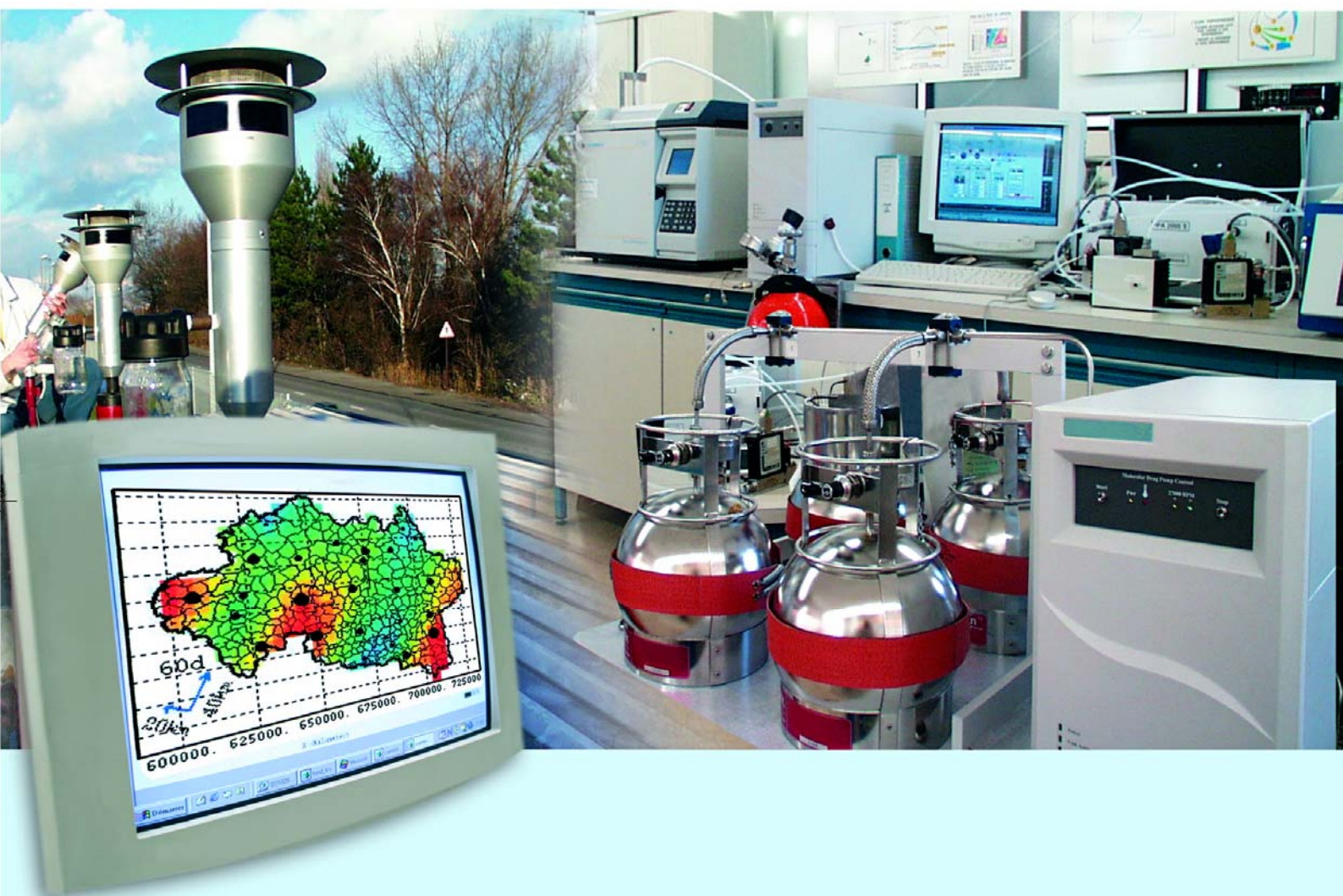




Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



Modélisation et Traitement Numériques

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 de mesure de NO_2 et O_3

Décembre 2007

Programme 2007

G. CARDENAS ET L. MALHERBE





PREAMBULE

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

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

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



Représentativité des stations de mesures 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

Laboratoire Central de Surveillance
de la Qualité de l'Air

Modélisation et Traitements Numériques

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

2007

G CARDENAS, L. MALHERBE (INERIS)

Ce document comporte 122 pages (hors couverture).

