

89 points ont été conservés sur un total de 103. Le variogramme choisi est omnidirectionnel selon 12 pas de 350 m. Le modèle retenu est un modèle exponentiel (2500 m ; 0,12).



2 VALIDATION CROISEE

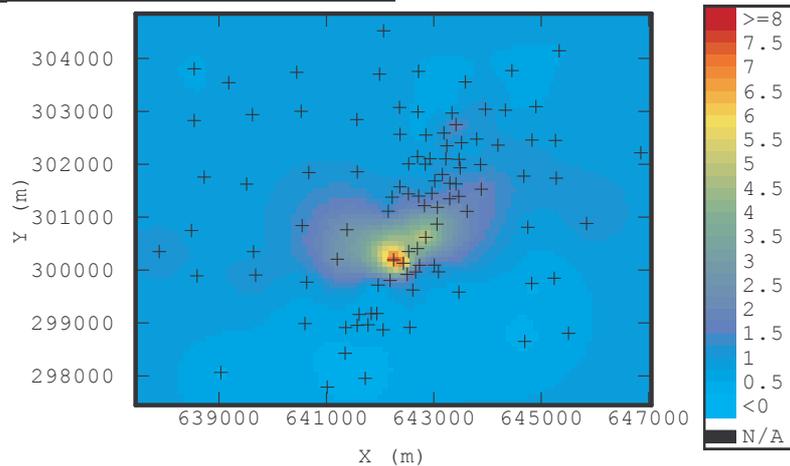


Toutes les données sont robustes.

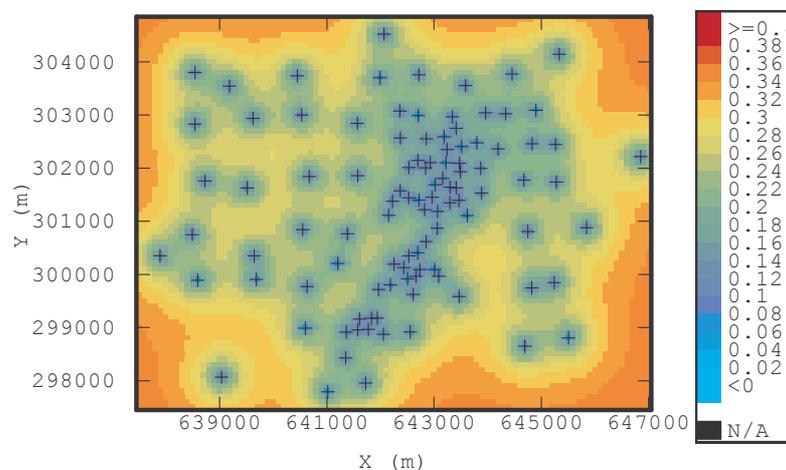
89 points	Moyenne	Variance
Erreur	0,00987	0,03560
Erreur standardisée	0,02171	0,66744

3 INTERPOLATION PAR KRIGEAGE SUR UNE GRILLE DE 100 × 100 M

3.1 Carte des estimations de benzène



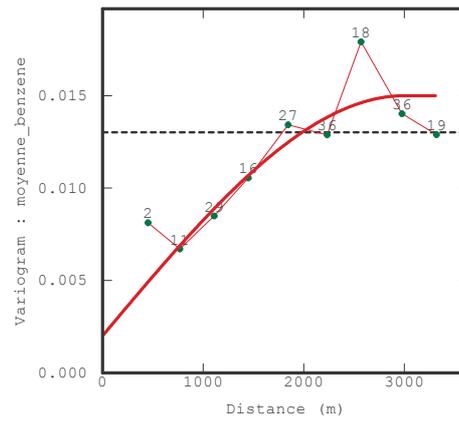
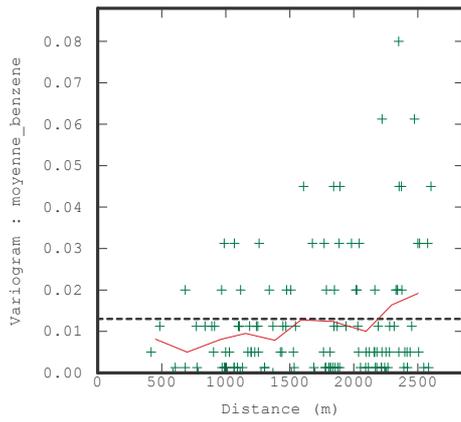
3.2 Carte des écarts-types de krigage



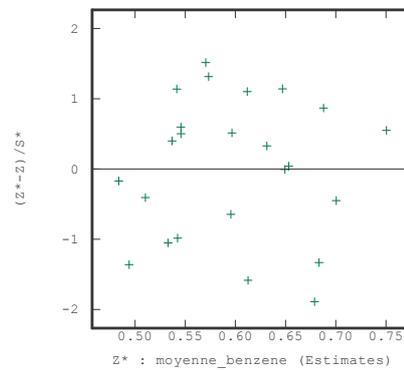
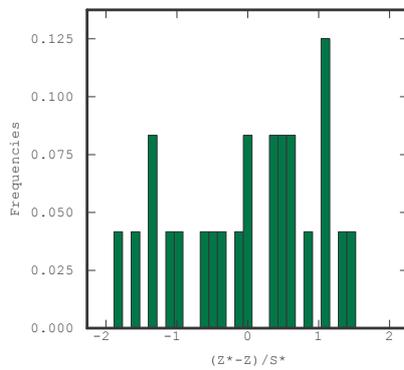
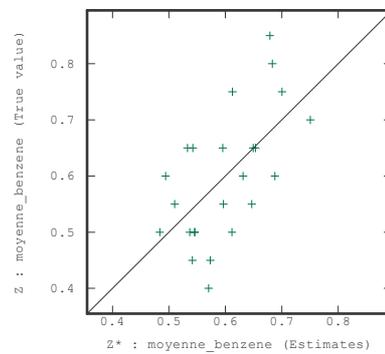
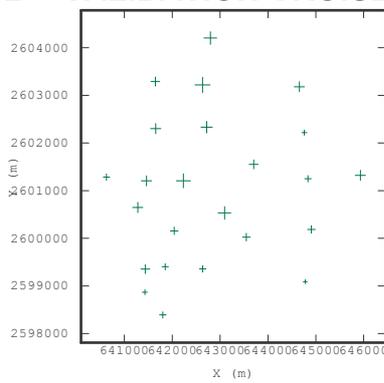
CAMPAGNE 2002

1 VARIOGRAMME EXPERIMENTAL ET MODELISE

24 points ont été conservés sur un total de 40. Le variogramme choisi est omnidirectionnel selon 10 pas de 370 m. Le modèle retenu comprend un effet pépite (0,002) et un modèle sphérique (3000 m ; 0,013).



2 VALIDATION CROISEE

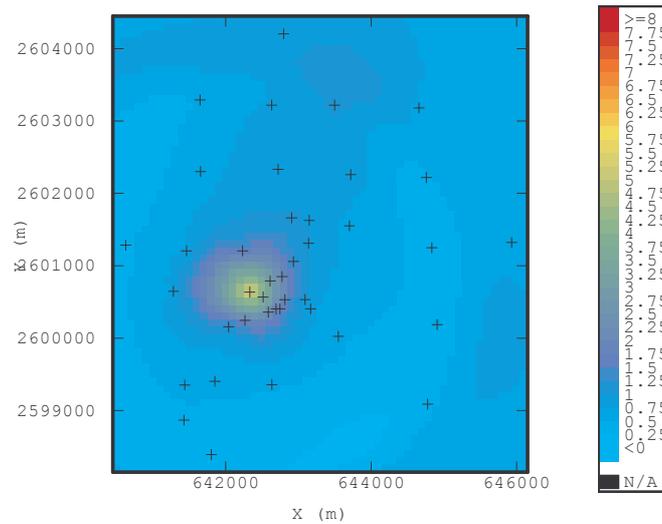


Toutes les données sont robustes.

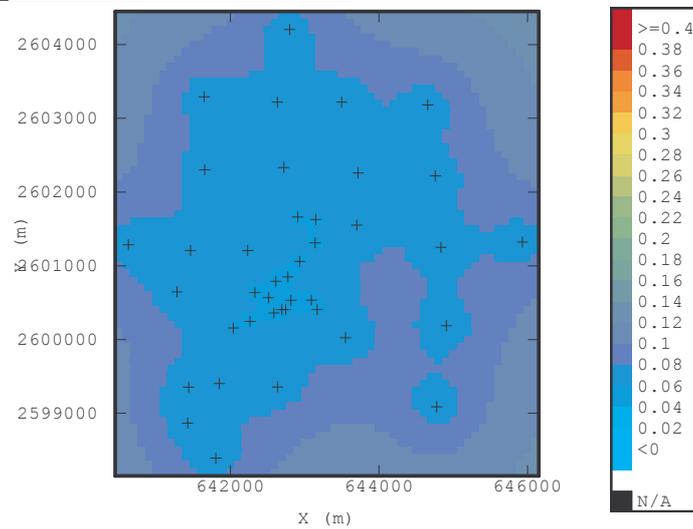
24 points	Moyenne	Variance
Erreur	0,00102	0,00829
Erreur standardisée	0,00571	0,94313

3 INTERPOLATION PAR KRIGEAGE SUR UNE GRILLE DE 100 × 100 M

3.1 Carte des estimations de benzène



3.2 Carte des écarts-types de krigeage

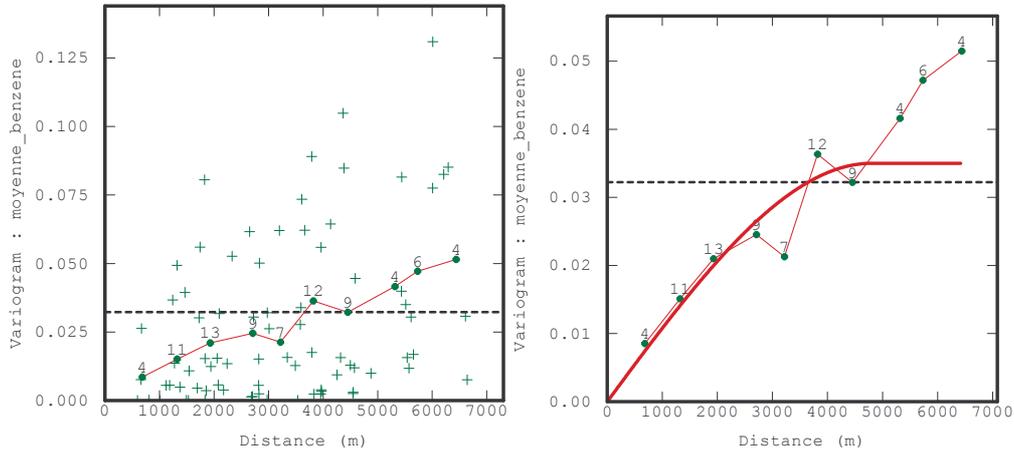


ANNEXE 5 : Zone Industrielle du Havre

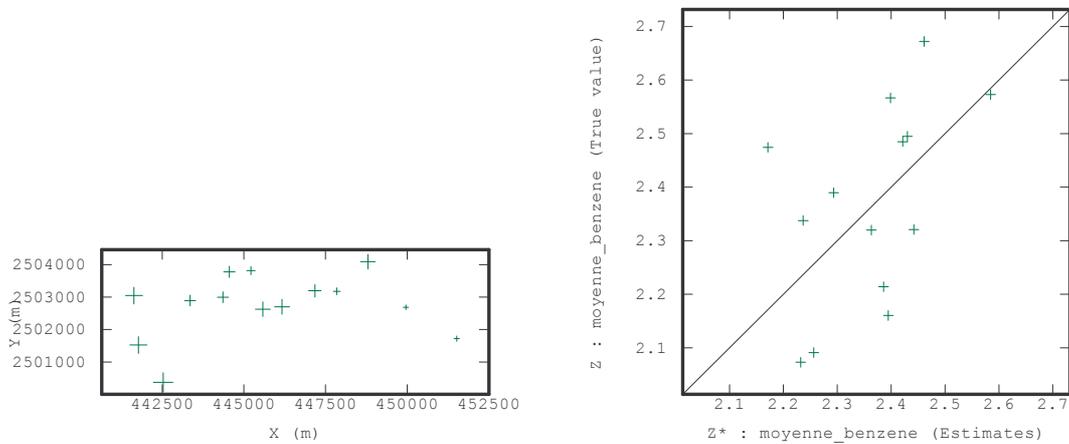
Benzène

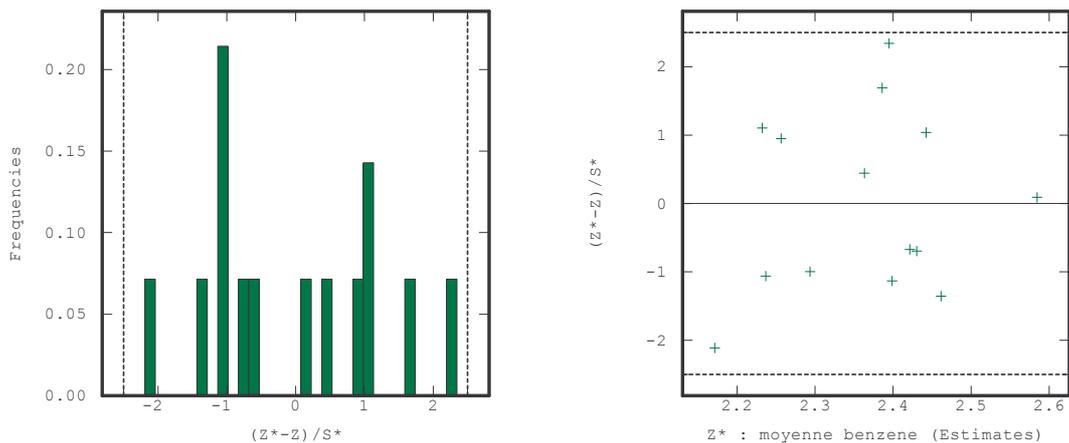
1 VARIOGRAMME EXPERIMENTAL ET MODELISE

14 points ont été conservés sur un total de 27. Le modèle retenu est un modèle sphérique (4800 m ; 0,035).



2 VALIDATION CROISEE



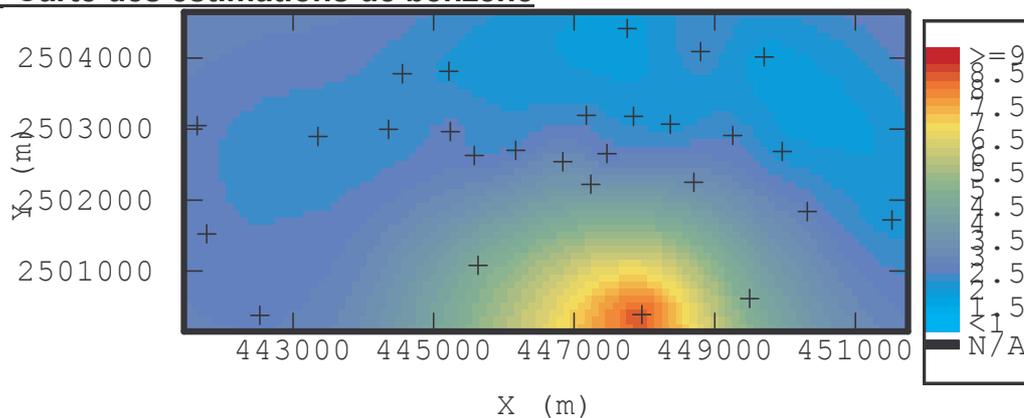


Le modèle est robuste.

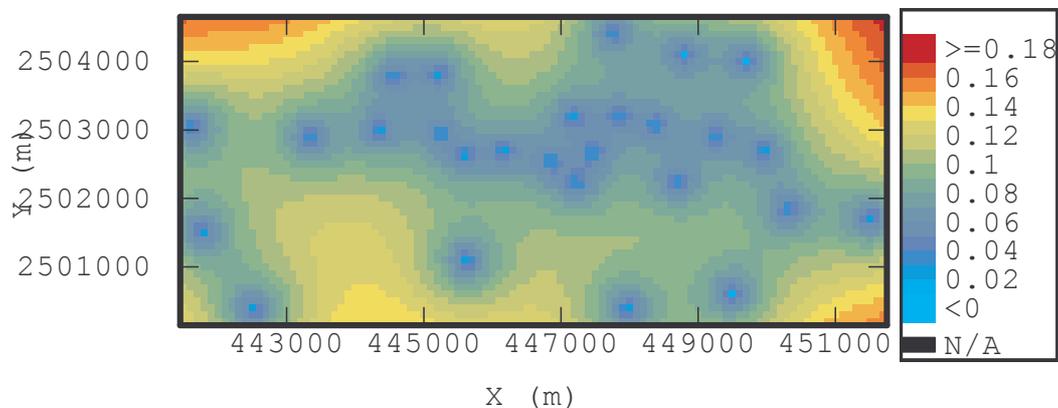
14 points	Moyenne	Variance
Erreur	-0,00708	0,02466
Erreur standardisée	-0,02644	1,59953

3 INTERPOLATION PAR KRIGEAGE SUR UNE GRILLE DE 100 × 100 M

3.1 Carte des estimations de benzène



3.2 Carte des écarts-types de krigeage



CAMPAGNE 2001

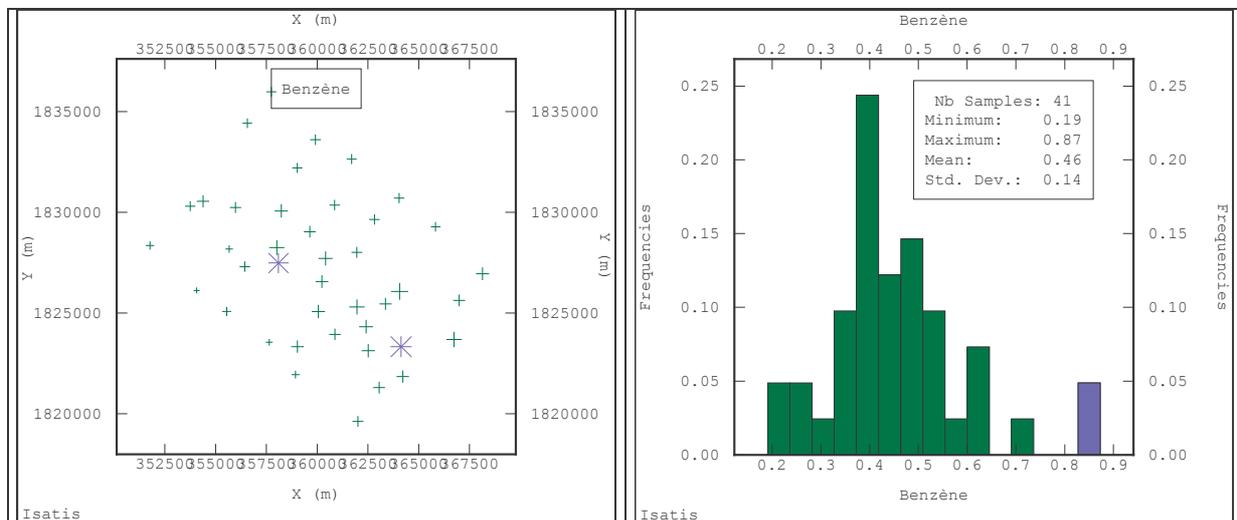
Afin d'améliorer la connaissance de la variabilité spatio-temporelle des BTEX, une étude a été menée du 2 au 30 mai par AIRAQ sur le bassin de Lacq. Au total, 43 sites ont été équipés de tubes passifs permettant d'évaluer la teneur en benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes dans l'air ambiant. L'échantillonnage repose sur un maillage (les sites sont distants de 1,5 à 2 km environ), avec des resserrements locaux près des sources industrielles ou routières.