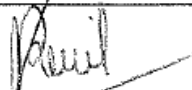
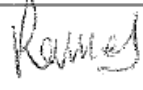
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	G. Cardenas L. Malherbe	J. Y. Chatelier L. Rouil	M. RAMEL
Qualité	Ingénieurs Direction des Risques Chroniques	Responsable Unité 2IEN Responsable Unité MECO Direction des Risques Chroniques	Responsable LCSQA/INERIS Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	11
REMERCIEMENTS.....	12
1. INTRODUCTION	13
2. DEFINITION DE L'OBJET DE L'ETUDE	14
2.1 Définition(s) existantes	14
2.2 Exigences en matière de représentativité	15
2.2.1 Réglementation.....	15
2.2.2 Guide ADEME sur la classification des stations	20
2.3 Quantification de la représentativité spatiale d'une station.....	20
3. ANALYSE DES METHODES	22
3.1 Méthodes existantes	22
3.1.1 Long terme	22
3.1.2 Court terme.....	23
3.2 Caractérisation des méthodes.....	24
3.2.1 Méthode proposée par l'Ecole des Mines de Douai.....	24
3.2.1.1 Données d'entrée :	24
3.2.1.2 Mode et outils de calcul :	24
3.2.2 Méthode proposée par Air Normand.....	25
3.2.2.1 Données d'entrée :	25
3.2.2.2 Mode et outils de calcul :	26
3.2.2.2.1 Influence des paramètres pour le calcul des zones de représentativité	27
3.2.2.2.1.1 Ecart-type d'estimation	27
3.2.2.2.1.2 Ecart maximal toléré (δ).....	28
3.2.2.2.1.3 Probabilité	29
3.2.2.2.2 Rattachement d'un point a une station fixe	30
3.2.2.2.3 Dépassement de seuils	30
3.3 Analyse Des Résultats Obtenus.....	32
3.3.1 ROUEN.....	32
3.3.1.1 Zones de représentativité par station fixe.....	35

3.3.1.2	Rattachement d'un point à une station fixe.....	38
3.3.1.3	Dépassement de seuils	40
3.3.2	LILLE	44
3.3.2.1	Zones de représentativité par station fixe	47
3.3.2.2	Rattachement d'un point à une station fixe.....	52
3.3.2.3	Dépassement de seuils	54
4.	CONCLUSIONS.....	57
5.	BIBLIOGRAPHIE.....	59
6.	LISTE DES ANNEXES	60

LISTE DES FIGURES

Figure 1: ROUEN - Localisation et nombre de mesures par tubes passifs disponibles	32
Figure 2 : ROUEN - Carte de l'estimation de la moyenne annuelle de N02 pour l'année 2005.....	33
Figure 3 : ROUEN - Carte de l'écart - type de krigeage de la moyenne annuelle de N02 pour l'année 2005	34
Figure 4 : ROUEN : Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Justice (32.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	35
Figure 5 : ROUEN : Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Justice (32.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 95%	36
Figure 6 : ROUEN – SF JUS : Carte de la probabilité maximale que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 27.8 et 37.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$...	37
Figure 7 : ROUEN - Carte de la plus petite valeur des écarts maximaux (quantité δ') pour une probabilité de 95%	38
Figure 8 : ROUEN : Zones rattachées aux stations fixes	39
Figure 9 : ROUEN : Zones rattachées se trouvant à une distance maximale de 940m des stations fixes.....	39
Figure 10 : ROUEN : Dépassement par rapport à un seuil de 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec 95% de confiance	40
Figure 11 : ROUEN : Dépassement par rapport à un seuil de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec 95% de confiance	41
Figure 12 : ROUEN : Dépassement par rapport à un seuil de 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec 66% de confiance	42
Figure 13 : ROUEN : Dépassement par rapport à un seuil de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec 66% de confiance	43
Figure 14: LILLE - Localisation de mesures par TP disponibles.....	44
Figure 15 : LILLE - Carte de l'estimation de la moyenne annuelle de N02 pour l'année 2003-2004.....	45
Figure 16 : LILLE - Carte de l'écart - type de krigeage de la moyenne annuelle de N02 pour l'année 2003-2004	47
Figure 17 : LILLE – SF Lille Faidherbe (11024) : Carte de la probabilité maximale que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 44.46 et 34.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	48
Figure 18 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Lille Faidherbe (39.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	49

Figure 19 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Lille Faidherbe ($39.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%.....	49
Figure 20 : LILLE – SF Roubaix Château (11002) : Carte de la probabilité maximale que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 40.78 et $30.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$	50
Figure 21 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Roubaix Château ($35.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	51
Figure 22 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Roubaix Château ($35.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%..	51
Figure 23 : LILLE - Carte de la plus petite valeur des écarts maximaux pour une probabilité de 95%	52
Figure 24 : LILLE - Zones rattachées et rayon représentant une distance de 1070m des stations fixes	53
Figure 25 : LILLE - Zones rattachées se trouvant à une distance maximale de 1070m des stations fixes	53
Figure 26 : LILLE - dépassement par rapport à un seuil de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (P 90%), Stations Roubaix Châteaux (11002) et Lille Faidherbe (11024)	54
Figure 27 : LILLE - dépassement par rapport à un seuil de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (P 66%), Stations Roubaix Châteaux (11002) et Lille Faidherbe (11024)	55
Figure 28 : LILLE - dépassement par rapport à un seuil de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (P 90%), Stations Roubaix Châteaux (11002) et Lille Faidherbe (11024)	55
Figure 29 : LILLE - dépassement par rapport à un seuil de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (P 66%), Stations Roubaix Châteaux (11002) et Lille Faidherbe (11024)	56
Figure 30 : ROUEN - Localisation des tubes passifs, campagnes de 2000 et 2005	77
Figure 31 : ROUEN – Statistiques de la moyenne annuelle des campagnes de 2000 et 2005.....	78
Figure 32 : ROUEN – Nuage de corrélation entre les moyennes annuelles de campagnes de 2000 et 2005	79
Figure 33 : ROUEN – Modèle de variogramme croisé entre les campagnes de 2000 et 2005.....	80
Figure 34 : ROUEN – Validation croisée pour la moyenne 2005 du model de variogramme ajusté entre les campagnes de 2000 et 2005	81
Figure 35 : ROUEN – Carte d'estimation de la moyenne 2005 de NO_2	82
Figure 36 : ROUEN – Carte de l'écart - type d'estimation de la moyenne 2005 de NO_2	83
Figure 37 : ROUEN : Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe LEC ($30.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$).....	84
Figure 38 : ROUEN : Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe PQV ($31.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	85
Figure 39 : ROUEN : Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe CHS ($23.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	86

Figure 40 : ROUEN : Carte de l'écart maximal entre la concentration estimée et celle de la station fixe DEV (24.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	87
Figure 41 : ROUEN - SF LEC : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 35.9 et 25.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$...	88
Figure 42 : ROUEN - SF PQV : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 36.6 et 26.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$...	89
Figure 43 : ROUEN - SF CHS : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 28.89 et 18.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	90
Figure 44 : ROUEN - SF DEV : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 29.02 et 19.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	91
Figure 45 : ROUEN : Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe LEC (30.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 95%	92
Figure 46 : ROUEN : Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe PQV (31.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 95%.....	93
Figure 47 : ROUEN : Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe CHS (23.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 95%.....	94
Figure 48 : ROUEN : Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe DEV (24.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 95%	95
Figure 49 : LILLE - Modèle des variogrammes simples et croisés des moyennes saisonnières	98
Figure 50 : LILLE - Cartes des estimations et de l'écart - type d'estimation de la moyenne de l'hiver 2003-2004	99
Figure 51 : LILLE - Cartes des estimations et de l'écart - type d'estimation de la moyenne de l'été 2003	100
Figure 52 : LILLE - Cartes des estimations et de l'écart - type d'estimation de la moyenne annuelle 2003-2004	101
Figure 53 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Lille Five Lakanal (32.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	102
Figure 54 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Halluin Caillaux (27.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	103
Figure 55 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Lesquin (33.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	104
Figure 56 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Tourcoing – Bienfaisance (32.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	105
Figure 57 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Marcq - en - Baroeul (32.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	106
Figure 58 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Lomme (30.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	107
Figure 59 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Ville d'Ascq Rameau (28.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	108