Pour chaque polluant, AIRAQ a établi une cartographie par cokrigage avec l'altitude. Les résultats de calcul sont consignés dans le rapport d'étude [40].

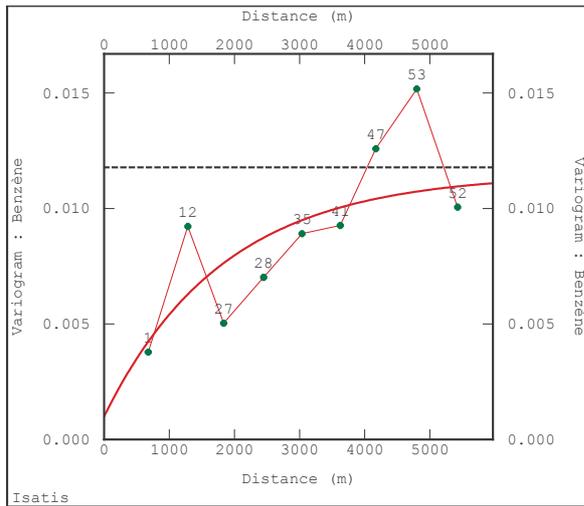
Le nombre de données disponibles ne permettant pas une dégradation du maillage, nous nous limitons à présenter une analyse du variogramme pour le benzène.

4 VARIOGRAMME EXPERIMENTAL ET MODELISE

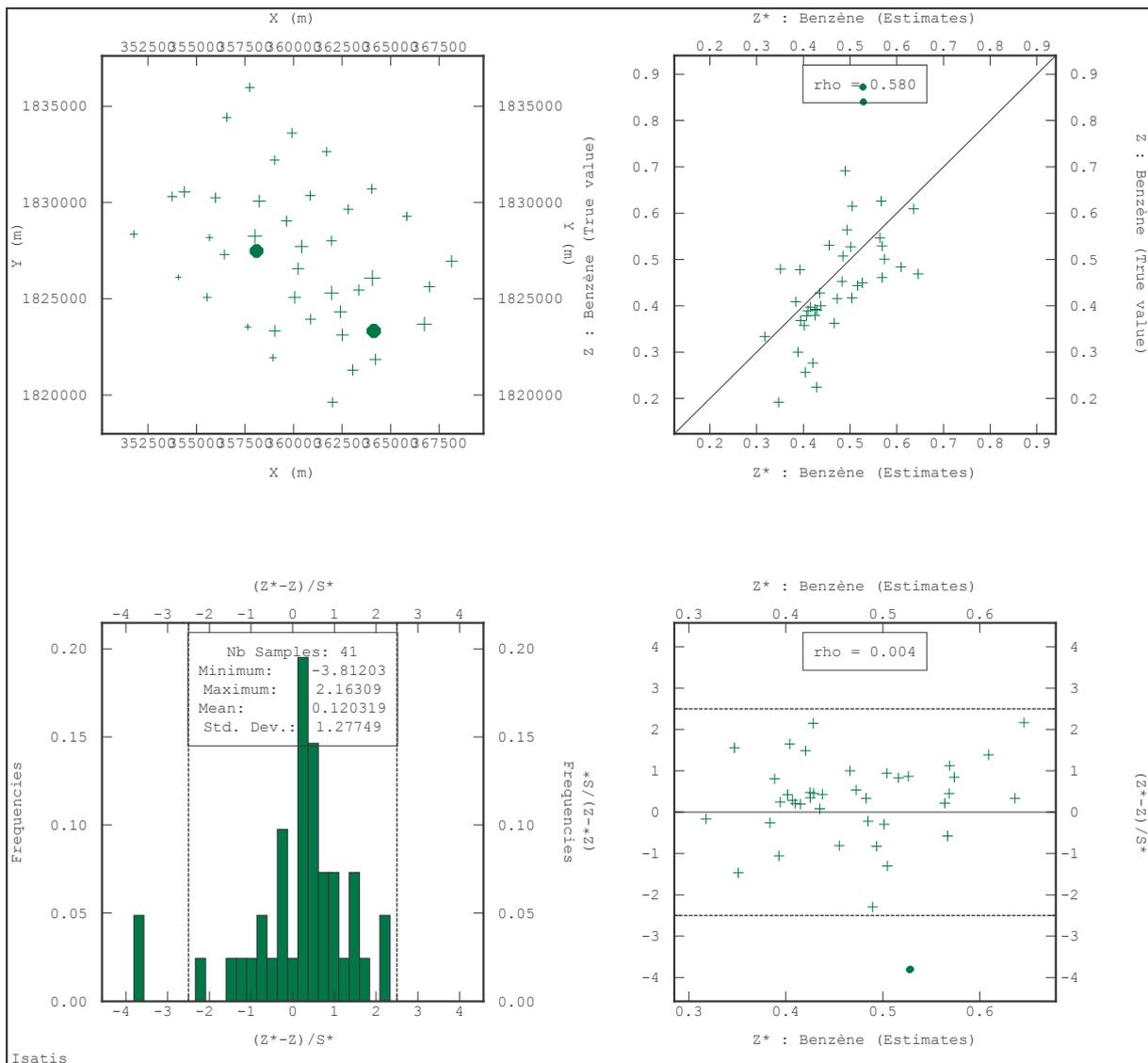
Comparativement aux études précédentes, les niveaux de concentration mesurés sont faibles. Pour la construction du variogramme, 39 points ont été conservés sur un total de 41. Deux données (F25 et F29) s'écartent en effet sensiblement de la distribution des concentrations :



Le variogramme expérimental choisi est omnidirectionnel ; il a été calculé selon 10 pas de 600 m. Le modèle de variogramme retenu combine un effet de pépité (0,001) et un modèle exponentiel (5500 m ; 0,0105).



5 VALIDATION CROISEE



Sans F25 et F29, toutes les données sauf une sont robustes.

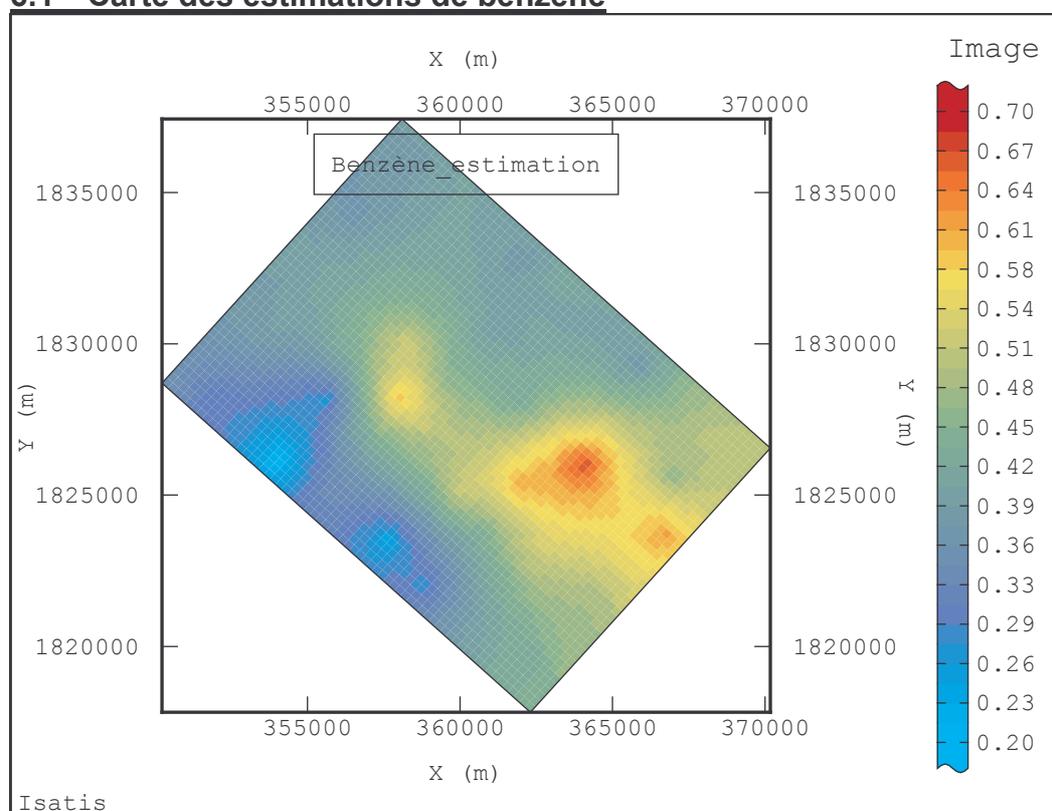
39 points	Moyenne	Variance
Erreur	0.00829	0.00825
Erreur standardisée	0.07240	0.98869

Avec F25 et F29 , toutes les données sauf deux sont robustes.

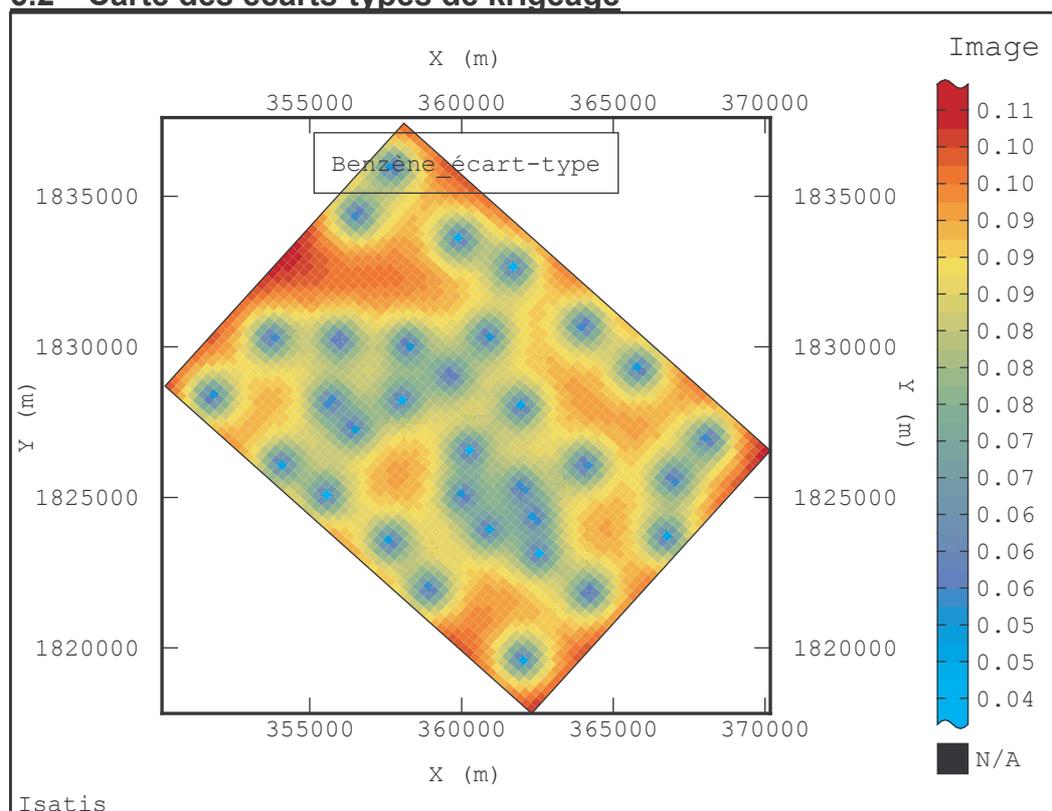
41 points	Moyenne	Variance
Erreur	0.01357	0.01287
Erreur standardisée	0.12032	1.63199

6 INTERPOLATION PAR KRIGEAGE SUR UNE GRILLE DE MAILLE 250 M × 250 M

6.1 Carte des estimations de benzène



6.2 Carte des écarts-types de krigeage



7 CONCLUSION

Les concentrations de benzène mesurées sur la zone de Lacq appartiennent à la même gamme de valeurs que des niveaux de fond. Un échantillonnage régulier, avec un point tous les 1,5 à 2 km, convient à l'élaboration d'une cartographie.

ANNEXE 7: Agglomération de Bordeaux

NO₂

Benzène

Deux séries de mesures par tubes à échantillonnage passif ont été conduites par AIRAQ :

- du 8 août au 6 septembre 2001 et du 13 février au 13 mars 2002 (benzène)
- du 22 juillet au 18 août 2004 et du 15 février au 15 mars 2005 (NO₂ et benzène)

Le même plan d'échantillonnage a été reproduit d'une année sur l'autre. En 2004-2005 il a été enrichi par des sites supplémentaires au nord de l'agglomération. Il s'agit d'un échantillonnage stratifié en fonction de la densité de population. Il se compose de :

- été 2001 : 69 sites de fond, 24 sites de proximité automobile et 6 sites de proximité industrielle ;
- hiver 2002 : 68 sites de fond, 22 sites de proximité automobile et 6 sites de proximité industrielle ;
- été 2004 : 83 sites de fond, 26 sites de proximité automobile et 7 sites de proximité industrielle ;
- hiver 2005 : 77 sites de fond, 27 sites de proximité automobile et 7 sites de proximité industrielle.

Seuls les sites de fond sont considérés dans la présente analyse. Ils se répartissent suivant une maille de taille variable, fonction de la densité de population (maille de 500 m à 5 km de côté en 2001-2002 ; de 250 m à 5 km en 2004-2005). De ce fait, ils sont plus resserrés en centre-ville et plus espacés en périphérie.

ETUDE PAR POLLUANT ET PAR ANNEE

DIOXYDE D'AZOTE

Caractéristiques du variogramme

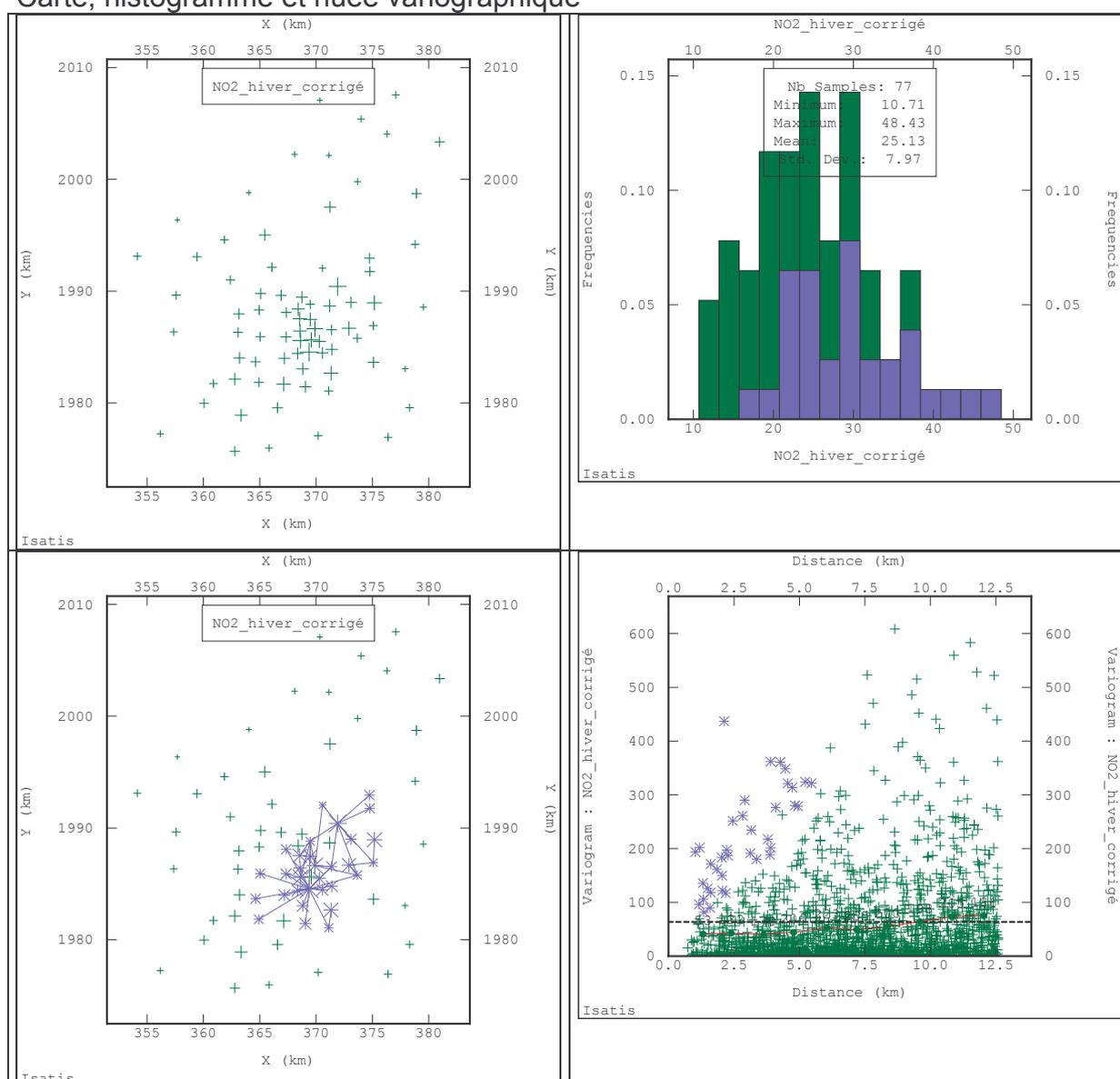
Effet de pépité

Une structure sphérique de portée voisine de 8 km ou deux structures sphériques de portées voisines respectivement de 4 km et 10 km.

2004-2005

Hiver

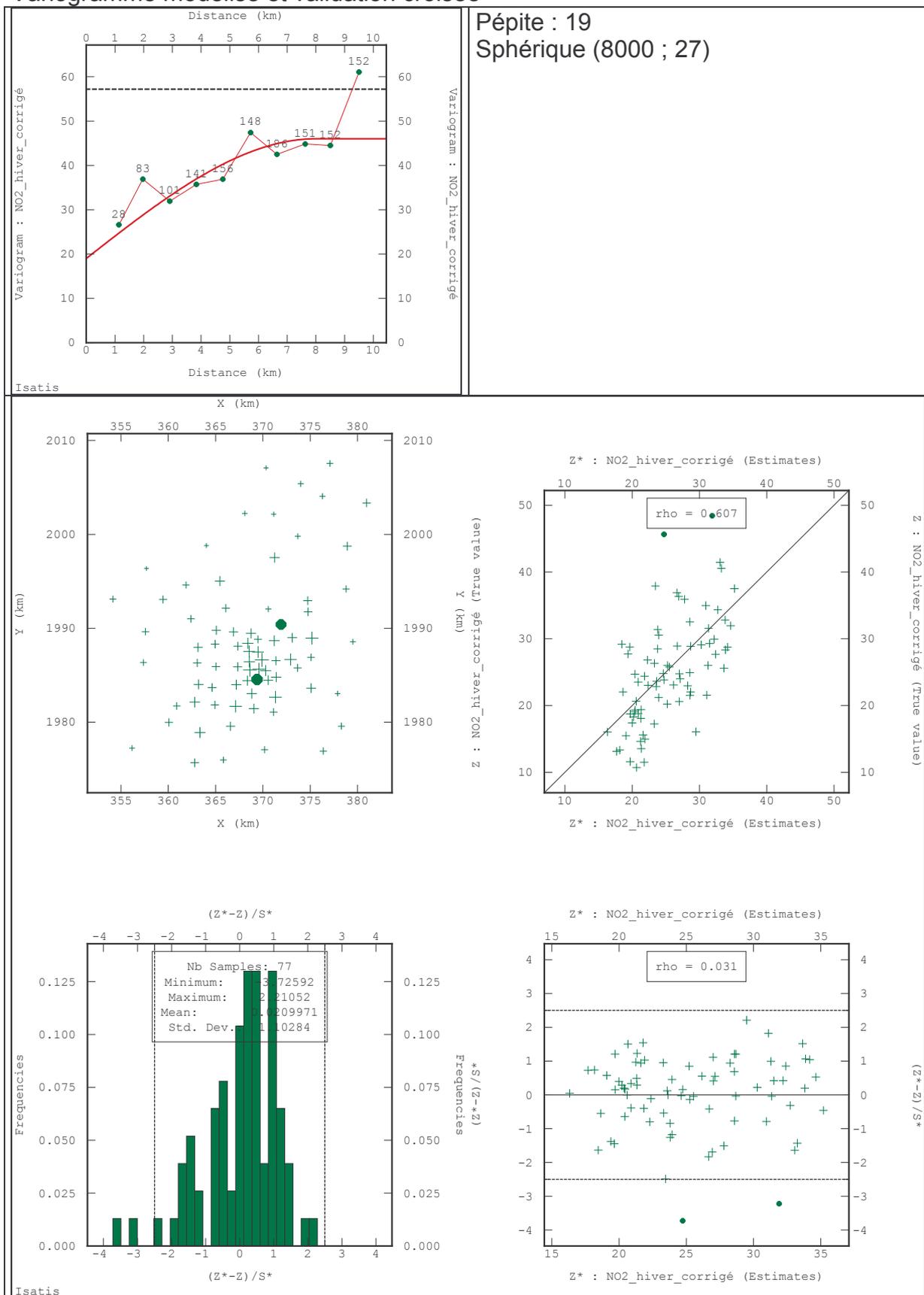
Carte, histogramme et nuée variographique



La variabilité est plus élevée dans le centre-ville (points bleus).

Points éliminés du calcul du variogramme : site n° F53 (point de valeur maximale), qui déstructure le début du variogramme.

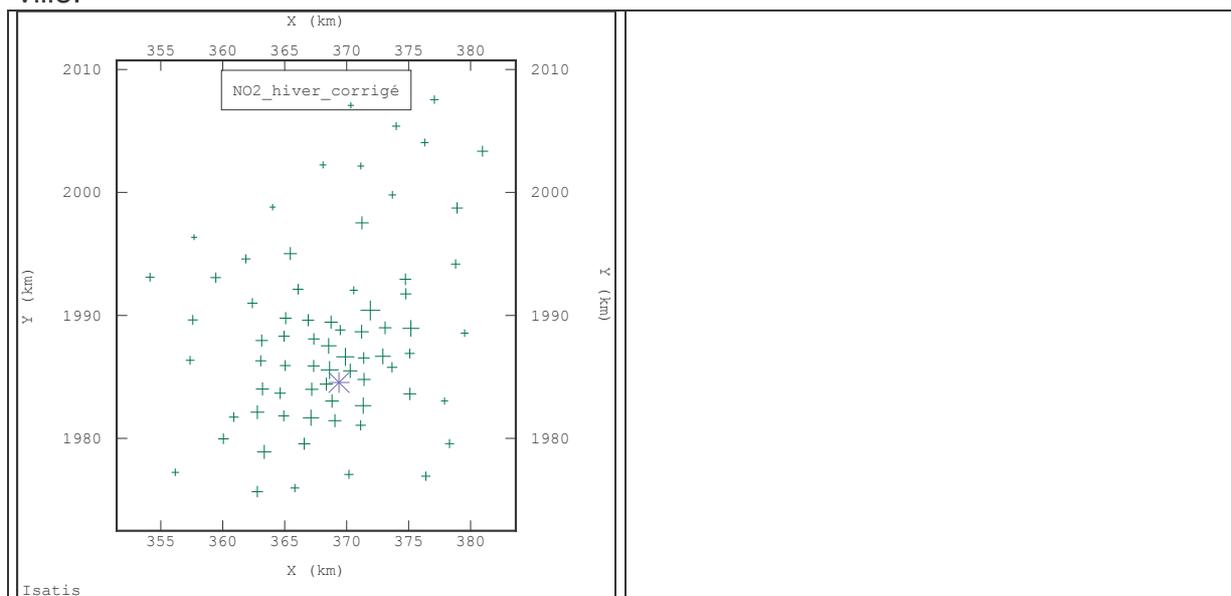
Variogramme modélisé et validation croisée



L'effet de pépite est important. Le nuage de corrélation entre les valeurs estimées par validation croisée et les valeurs mesurées est assez dispersé. La réintroduction du point F53 en entrée du krigeage ne modifie pas sensiblement les résultats (figure ci-dessus).. Ce point de valeur maximale est alors sous-estimé.

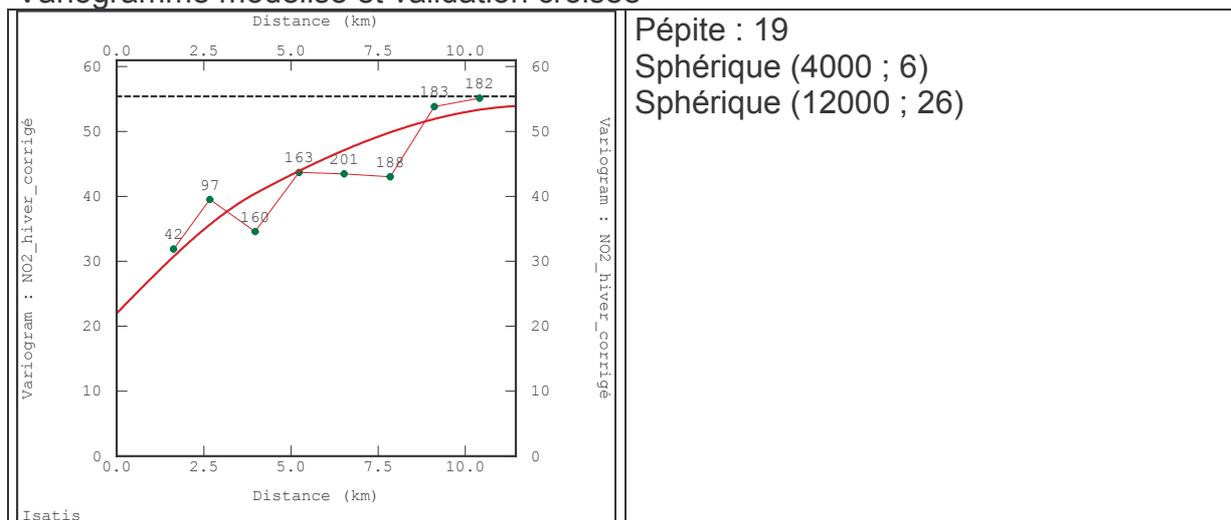
Dégradation du jeu de données (conservation d'un point/km²) :

Une grille kilométrique est superposée à la zone d'étude. On ne garde qu'un point de mesure par maille. Cette procédure conduit à éliminer 5 points dans le centre de la ville.

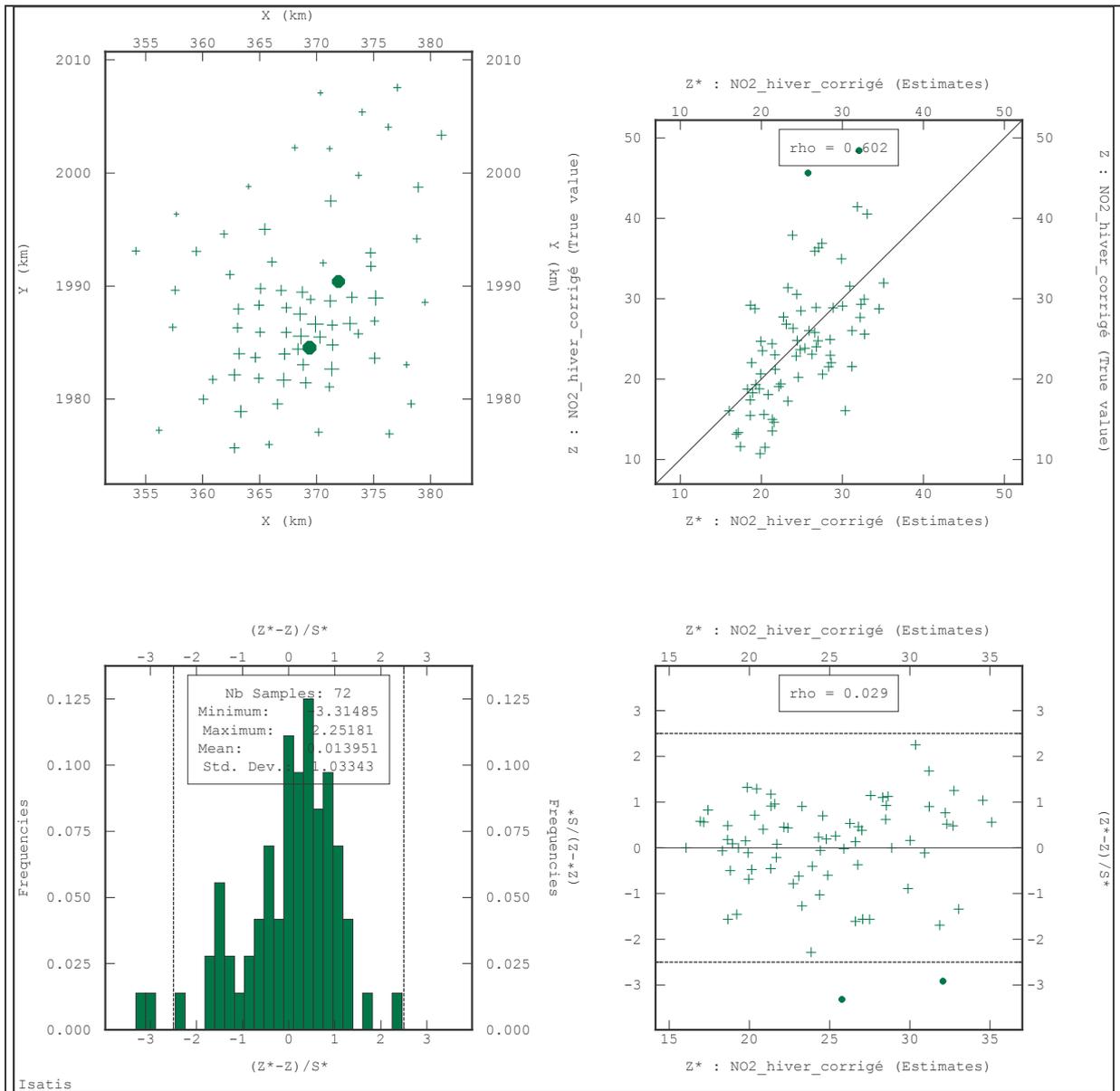


Le site F43 est à nouveau retiré du calcul du variogramme. Celui-ci conserve toutefois un fort effet de pépite, dû à la variabilité des concentrations en centre-ville.

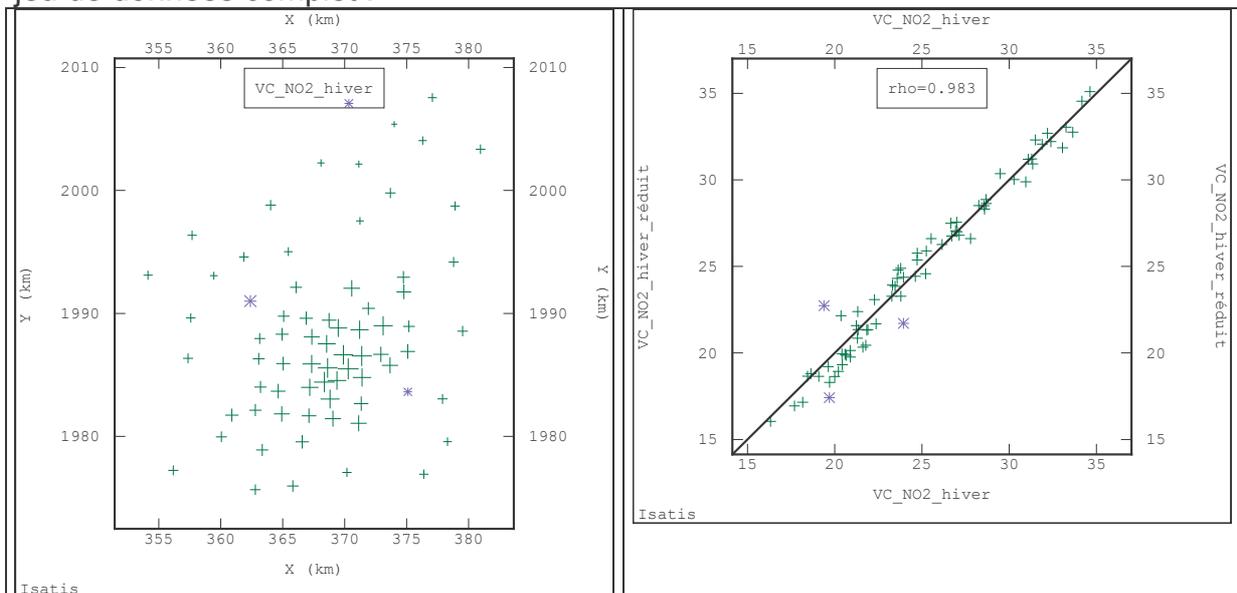
Variogramme modélisé et validation croisée



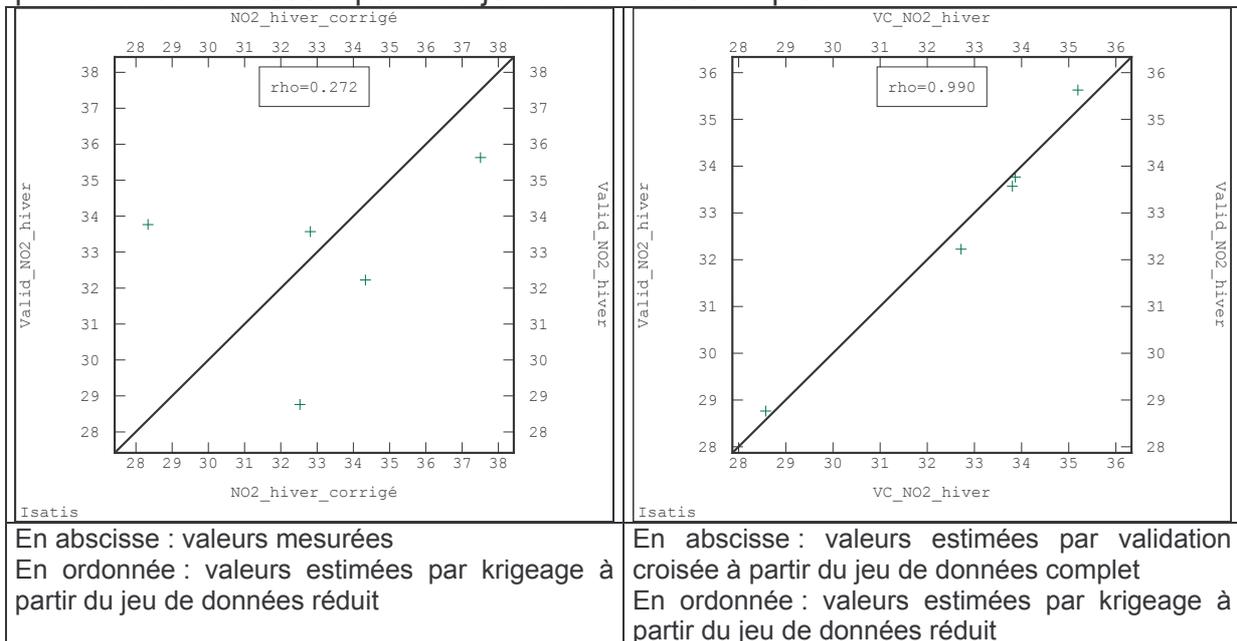
Pépite : 19
 Sphérique (4000 ; 6)
 Sphérique (12000 ; 26)