Figure 60 : LILLE – SF Lille Five Lakanal (11025) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 37.47 et 27.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	109
Figure 61 : LILLE – SF Halluin Caillou (11026) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 32.83 et 22.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	110
Figure 62 : LILLE – SF Lesquin (11033) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 38.90 et 28.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	111
Figure 63 : LILLE – SF Tourcoing – Bienfaisance (11027) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 37.78 et 27.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	112
Figure 64 : LILLE – SF Marcq - en - Baroeul (11016) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 37.18 et 27.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	113
Figure 65 : LILLE – SF Lomme (11029) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 35.59 et 25.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	114
Figure 66 : LILLE – SF Ville d'Ascq Rameau(11032) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 33.80 et 23.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	115
Figure 67 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Lille Five Lakanal (32.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%	116
Figure 68 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Halluin Caillaux (27.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%...	117
Figure 69 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Lesquin (33.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%	118
Figure 70 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Tourcoing – Bienfaisance (32.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%	119
Figure 71 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Marcq - en - Baroeul (32.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%	120
Figure 72 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Lomme (30.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%	121
Figure 73 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Ville d'Ascq Rameau (28.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%	122

LISTE DES EQUATIONS

Équation 1 : Définition de la représentativité spatiale	22
Équation 2 : Définition de la représentativité spatiale en prenant en compte les estimations de la moyenne annuelle de NO ₂	22
Équation 3 : Définition de la représentativité en prenant en compte l'erreur d'estimation de la moyenne annuelle de NO ₂	26
Équation 4 : Définition de la représentativité avec prise en compte de l'erreur d'estimation	26
Équation 5 : Calcul d'une zone de représentativité : condition sur l'écart - type de krigeage dans le cas où $Z^* = Z^{SF}$	27
Équation 6 : Condition sur l'écart maximal toléré	29
Équation 7 : Calcul de la probabilité que l'écart entre les concentrations soit inférieur ou égal à δ	30
Équation 8 : Calcul d'une station de rattachement	30
Équation 9 : Expressions permettant de déterminer la possibilité de dépasser une concentration donnée (seuil réglementaire) dans une zone rattachée à une station fixe.....	31
Équation 10 : Définition de représentativité avec prise en compte de l'erreur d'estimation (estimation multivariable par le modèle des résidus).....	70
Équation 11 : Condition imposant un milieu similaire à celui de la station dans la définition de la représentativité avec une estimation multivariable par le modèle des résidus	70
Équation 12 : Calcul d'une station de rattachement (estimation multivariable par modèle des résidus : condition n'imposant pas de similarité de milieu)	71
Équation 13 : Calcul d'une station de rattachement (estimation multivariable par modèle des résidus : condition imposant un milieu similaire à celui de la station)	71
Équation 14 : LILLE - Déduction de l'expression pour le calcul de l'écart - type d'estimation de la moyenne annuelle	97

LISTE DES TABLES

Tableau 1 – Plages de concentration recommandées pour délimiter les zones de représentativité d'une station (Spangl et al., 2007).....	15
Tableau 2 – Réglementation et représentativité spatiale.....	19
Tableau 3 – Aires de représentativité définies par l'Agence européenne de l'Environnement.....	20
Tableau 4 : Moyenne Annuelle de NO ₂ calculé aux cinq SF.....	34
Tableau 5 : Moyenne annuelle de NO ₂ calculée aux SF.....	46

RESUME

Cette étude constitue une première approche de la problématique de la représentativité spatiale d'une mesure, concept qui apparaît très souvent dans les textes réglementaires de la qualité de l'air (directives européennes, guides ADEME, etc.).

Deux méthodes permettant d'évaluer la représentativité spatiale d'une station fixe selon un objectif de surveillance à long terme sont traitées en détail. La première a été étudiée par Perdrix et al. (2001) et la seconde a été développée plus récemment par Air Normand (Cori et al., 2005).