Aux points du jeu de données réduit, les valeurs estimées par validation croisée à partir de ce jeu diffèrent peu des valeurs estimées par validation croisée à partir du jeu de données complet :



Sur le complémentaire du jeu de données réduit, les valeurs obtenues par krigeage à partir de ce jeu sont des estimations plus ou moins précises des vraies mesures (écart compris entre 2% et 20%) mais elles sont très proches des valeurs estimées par validation croisée à partir du jeu de données complet :



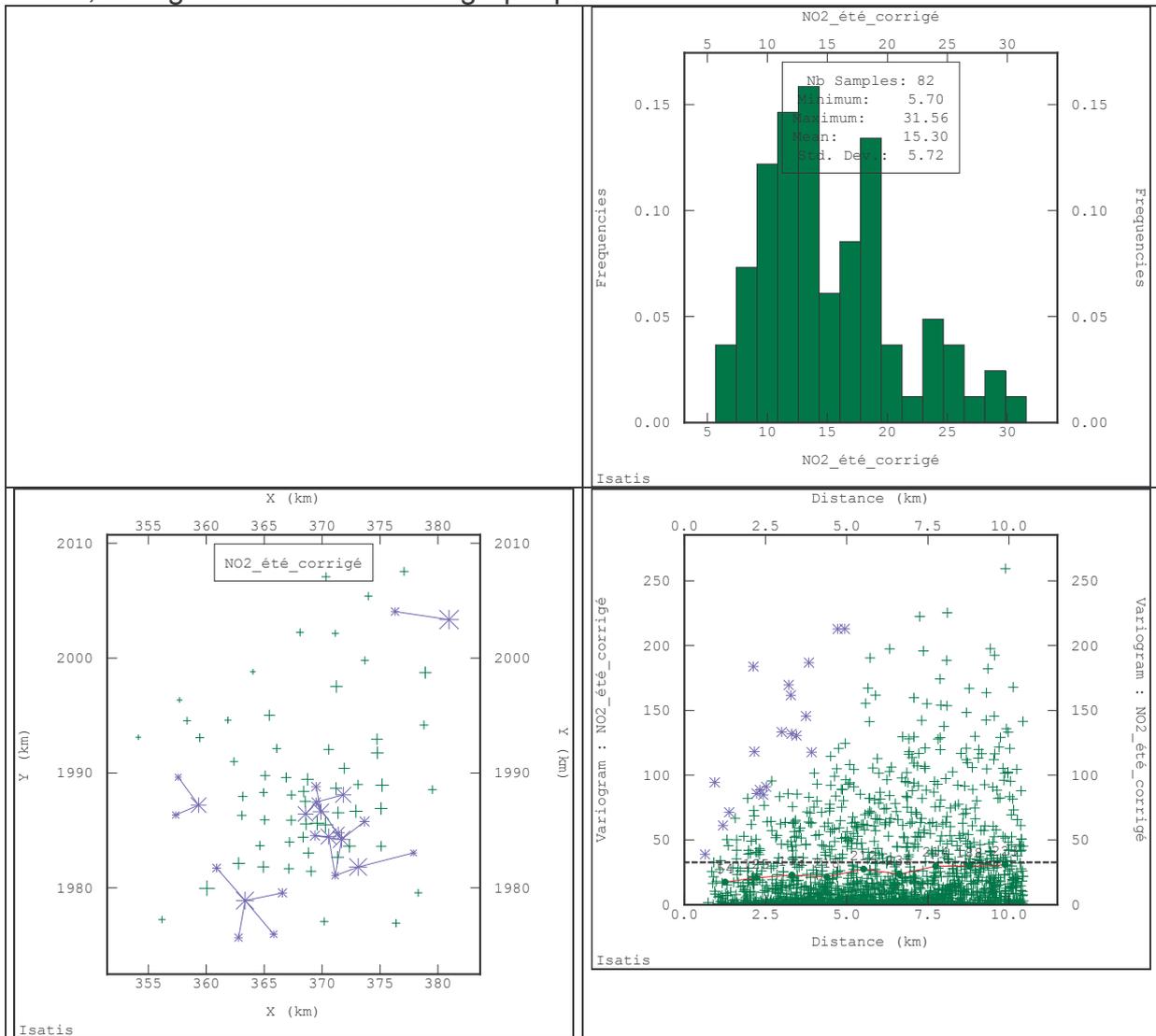
En abscisse : valeurs mesurées
En ordonnée : valeurs estimées par krigeage à partir du jeu de données réduit

En abscisse : valeurs estimées par validation croisée à partir du jeu de données complet
En ordonnée : valeurs estimées par krigeage à partir du jeu de données réduit

Ainsi la dégradation ne modifie pas notablement les résultats. La principale difficulté, dans ce cas d'étude, est la variabilité des concentrations en centre-ville qui engendre un effet de pépité élevé. Il serait intéressant d'examiner si des variables auxiliaires peuvent aider à améliorer le modèle géostatistique.

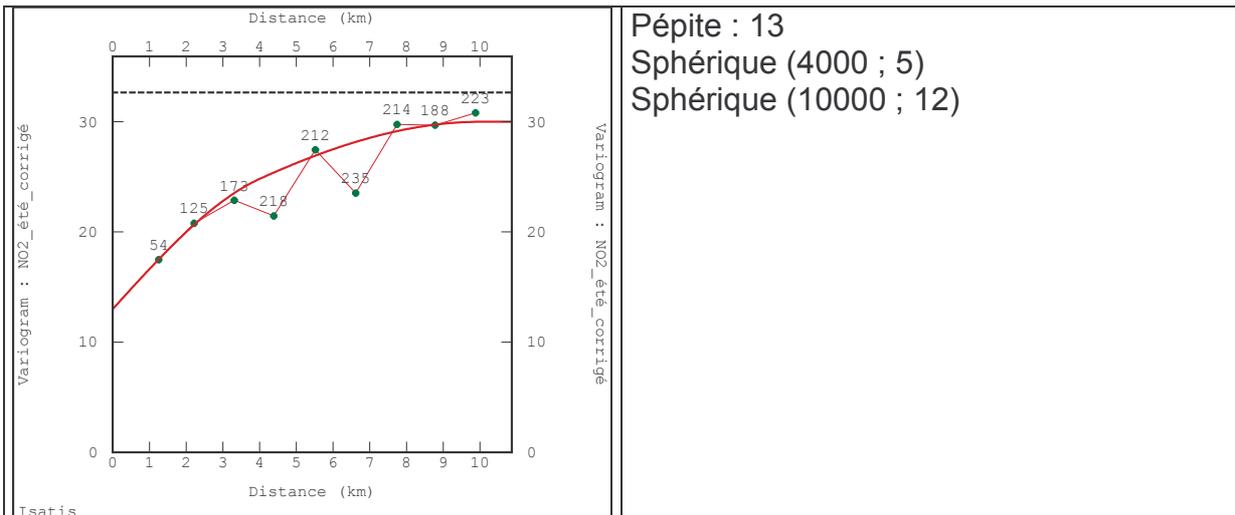
Eté

Carte, histogramme et nuée variographique

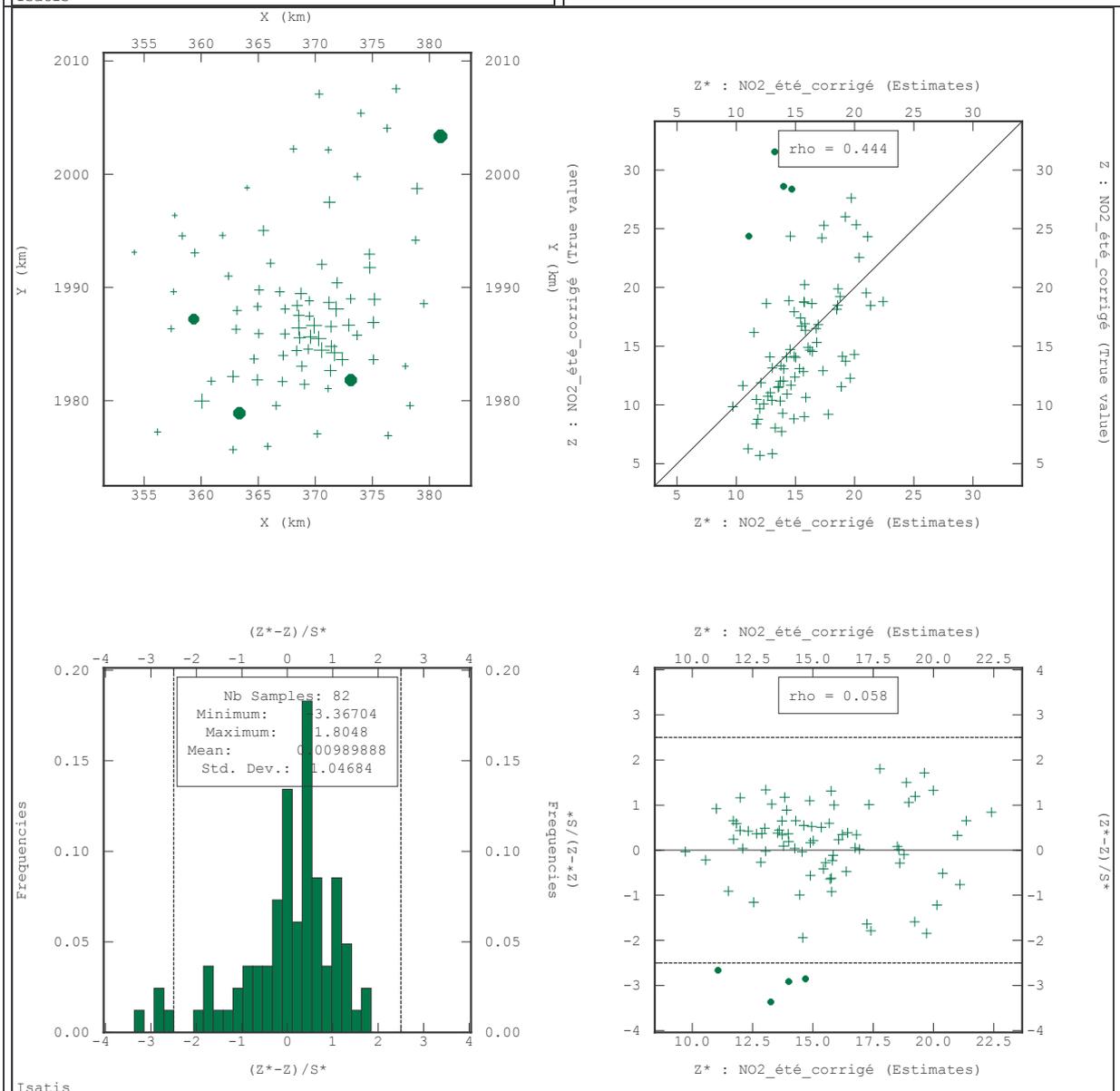


Points éliminés du calcul du variogramme : point

Variogramme modélisé et validation croisée



Pépité : 13
 Sphérique (4000 ; 5)
 Sphérique (10000 ; 12)



Comme en hiver, on note une certaine variabilité aux courtes distances, qui est principalement liée aux points du centre-ville. Cette variabilité est également accrue

par quelques teneurs plus élevées en périphérie (voir plus haut, les couples de points en bleu). Ces valeurs sont mal réestimées dans la validation croisée.

BENZENE

Caractéristiques du variogramme

Effet de pépité

Structure sphérique de portée voisine de 5000 à 6000 m

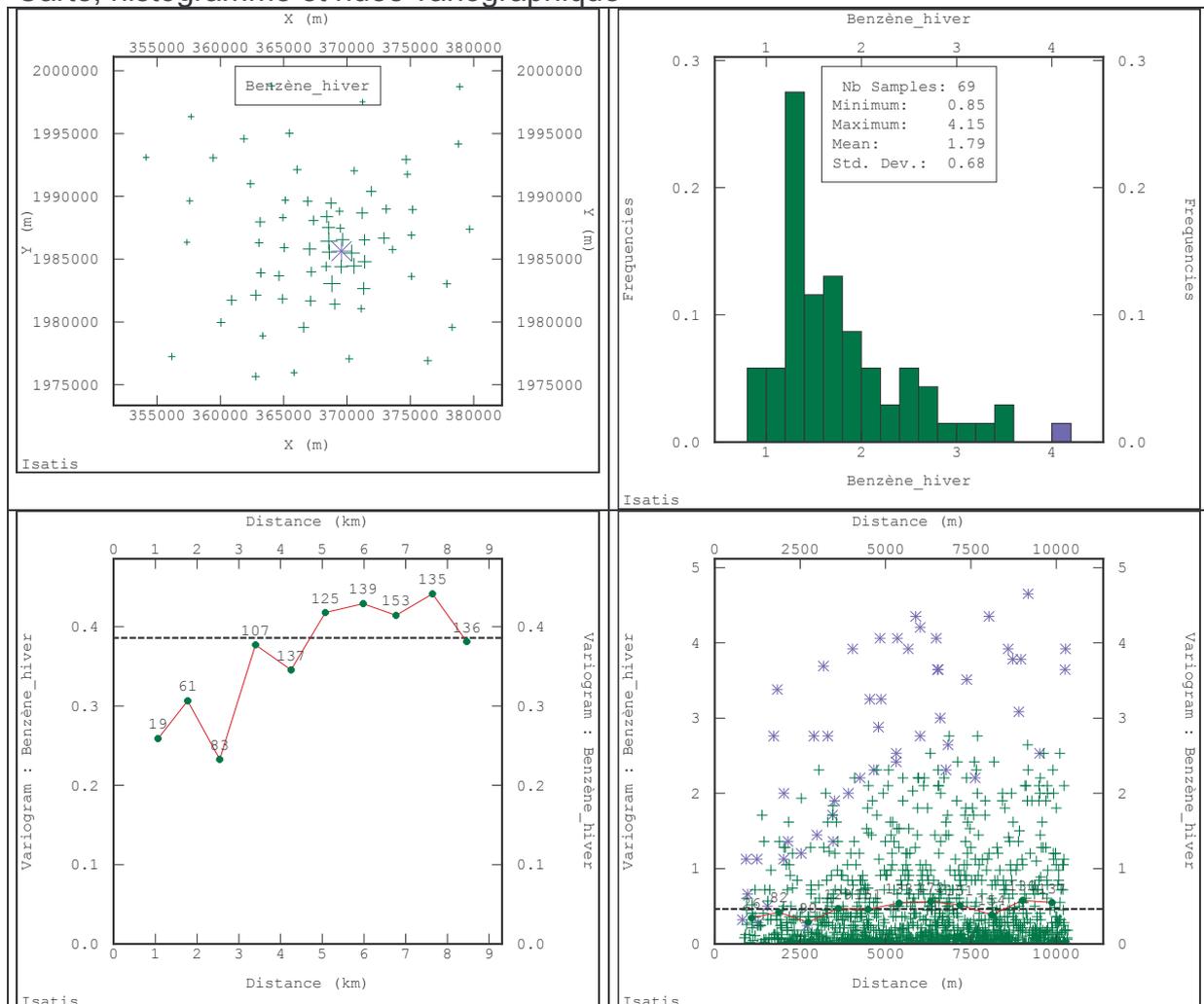
Structure linéaire pour les grandes distances

2001-2002

En été comme en hiver, on constate un effet de pépité relativement important.

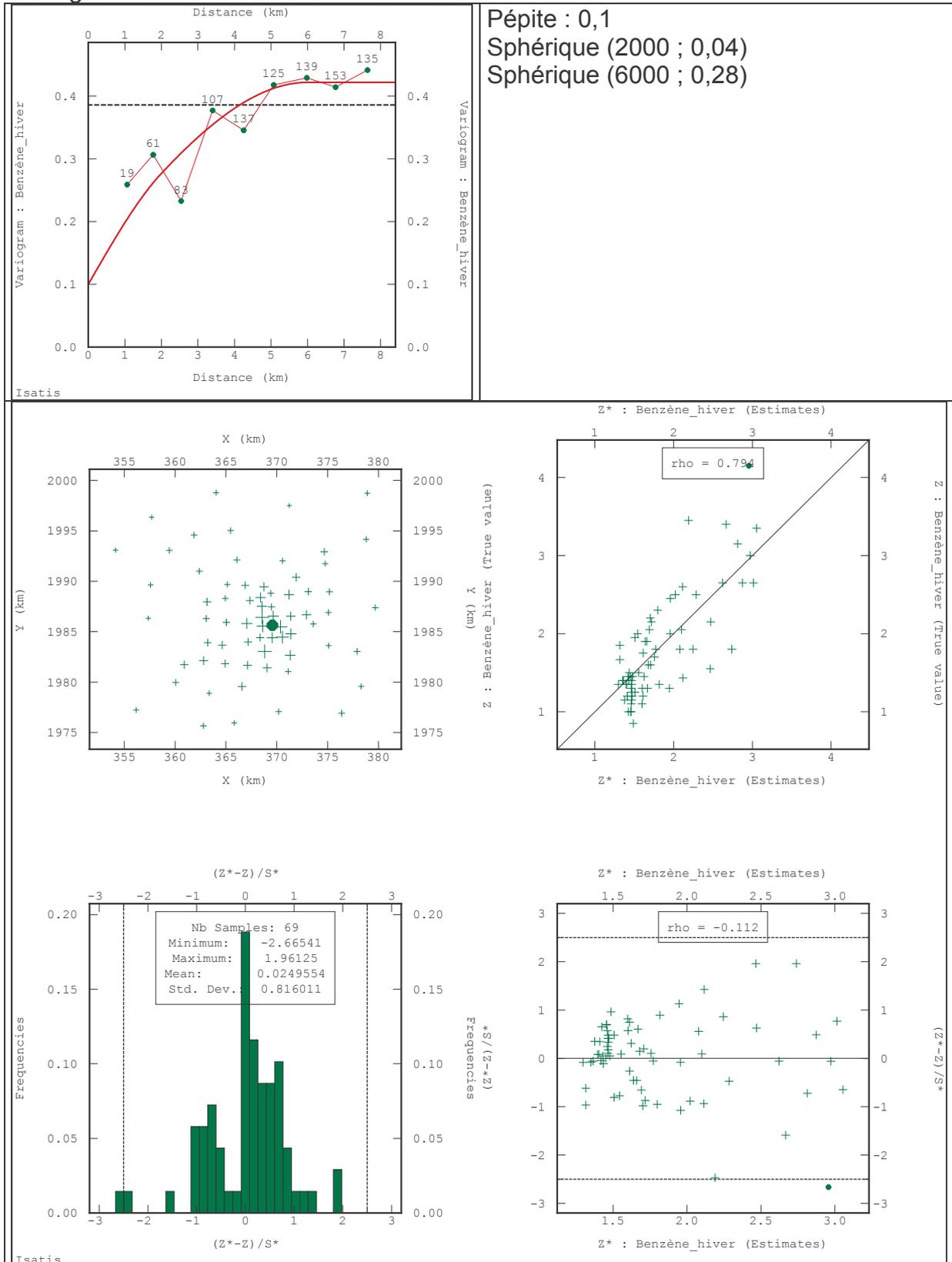
Hiver

Carte, histogramme et nuée variographique



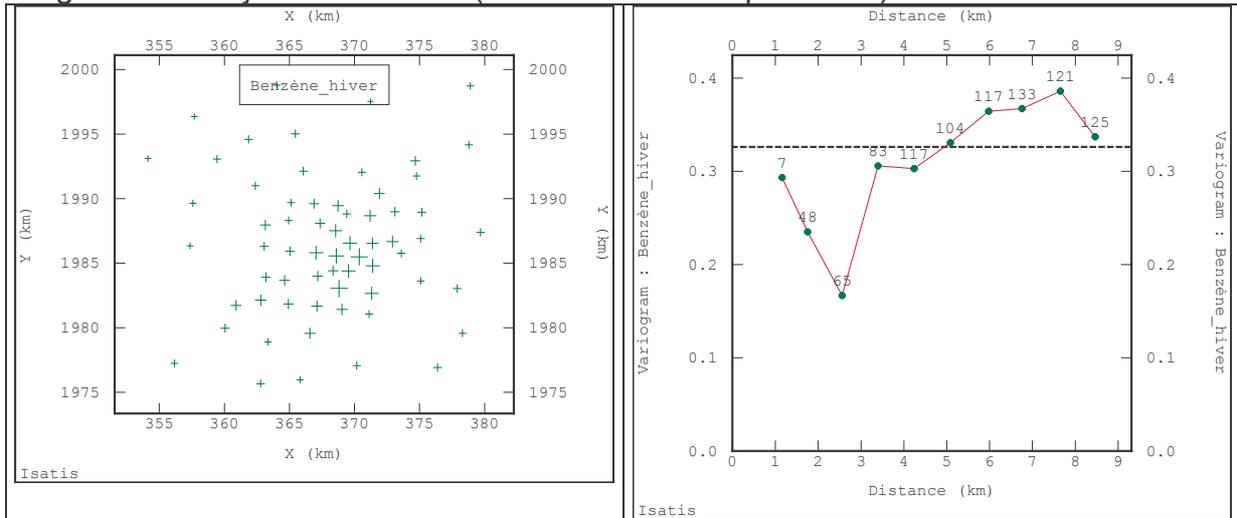
Points éliminés du calcul du variogramme : site n° 39

Variogramme modélisé et validation croisée



Les résultats ne sont pas sensiblement modifiés quand le point F53 est réintroduit en entrée du krigeage (figure ci-dessus). Ce point de valeur maximale est alors sous-estimé.

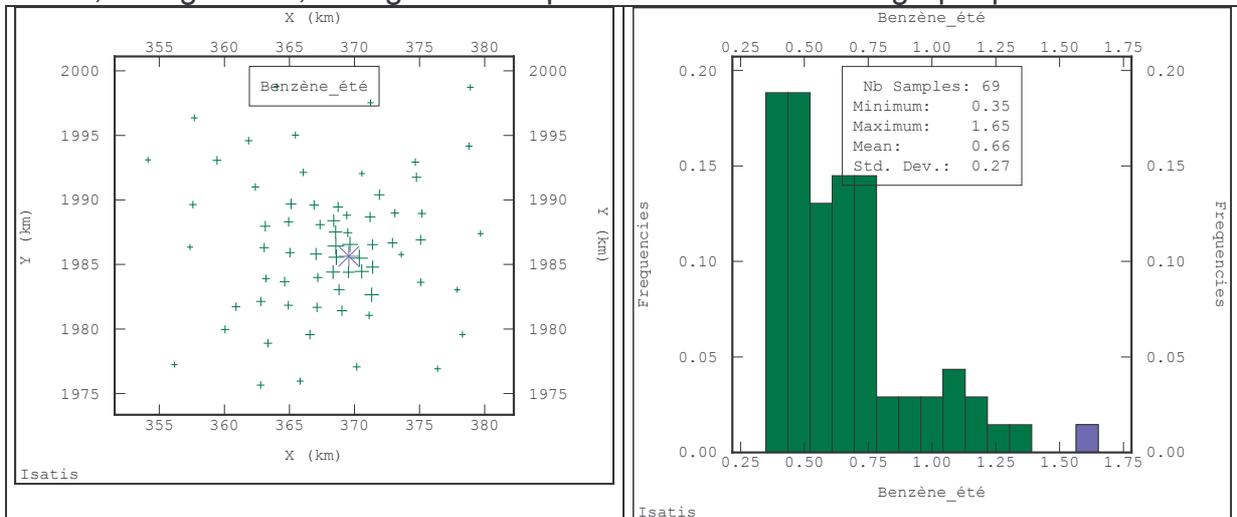
Dégradation du jeu de données (conservation d'un point/km²)

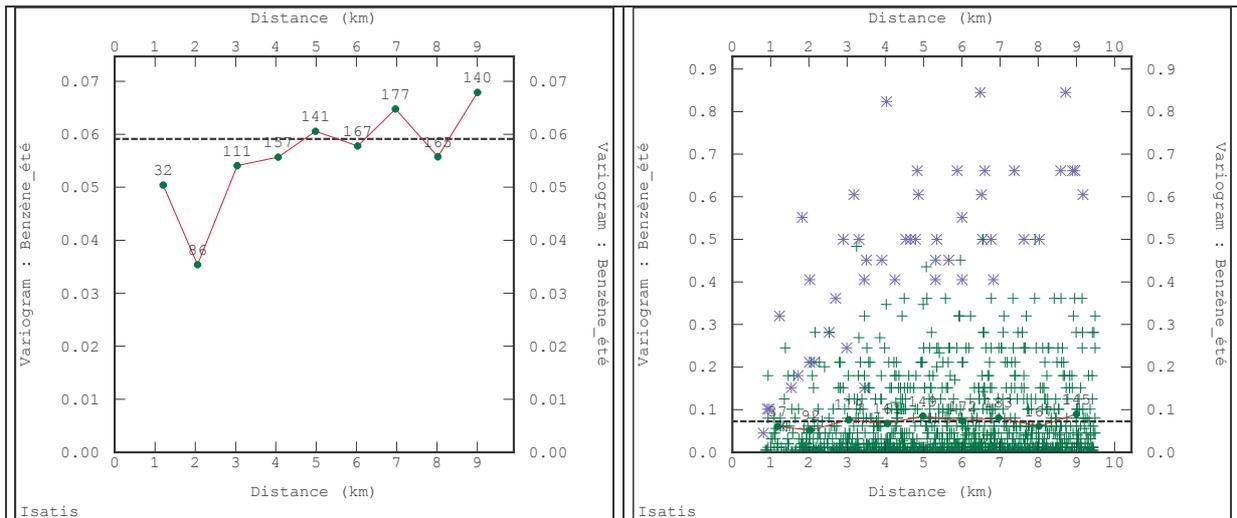


Le variogramme est peu altéré par la première dégradation (qui revient à réduire la densité de points en centre-ville). L'effet de pépite subsiste. La portée augmente légèrement. Par rapport à l'étude du jeu complet, les résultats ne devraient pas fondamentalement changer. Ce travail de dégradation est conduit jusqu'à l'estimation pour l'étude du benzène hivernal en 2005.

Été

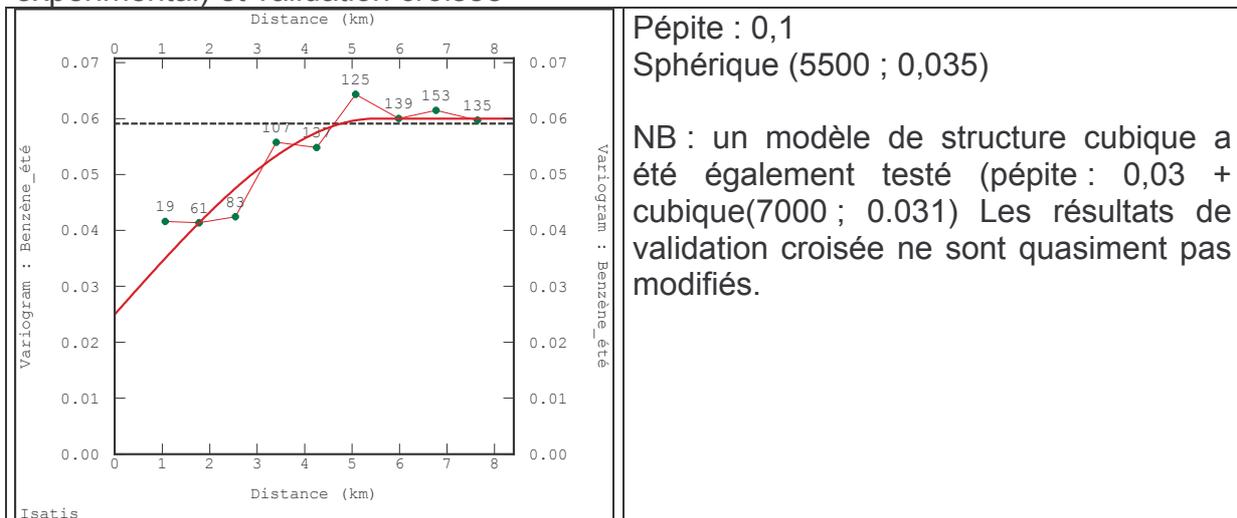
Carte, histogramme, variogramme expérimental et nuée variographique

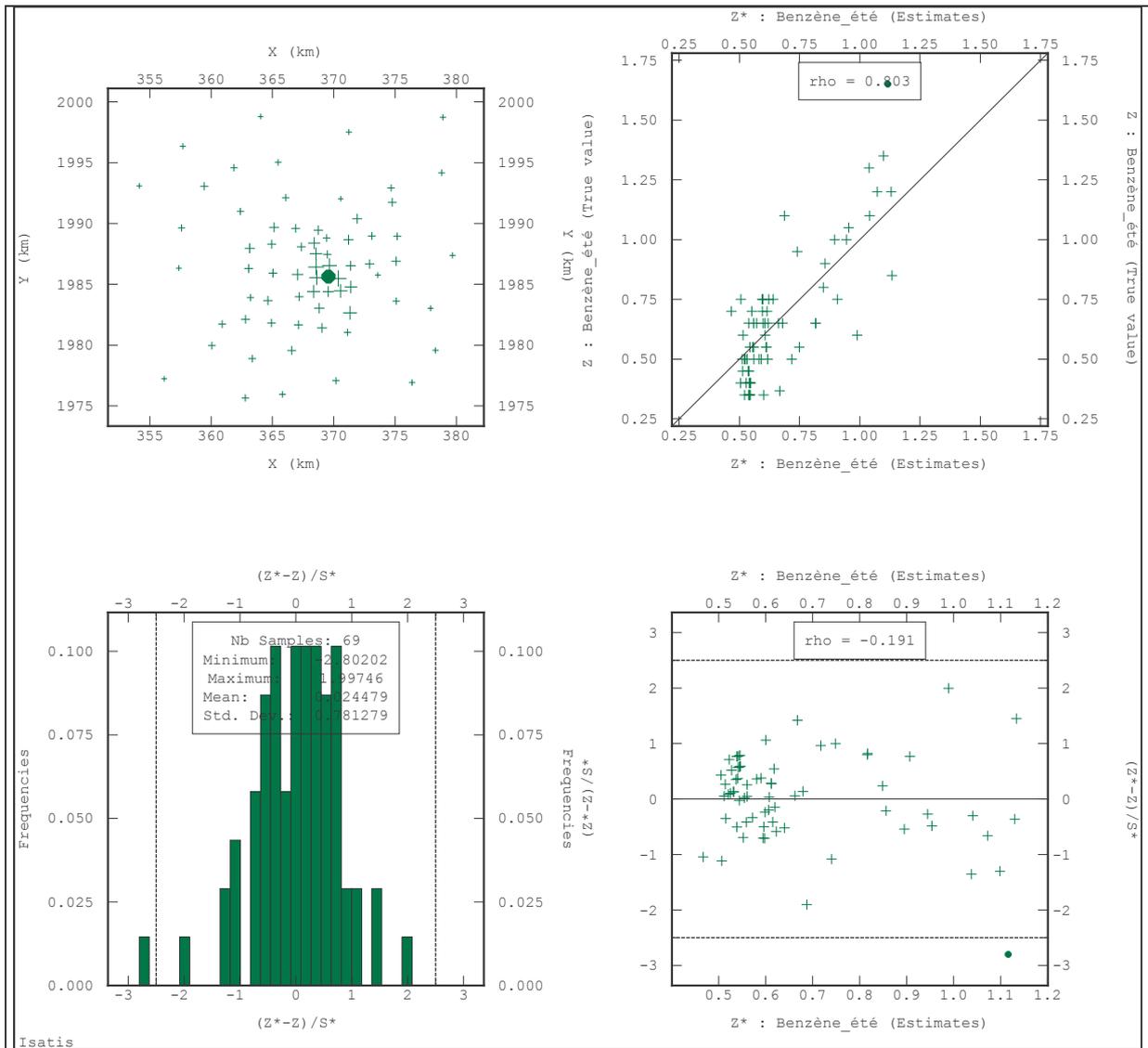




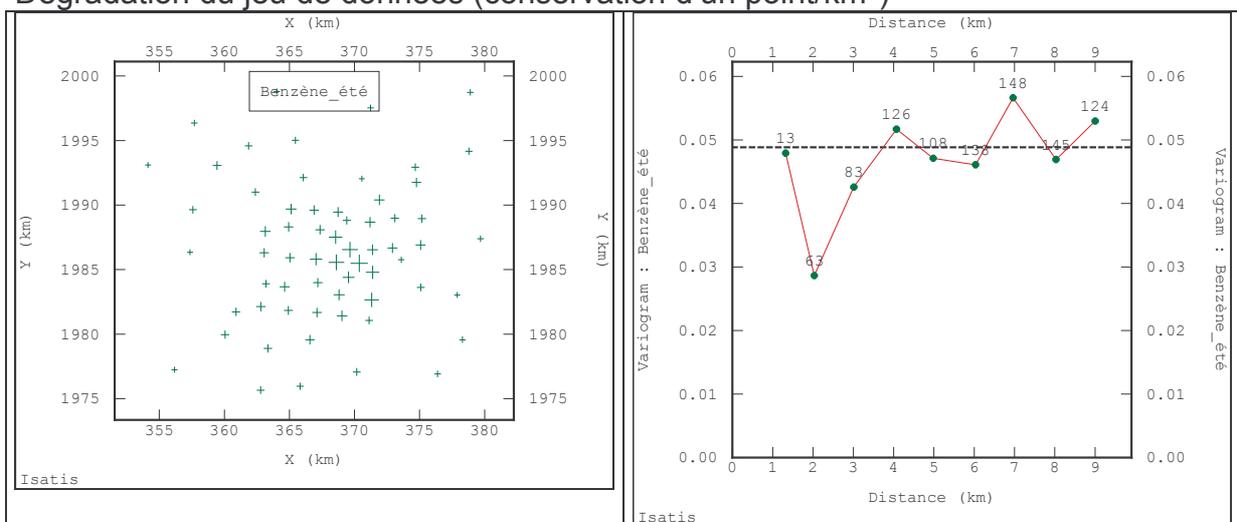
Points éliminés du calcul du variogramme : site n° 39

Variogramme modélisé (après ajustement des paramètres de calcul du variogramme expérimental) et validation croisée





Dégradation du jeu de données (conservation d'un point/km²)



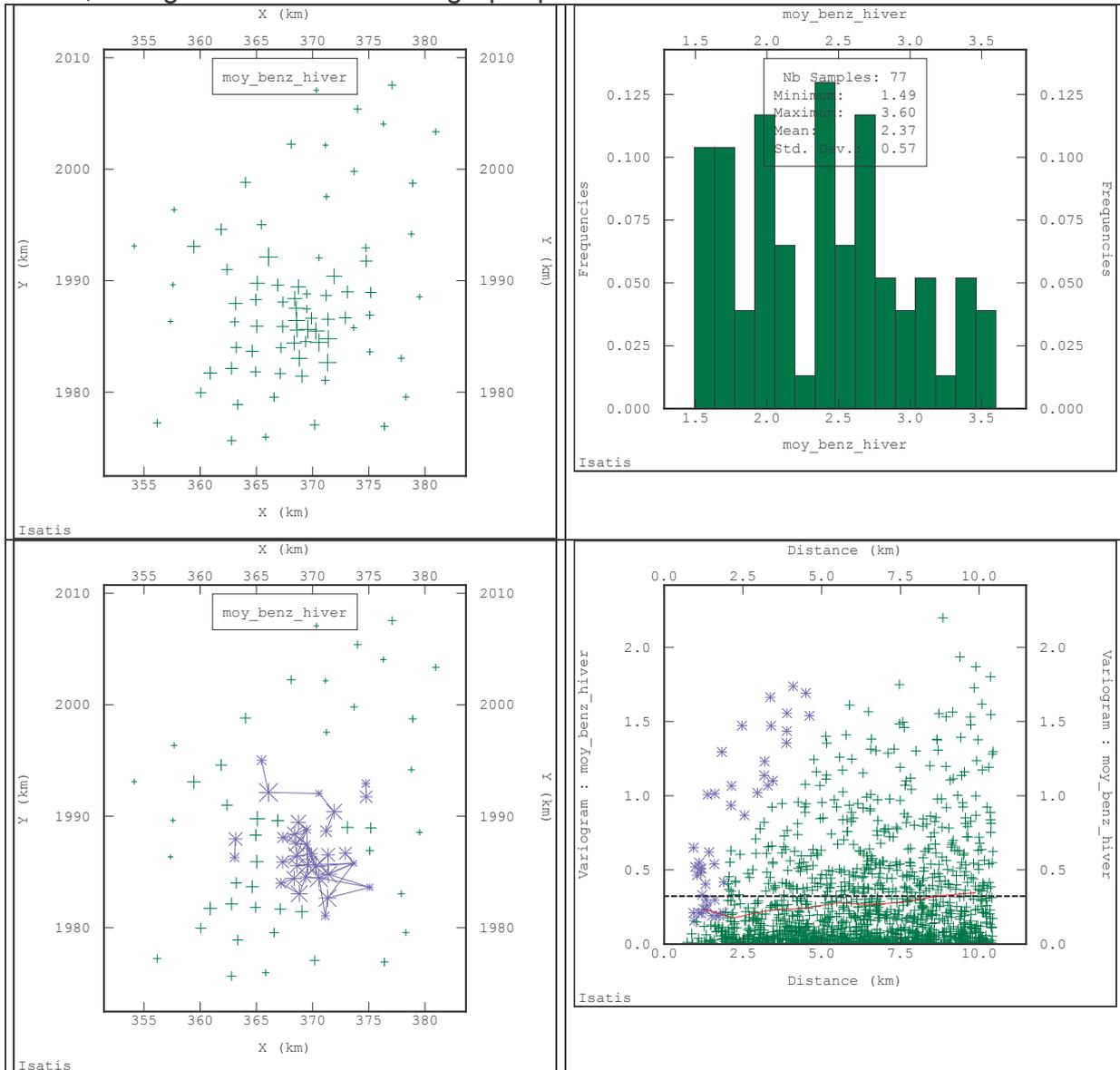
Le variogramme est peu altéré par la dégradation (qui revient à réduire la densité de points en centre-ville).