Pour ces deux méthodes, un point du domaine fait partie de la zone de représentativité d'une station si l'écart entre les concentrations moyennes en ce point et au lieu de la station est « faible ». Comme la valeur réelle de la concentration n'est généralement pas connue dans tous les points du domaine, on la remplace par la valeur estimée par krigeage.

Dans la méthode proposée par l'Ecole des Mines de Douai, on compare les estimations obtenues avec un intervalle de concentrations défini à l'avance. Dans la méthode proposée par Air Normand on effectue le même type de comparaison mais en prenant en compte l'incertitude sur les estimations, ce qui résulte en l'obtention de zones de représentativité en fonction d'un niveau de confiance ou probabilité qu'il faut déterminer à l'avance ; ces zones en conséquence moins étendues que celles obtenues par la première méthode.

Ce rapport comprend :

- une présentation générale de la problématique ;
- la présentation détaillée des deux méthodes d'évaluation proposées ;
- l'analyse des résultats obtenus dans deux cas d'étude pour les agglomérations de Rouen et de Lille.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les associations AIRNORMAND et AREMA LILLE METROPOLE pour les données fournies et le soutien apporté lors de la réalisation de cette étude.

1. INTRODUCTION

Dans divers contextes, les AASQA sont confrontées à la question de la représentativité spatiale des stations de mesure fixes :

- Des exigences en matière de représentativité spatiale figurent explicitement dans les directives européennes et dans le guide de l'ADEME *Classification et critères d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air*. Les stations de mesure remplissent-elles ces conditions ? Les directives demandent que « les sites et la documentation s'y rapportant soient réévalués à intervalles réguliers, afin de vérifier que les critères de sélection restent toujours valables. »
- Régulièrement, les AASQA sont sollicitées par des particuliers qui souhaitent connaître, à l'endroit précis où ils habitent, la qualité de l'air qu'ils respirent, De cette interrogation, découle la suivante : « A quelle station de mesure les lieux d'habitation en question peuvent-il être rattachés ? »
- Avec la rédaction des PSQA en 2005, des réflexions ont été engagées sur la réorganisation du réseau de mesure français afin de prendre en compte les nouvelles réglementations, les évolutions de la pollution et les possibilités offertes par les méthodes d'évaluation complémentaires (combinaisons de mesures en continu, de mesures temporaires, et de modélisation). Ces réflexions conduisent les AASQA à s'interroger sur la représentativité spatiale de leurs stations.

Les nouveaux résultats présentés dans ce rapport constituent une première approche de cette problématique et visent à mieux comprendre le concept de la représentativité spatiale d'une mesure.

L'étude se scinde en trois parties :

- La première présente une revue bibliographique sur la notion de représentativité spatiale d'une mesure de qualité de l'air, ainsi que sur les méthodes disponibles pour caractériser cette représentativité.
- La seconde correspond à l'analyse des méthodes développées par le LCSQA en 2001 d'une part, et par l'association Air Normand en 2005 d'autre part. Il s'agit de méthodes proposées pour le calcul de zones de représentativité pour les stations fixes, relativement à un objectif de surveillance à long terme¹.
- La dernière partie correspond à deux études de cas dans lesquelles les méthodes sont appliquées. Finalement les résultats sont analysés et comparés afin de conclure sur l'applicabilité réelle de telles méthodes au sein des AASQA.

¹ Le dioxyde d'azote est le seul polluant visé par un objectif de surveillance à long terme, la valeur de référence est de 40 µg/m³ en moyenne annuelle.

2. DEFINITION DE L'OBJET DE L'ETUDE

Ce chapitre présente un bref état des lieux sur la notion de représentativité spatiale : définition(s), exigences réglementaires, méthodes de quantification. Il repose sur une lecture de la réglementation, d'un document de référence de l'ADEME (ADEME, 2002) et de publications scientifiques.

2.1 DEFINITION(S) EXISTANTES

La notion de représentativité est liée à celle de similarité : similarité de concentration ; similarité de milieu. Un tout récent rapport réalisé pour le compte de la Commission européenne (Spangl et al., 2007) propose une définition fondée sur deux critères : une station est représentative d'un site :

- si les différences de concentration (de moyenne annuelle et/ou de centile) entre les deux sites sur une période de temps donnée sont inférieures à un certain seuil, et cela, pendant trois années consécutives.
- si ce premier critère est vérifié non pas fortuitement mais parce que les deux sites ont des caractères similaires : mêmes émissions et conditions de dispersion (météorologie, topographie, type de bâtiments, etc.), même échelle des processus de chimie-transport.