2004-2005

En été comme en hiver, on constate, là encore, un effet de pépité important.

Hiver

Carte, histogramme et nuée variographique

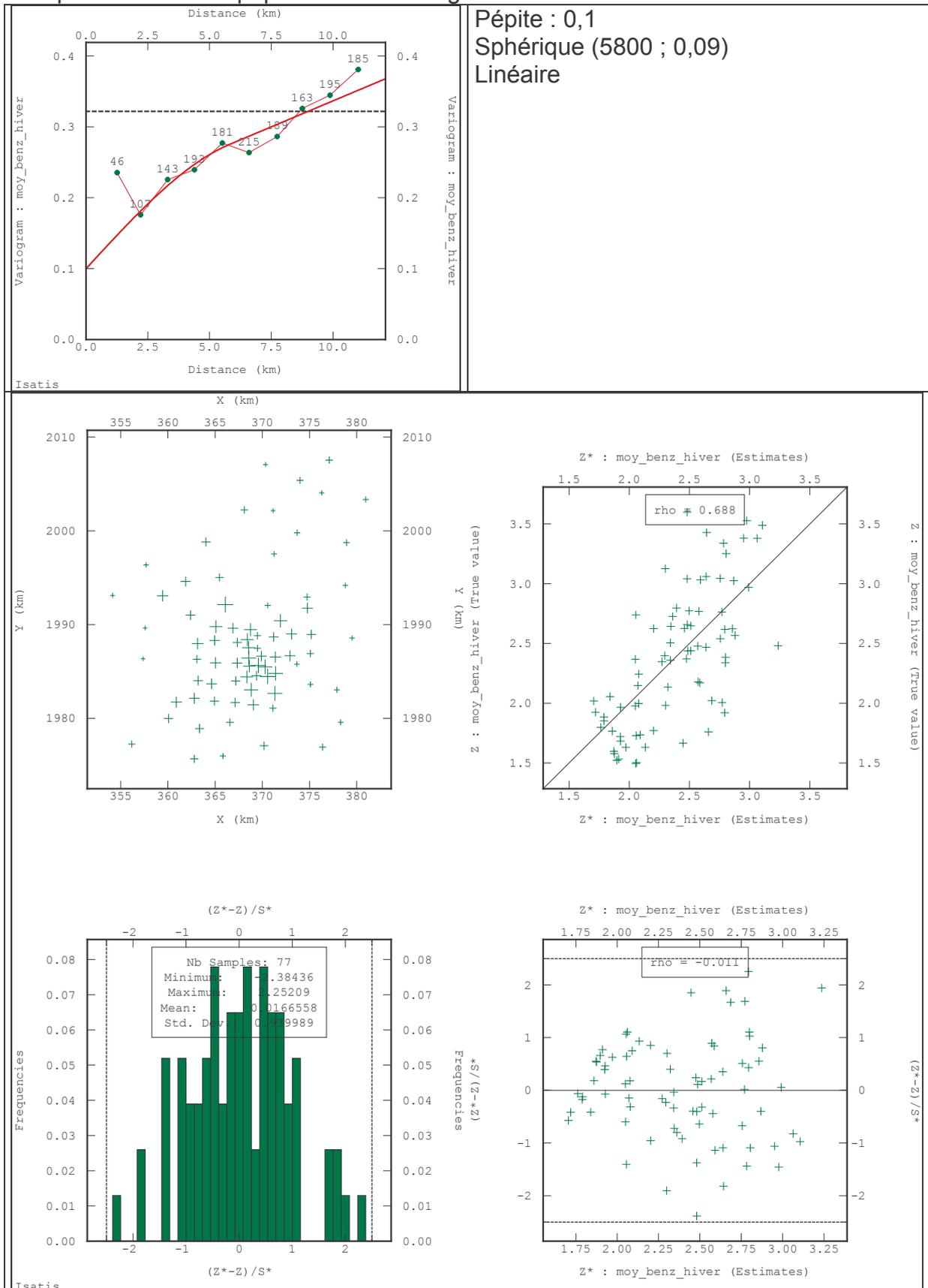


Points éliminés du calcul du variogramme : aucun point n'est éliminé. La variabilité aux courtes distances n'est pas due à un point en particulier mais à plusieurs paires de points auxquelles appartiennent différents sites de centre-ville :

Variogramme modélisé et validation croisée

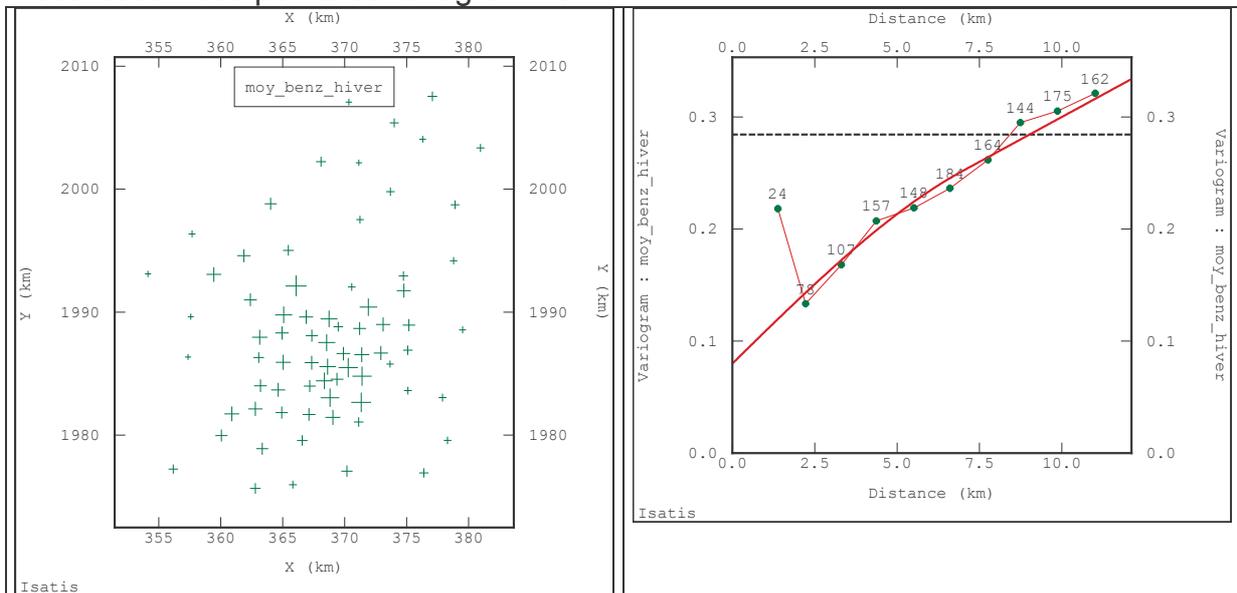
Comme en 2002, le variogramme se caractérise par un fort effet de pépité et montre une première structure - modélisée par une fonction sphérique - de portée comprise entre 5 et 6 km. Il présente également une structure de plus grande portée qui n'apparaissait pas en 2002. Celle-ci n'est pas un effet de l'échantillonnage : en supprimant les nouveaux points au nord du domaine, elle est encore présente.

Le nuage de corrélation entre concentrations estimées et mesurées est assez dispersé et indique un lissage des valeurs. Ce résultat s'accorde avec la prise en compte d'un effet de pépite relativement grand.



Dégradation du jeu de données : 1 point / km²

Localisation des points et variogramme



Le variogramme a la même allure que précédemment mais la suppression de points dans le centre-ville réduit la variabilité sur les premiers kilomètres. Deux modèles sont testés :

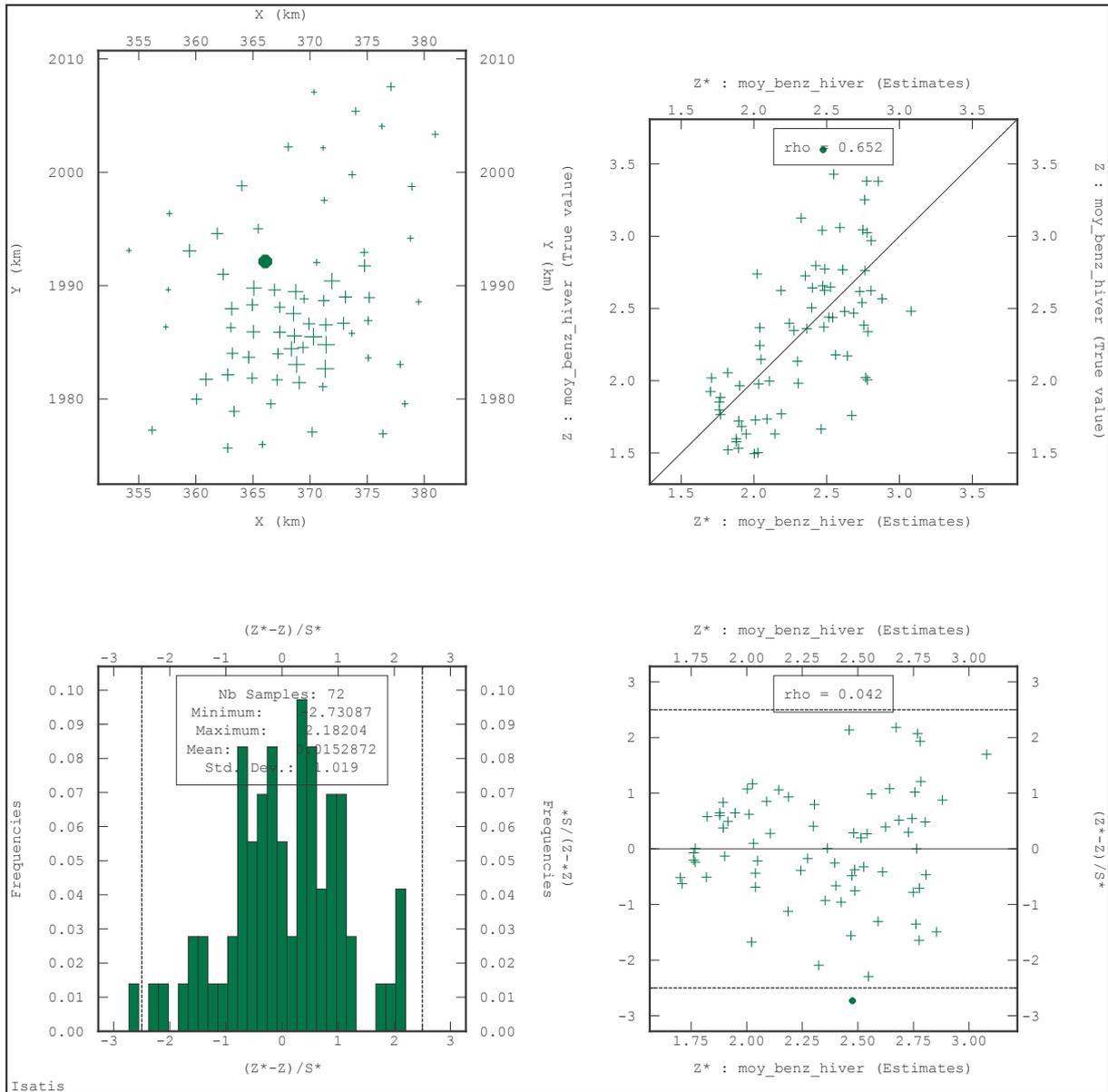
Effet de pépite (0,08) +sphérique (7000 ; 0,06)+linéaire (15000 ; 0,24)

Effet de pépite (0,08) + sphérique de grande portée (14000 ; 0,26)

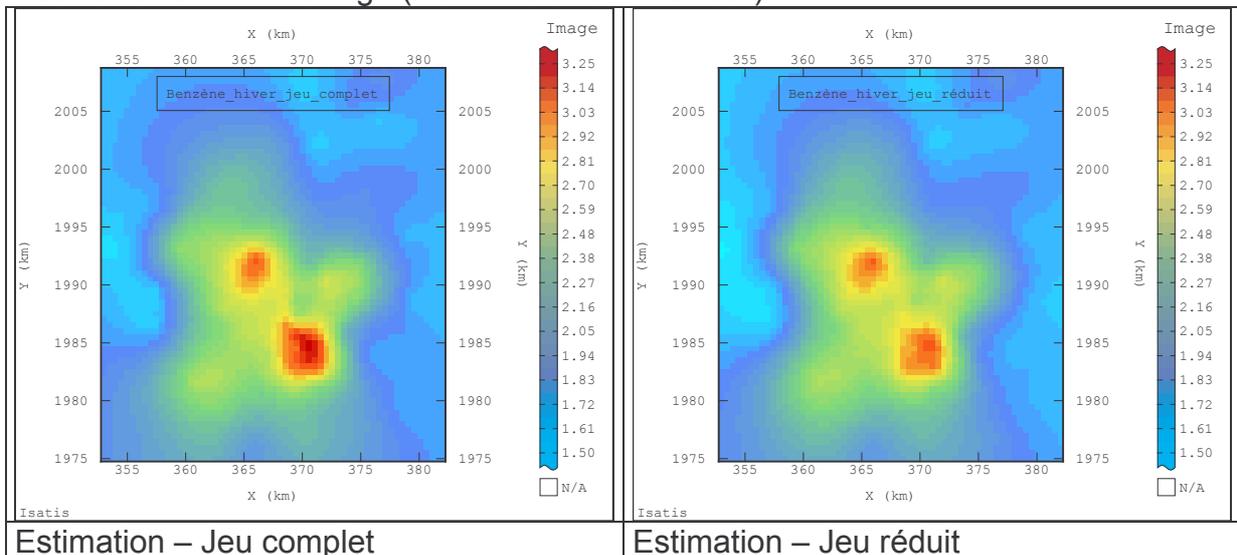
Les résultats de validation croisée sont peu sensibles au modèle choisi..

Validation croisée

Le nuage de corrélation entre concentrations mesurées et estimées reste dispersé, avec un lissage des valeurs.

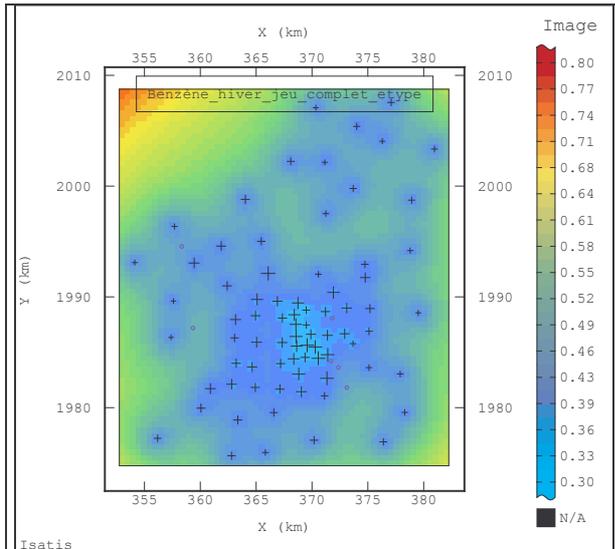


Estimation sur un maillage (maille de 500 m de côté)

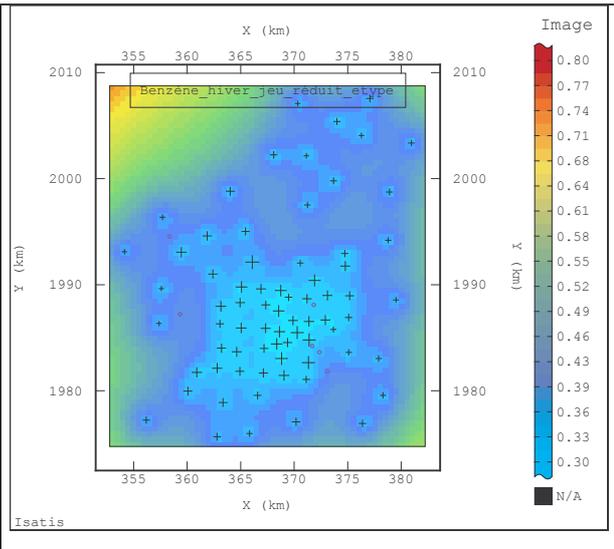


Estimation – Jeu complet

Estimation – Jeu réduit



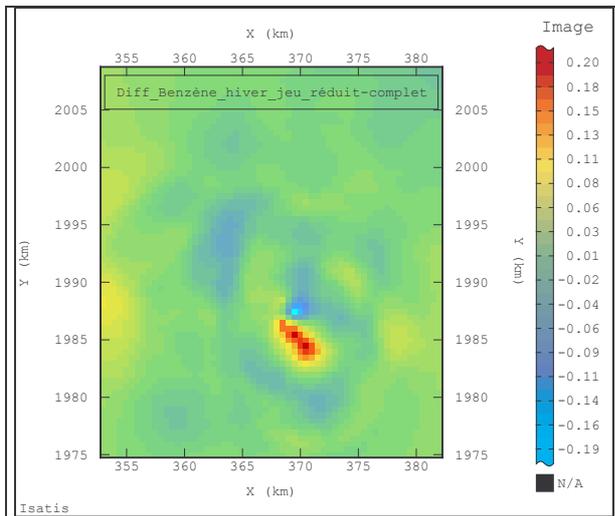
Ecart-type de l'erreur d'estimation – Jeu complet



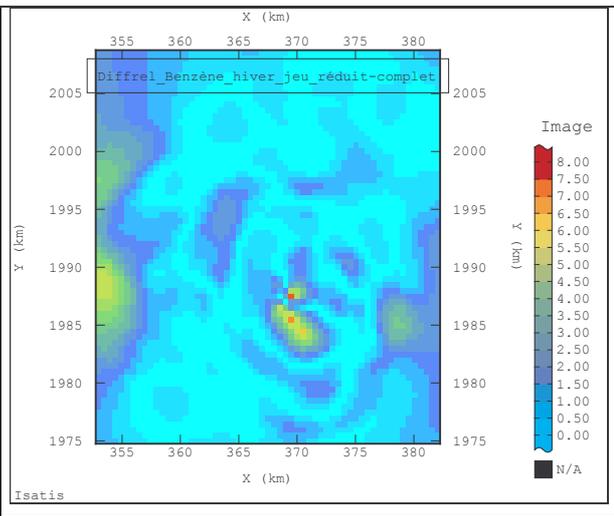
Ecart-type de l'erreur d'estimation – Jeu réduit

Qu'il s'agisse du jeu de données complet ou réduit, l'écart-type d'estimation est relativement homogène dans l'enveloppe des points de mesure. Il est plus faible pour le jeu de données réduit, à cause du modèle de variogramme qui a été ajusté (plus petit effet de pépite, structure sphérique de plus longue portée et de plus bas palier).

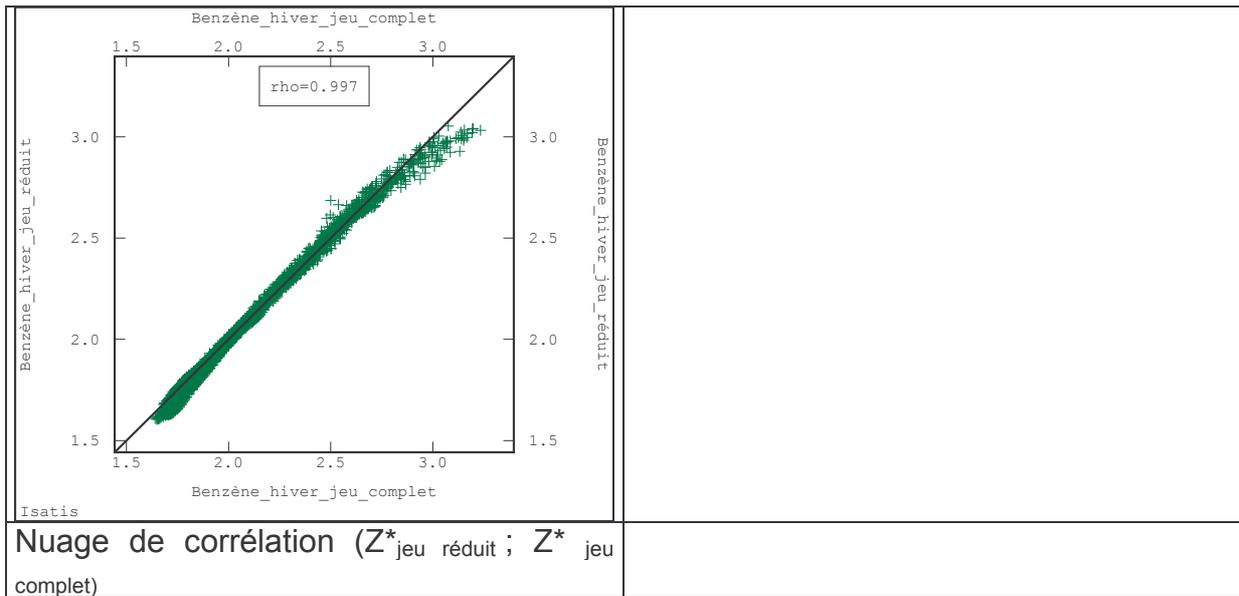
Lorsque l'on retire des points du centre-ville afin d'adopter un maillage régulier, l'estimation est peu modifiée. Dans les zones caractérisées par des concentrations plus élevées, les valeurs estimées sont légèrement atténuées. L'écart entre les cartes issues respectivement des jeux réduit et complet ne dépasse pas $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ou 8% en valeur relative.



$\text{Diff} = Z^*_{\text{jeu réduit}} - Z^*_{\text{jeu complet}}$

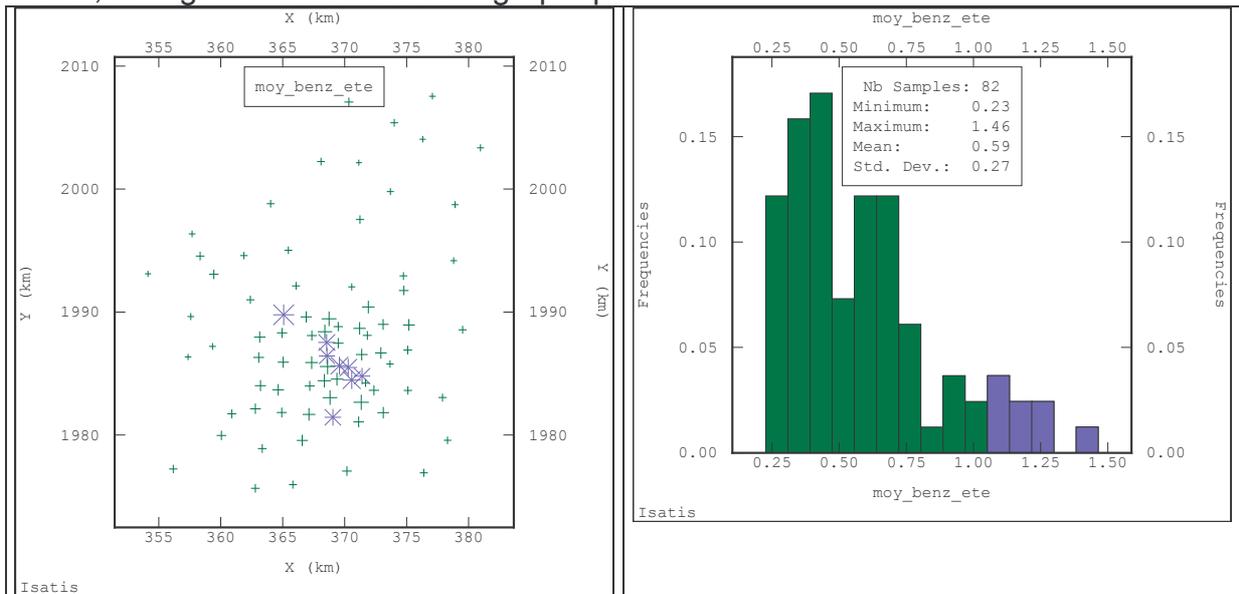


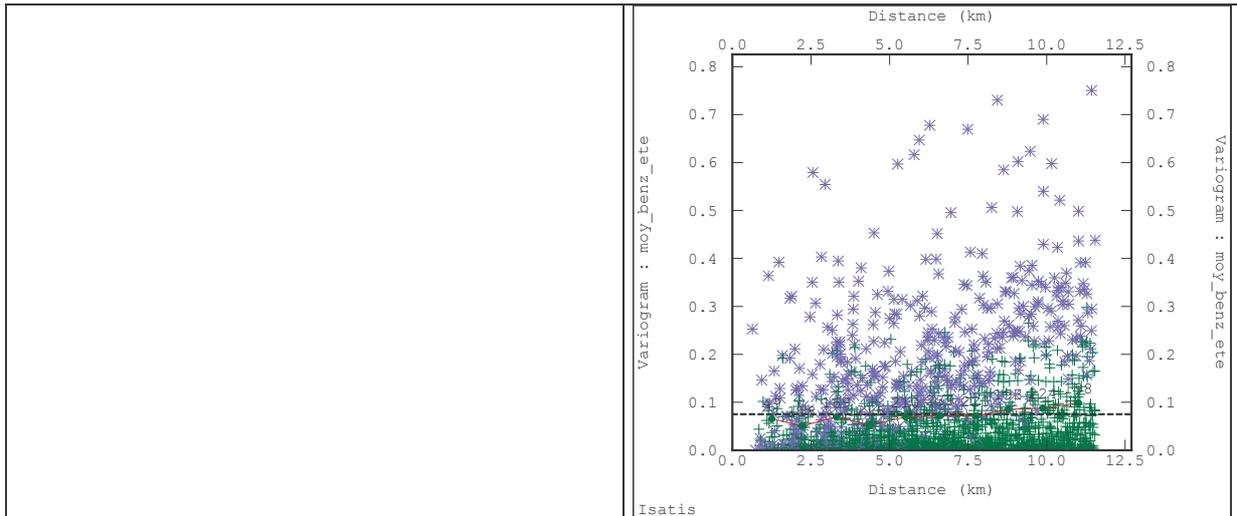
$\text{Diffrel} = 100 * |Z^*_{\text{jeu réduit}} - Z^*_{\text{jeu complet}}| / Z^*_{\text{jeu complet}}$



Eté

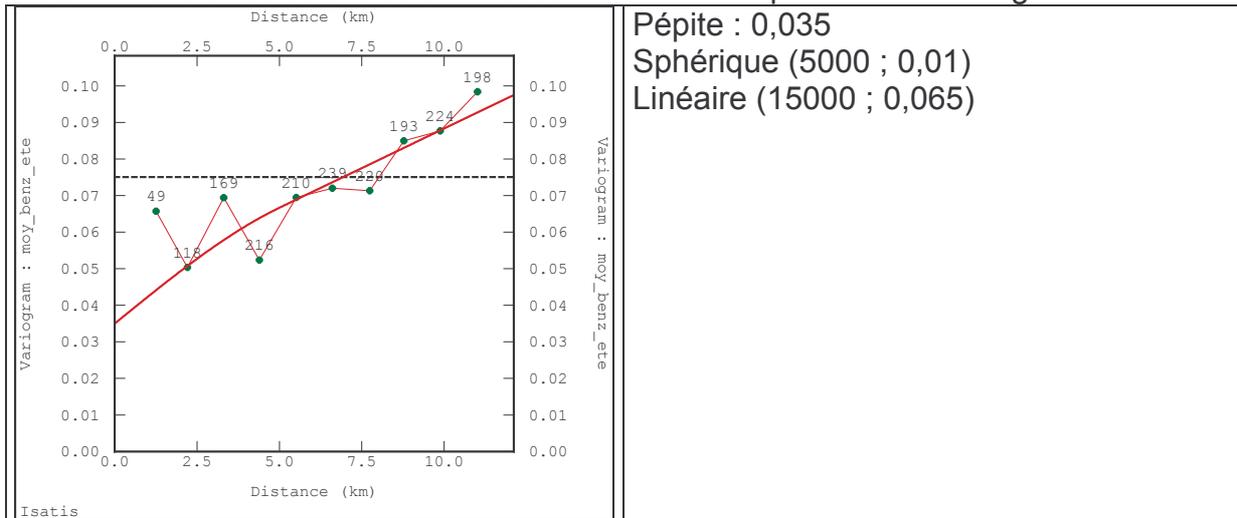
Carte, histogramme et nuée variographique



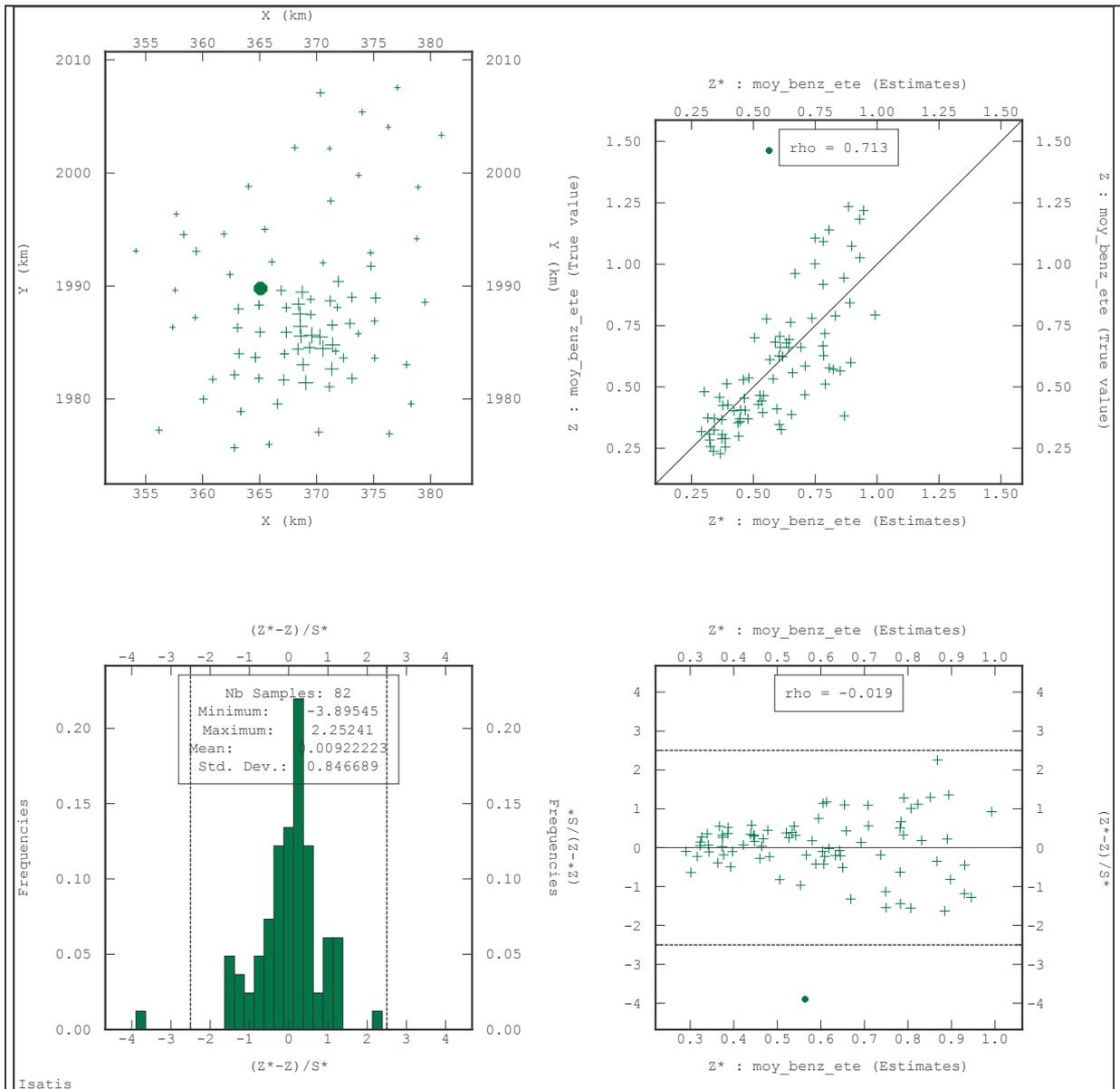


Variogramme modélisé et validation croisée

L'effet de pépite est grand et le variogramme peu structuré sur les premiers kilomètres. Le nuage de corrélation entre les valeurs estimées par validation croisée et les valeurs mesurées est assez dispersé. Plusieurs essais ont été effectués en éliminant les points de plus forte concentration mais le variogramme ne gagne pas notablement en structure et la validation croisée est quasiment inchangée.



Pépite : 0,035
 Sphérique (5000 ; 0,01)
 Linéaire (15000 ; 0,065)



ANNEXE 8 : Agglomération parisienne

NO₂

Benzène

Les campagnes de mesure examinées ci-après ont été conduites par AIRPARIF dans le cadre du projet LIFE-Resolution. Elles ont été conduites sur une période d'un an (2001-2002), dans des domaines d'étude imbriqués :

- domaine centré sur la petite couronne (1100 km² pour 7,5 millions d'habitants)
- deux domaines plus restreints de 3 × 2 km² (cœur historique de Paris et zone de Neuilly-Courbevoie)
- bordures de grands axes

238 sites d'échantillonnage se répartissent dans le plus large domaine selon une maille de 2 km de côté. Dans les quartiers, la résolution du maillage est de 500 m (une vingtaine de points par quartier).

L'analyse qui suit porte sur le NO₂ et le benzène. Pour chaque polluant, la moyenne des six campagnes de mesure est considérée. Ne sont conservés que les sites pour lesquels au moins 4 mesures sur 6 sont disponibles.