Cette définition s'accorde avec la réglementation européenne décrite en 2.2.1. Notons qu'elle ne restreint pas la zone de représentativité d'une station à un domaine centré sur celle-ci.

En revanche, comme le font remarquer les auteurs, elle ne prend pas en compte la représentativité pour des valeurs de court terme telles que les seuils d'alerte.

Remarque : dans une étude antérieure, Van den Hout et Larssen (2006) indiquent que la représentativité d'une station par rapport à un autre site peut être définie :

- en fixant un écart maximal entre les paramètres de concentration les plus pertinents (moyenne annuelle, centiles, dépassements), par exemple 20%, comme il est suggéré dans le projet EUROAIRNET (<http://air-climate.eionet.europa.eu/databases/EuroAirnet/index.html>) ;
- ou bien en fixant une probabilité minimale pour que cet écart soit inférieur à la valeur choisie.

Polluant	Plage de concentration	Limites utilisées pour définir les zones de représentativité
NO ₂	10 µg/m ³	Moyenne annuelle à la station ± 5 µg/m ³
PM ₁₀	10 µg/m ³	Moyenne annuelle à la station ± 5 µg/m ³
PM ₁₀	16 µg/m ³	Centile 90,4 des concentrations journalières mesurées à la station ± 8 µg/m ³
Ozone	18 µg/m ³	Centile 93,2 des maximums journaliers des moyennes sur 8 heures mesurées à la station ± 9 µg/m ³

Tableau 1 – Plages de concentration recommandées pour délimiter les zones de représentativité d'une station (Spangl et al., 2007)

2.2 EXIGENCES EN MATIERE DE REPRESENTATIVITE

2.2.1 REGLEMENTATION

Les Directives européennes ne définissent pas explicitement la représentativité spatiale d'une station de mesure. Elles n'indiquent pas non plus de quelle façon et selon quels critères cette représentativité peut être évaluée. Mais elles contiennent un certain nombre d'exigences, indiquées dans le tableau ci-après, qui présupposent une telle évaluation.

Directives	Exigences
96/62/CE (Directive cadre)	<u>Article 5 :</u> Evaluation préliminaire de la qualité de l'air ambiant Les États membres ne disposant pas, pour toutes les zones et agglomérations, de mesures représentatives des niveaux des polluants procèdent à des campagnes de mesures représentatives, d'enquête ou d'évaluation (...)
1999/20/CE (SO ₂ , NO ₂ , NO _x , PM, Pb)	<u>ANNEXE II :</u> VALEURS LIMITES POUR LE DIOXYDE D'AZOTE (NO₂) ET LES OXYDES D'AZOTE (NO_x) ET SEUIL D'ALERTE POUR LE DIOXYDE D'AZOTE II. Seuil d'alerte pour le dioxyde d'azote 400 µg/m³ relevés sur trois heures consécutives dans des lieux représentatifs de la qualité de l'air sur au moins 100 km² ou une zone ou agglomération entière, la plus petite surface étant retenue. <u>ANNEXE VI :</u> EMPLACEMENT DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT POUR LA MESURE DE L'ANHYDRIDE SULFUREUX, DU DIOXYDE D'AZOTE ET D'OXYDES D'AZOTE, DE PARTICULES ET DE PLOMB DANS L'AIR AMBIANT Les considérations suivantes s'appliquent aux mesures fixes. I. Macro-implantation a) Protection de la santé humaine Les points de prélèvement visant à assurer la protection de la santé humaine doivent être localisés de manière à : i) fournir des renseignements sur les endroits des zones et agglomérations concernées où s'observent les plus fortes concentrations auxquelles la population est susceptible d'être directement ou indirectement exposée pendant une période significative par rapport à la période considérée pour le calcul de la ou des valeurs limites; ii) fournir des renseignements sur les concentrations dans d'autres endroits de ces zones et agglomérations, qui sont représentatifs du niveau d'exposition de la population générale. (...). À titre d'orientation, un point de prélèvement devrait être placé en un lieu représentatif de la qualité de l'air dans une zone d'au moins 200 m² autour de ce point dans des lieux où est mesurée la pollution due à la circulation et de plusieurs kilomètres carrés dans des lieux urbanisés. Les points de prélèvements devraient, dans la mesure du possible, être également représentatifs de sites similaires ne se trouvant pas à proximité immédiate. (...) b) Protection des écosystèmes et de la végétation Les points de prélèvement visant à assurer la protection des écosystèmes et de la végétation doivent être situés à plus de 20 km des agglomérations ou de 5 km d'une autre zone construite, d'une installation industrielle ou d'une autoroute. À titre indicatif, un point de