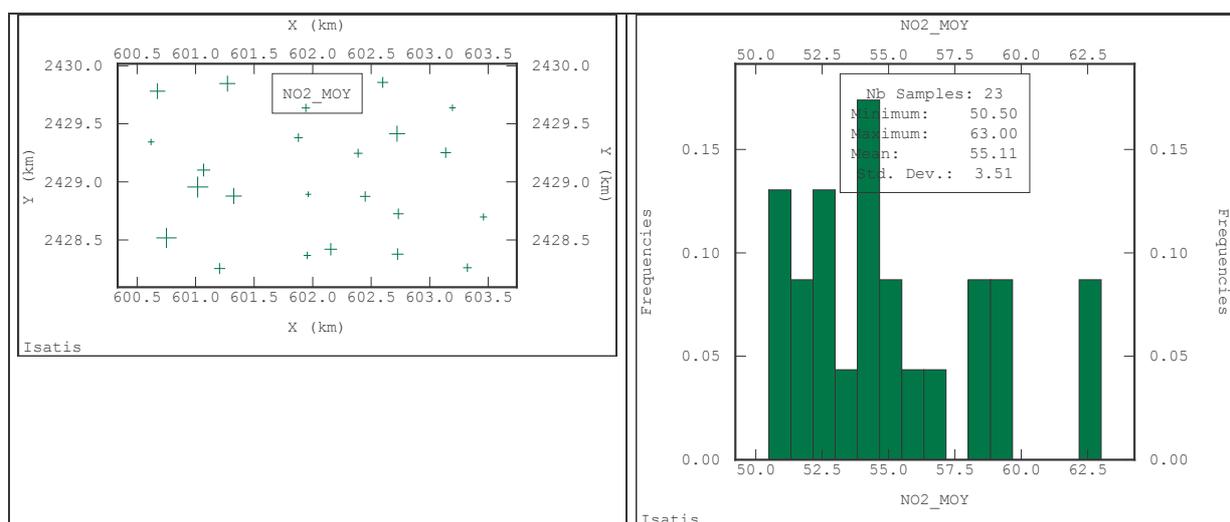
On se limite à un examen de la structure spatiale des concentrations de ces polluants :

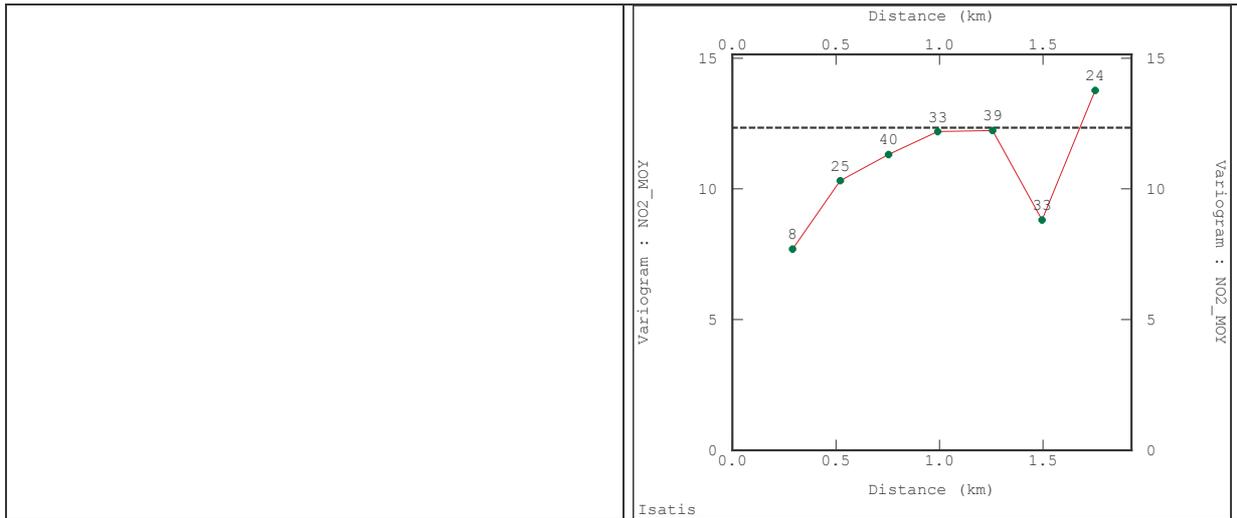
- sur les deux quartiers (Paris-centre et Courbevoie) ;
- sur l'ensemble du domaine, hors zones de resserrement et hors transects.

Echelle du quartier

NO₂

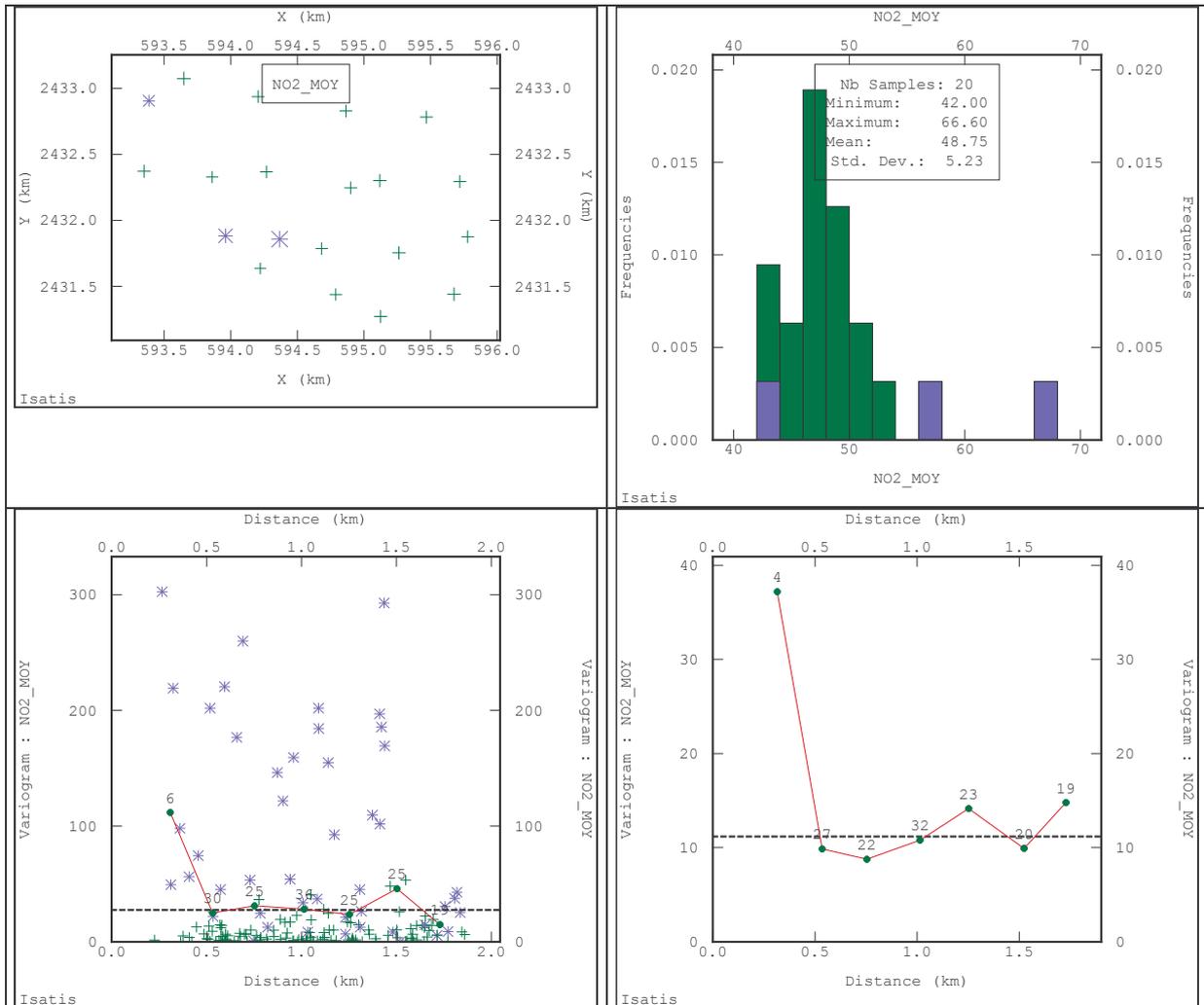
Centre de Paris



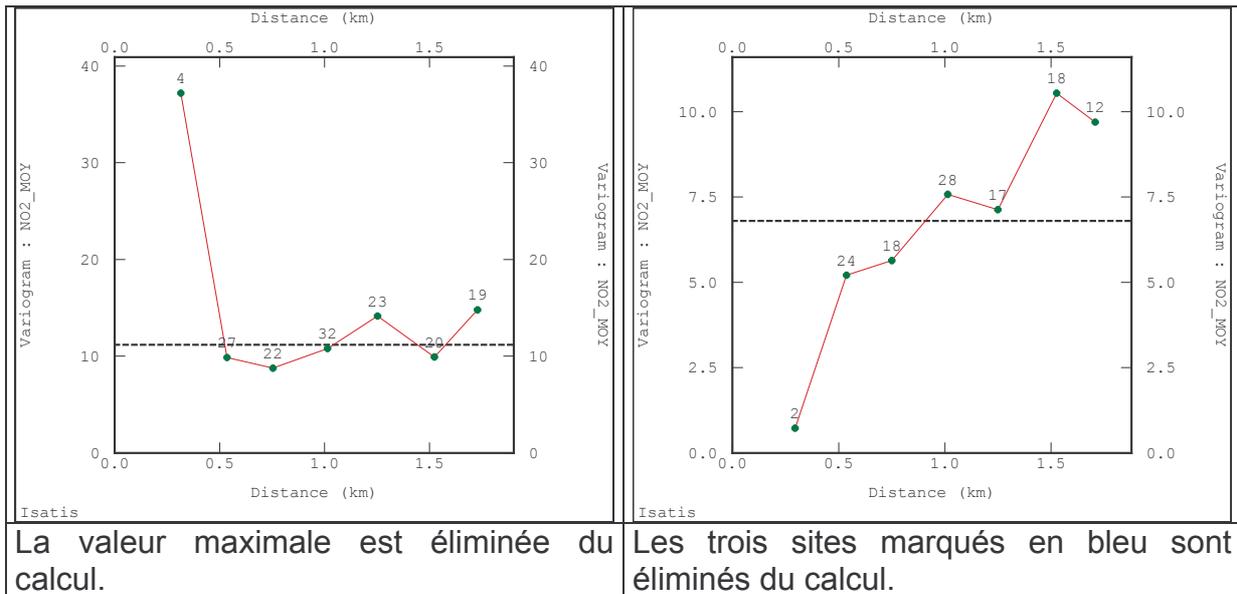


On note une structure de petite échelle, de portée voisine du kilomètre.

Courbevoie



Les points de plus forte variabilité dans la nuée variographique sont créés par les sites d'échantillonnage marqués en bleu sur la carte.



La valeur maximale est éliminée du calcul.

Les trois sites marqués en bleu sont éliminés du calcul.

Le variogramme expérimental est sensible à la sélection des sites de mesure. Il est délicat de conclure sur la structure spatiale aux petites distances.

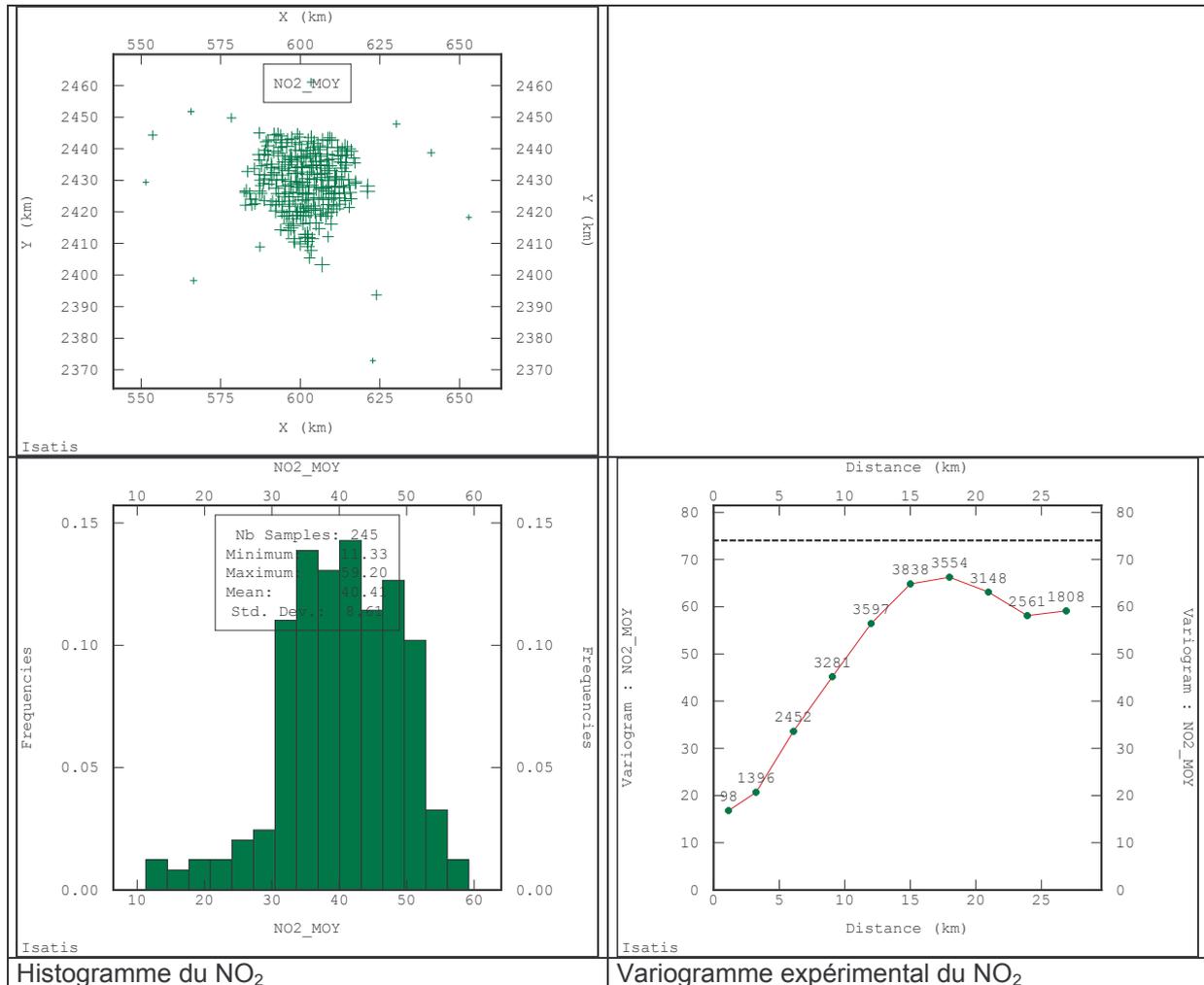
La difficulté d'une analyse à l'échelle du quartier est notamment liée à la nature des données mesurées. En effet, à cause de l'urbanisation dense, comme le note AIRPARIF dans son rapport d'étude, certains points d'échantillonnage sont situés dans des endroits insuffisamment dégagés (les critères d'un site de fond ne sont pas totalement respectés). Leur représentativité spatiale peut donc être limitée. Il en résulte une certaine variabilité spatiale dans les mesures.

En ce qui concerne le benzène, aucune structure n'est mise en évidence.

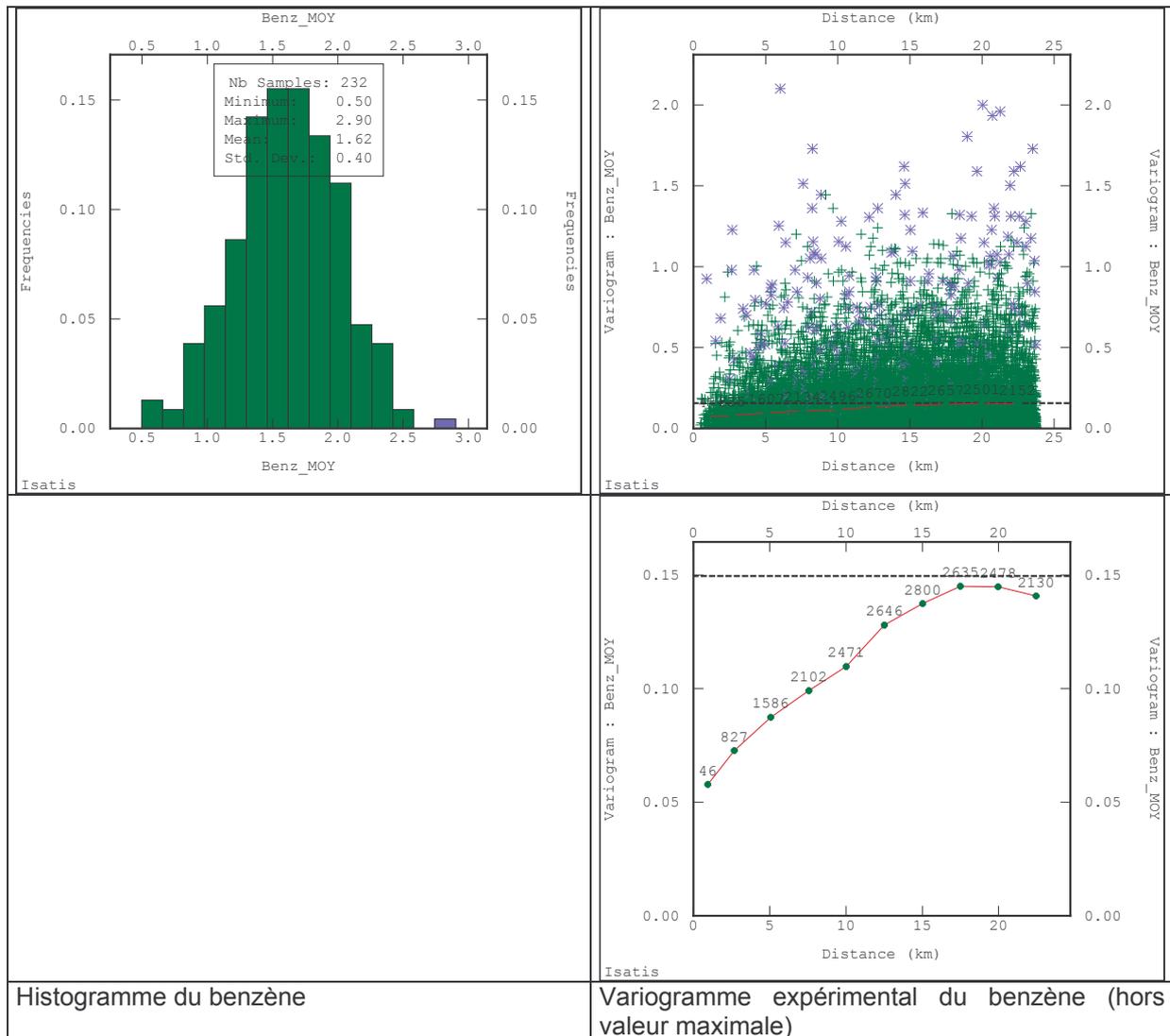
Echelle de l'agglomération.

A l'échelle de l'agglomération, pour le NO₂ et le benzène, le variogramme expérimental présente un effet de pépite et une structure sphérique de portée comprise entre 15 et 20 km.

NO₂



Benzène



ANNEXE 9 : Recensement des études réalisées par échantillonnage passif au sein des AASQA

Un fichier Excel, disponible sur le site Internet du LCSQA (www.lcsqa.org), recense les campagnes de mesure par échantillonnage passif, qui ont été conduites par les AASQA dans les zones aéroportuaires, près des axes de circulation, dans les zones industrielles et dans les grandes villes. Il indique en outre les principales caractéristiques de chaque campagne.