Directives	Exigences
	prélèvement devrait être placé en un lieu représentatif de la qualité de l'air dans une zone d'au moins 1000 km² située autour de ce point. Les États membres peuvent prévoir qu'un point de prélèvement sera situé à une distance plus rapprochée ou qu'il sera représentatif de la qualité de l'air dans une zone moins étendue, compte tenu des conditions géographiques. (...) <u>ANNEXE VIII :</u> OBJECTIFS DE QUALITÉ DES DONNÉES ET COMPILATION DES RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR II. Résultats de l'évaluation de la qualité de l'air Les informations suivantes doivent être réunies pour les zones ou agglomérations pour lesquelles d'autres sources de renseignements complètent les données fournies par la mesure ou sont les seuls moyens d'évaluation de la qualité de l'air : (...) - description des résultats, y compris des incertitudes; en particulier indication de l'étendue de toute zone ou, le cas échéant, de la longueur de route au sein de la zone ou agglomération, où les concentrations dépassent la(les) valeur(s) limite(s) ou, selon le cas, la(les) valeur(s) limite(s) augmentée(s) de la (des) marge(s) de dépassement applicable(s) et de toute zone au sein de laquelle les concentrations dépassent le seuil d'évaluation maximal ou le seuil d'évaluation minimal, (...)
Directive 2000/69/CE (Benzène, CO)	Mêmes exigences que ci-dessus en ce qui concerne la macro-implantation des points de prélèvement et les résultats de l'évaluation de la qualité de l'air.
2002/3/CE (O ₃)	Mêmes types d'exigences que ci-dessus : <u>ANNEXE IV :</u> CRITÈRES DE CLASSIFICATION ET D'IMPLANTATION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT POUR L'ÉVALUATION DES CONCENTRATIONS D'OZONE I. Macro-implantation Type de station (TS) Objectifs de la mesure (OM) Représentativité (R) Critères de choix d'un site à grande échelle (C) TS : Urbaine OM : Protection de la santé humaine R : Quelques km² (...) TS : Périurbaine

Directives	Exigences
	OM : Protection de la santé humaine et de la végétation R : Quelques dizaines de km² (...) TS : Rurale OM : Protection de la santé humaine et de la végétation R : Niveaux sous-régionaux (quelques centaines de km²) (...) TS : Rurale de fond OM : Protection de la végétation et de la santé humaine R : Niveaux régionaux/nationaux/continentaux (de 1000 à 10000 km²) (...) Les points de prélèvements devraient, dans la mesure du possible, être également représentatifs de sites similaires ne se trouvant pas à proximité immédiate. ANNEXE VII : OBJECTIFS DE QUALITÉ DES DONNÉES ET COMPILATION DES RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR II. Résultats de l'évaluation de la qualité de l'air (...) - description des résultats, y compris les degrés d'incertitude et, en particulier, l'étendue de tout site situé à l'intérieur de la zone ou de l'agglomération au sein duquel les concentrations dépassent les objectifs à long terme ou les valeurs cibles, (...)
2004/107/CE (As, Cd, Hg, Ni, HAP)	ANNEXE III : EMPLACEMENT ET NOMBRE MINIMAL DES POINTS DE PRÉLEVEMENT POUR LA MESURE DES CONCENTRATIONS DANS L'AIR AMBIANT ET DES TAUX DE DÉPÔT I. Macro-implantation À titre d'orientation, un point de prélèvement devrait être placé en un lieu représentatif de la qualité de l'air dans une zone environnante d'au moins 200 m² pour les sites axés sur le trafic, d'au moins 250 m x 250 m pour les sites industriels lorsque cela est faisable, et de plusieurs kilomètres carrés pour les sites urbains de fond.
Projet de directive unifiée	Reprend l'ensemble des exigences mentionnées ci-dessus

Directives	Exigences
Arrêté du 17 mars 2003 relatif aux modalités de surveillance de la qualité de l'air et à l'information du public	Article 7 : Les organismes agréés de surveillance de la qualité de l'air s'assurent que les mesures en station fixe réalisées en continu, les mesures en station fixe réalisées par prélèvement aléatoire, les mesures indicatives, la modélisation et l'estimation objective respectent les objectifs de qualité des données énoncés dans les directives n° 1999/30/CE (annexe VIII), n° 2000/69/CE (annexe VI) et n° 2002/3/CE (annexe VII) avec la représentativité demandée dans les directives n° 1999/30/CE (annexe VI), n° 2000/69/CE (annexe VI) et n° 2002/3/CE (annexe IV).

Tableau 2 – Réglementation et représentativité spatiale

Commentaires

1) En ce qui concerne l'implantation des points de prélèvement, **les aires de représentativité fixées par les directives dépendent de la typologie des sites** mais elles ne sont explicitement liées à aucune notion de temps.

Par suite, on peut supposer qu'étant donné

- un polluant,
- les valeurs limites et les valeurs cibles qui lui sont associées,
- les supports temporels de ces valeurs, i.e. les périodes d'intégration considérées dans leur calcul (ex : année, jour, 8 heures...),

une station doit être représentative de l'aire indiquée, pour l'ensemble de ces supports.

S'agissant de l'ozone, l'aire de représentativité requise est fonction de la typologie du site mais aussi des objectifs de la surveillance : protection de la santé humaine et/ou de la végétation. Dans ce cas, il paraît logique qu'une station n'ait à satisfaire aux exigences de représentativité que pour les supports temporels concernés par ces objectifs.

2) Selon les annexes relatives aux « résultats de l'évaluation de la qualité de l'air » l'Etat membre doit préciser l'étendue touchée par tout dépassement d'une valeur limite/valeur cible/objectif à long terme. Cela suppose qu'il soit possible d'évaluer la représentativité spatiale d'une station pour toutes les statistiques de concentration qu'il est demandé de comparer à ces valeurs.

3) Les exigences de représentativité figurant dans les directives concernent le **domaine d'espace situé autour des stations**. Néanmoins, les directives préconisent aussi que dans la mesure du possible, les points de prélèvement soient « **représentatifs de sites similaires ne se trouvant pas à proximité immédiate** ». Cette recommandation étend la représentativité spatiale à des portions de l'espace qui n'entourent pas nécessairement la station, mais qui présentent des similarités de milieu.

2.2.2 GUIDE ADEME SUR LA CLASSIFICATION DES STATIONS

Ce guide ne définit pas précisément la représentativité mais il reprend les prescriptions des directives et mentionne, à titre indicatif, les aires de représentativité des différentes classes de stations, telles qu'elles sont définies par l'Agence européenne de l'environnement dans le projet EUROAIRNET (cf. Tableau 3).

Il met cependant en garde contre les valeurs minimales indiquées dans ce tableau, faisant remarquer qu'en pratique, les aires de représentativité dépendent de la situation topographique, de la variabilité locale des émissions, des régimes météorologiques et du polluant considéré.

Caractéristiques des stations	Typologie	Rayon de l'aire de représentativité
Stations de fond réalisant un suivi de l'exposition moyenne des personnes et de l'environnement	Fond urbain	de 100 m à 2 km
	Fond périurbain	de 1 km à 5 km
	Fond rural régional	de 5 km à 25 km
	Fond rural national	de 30 km à 500 km
Stations de proximité	Proximité industrielle	de 100 m à 5 km
	Proximité routière	de 10 m à 50 m

Tableau 3 – Aires de représentativité définies par l'Agence européenne de l'Environnement

2.3 QUANTIFICATION DE LA REPRESENTATIVITE SPATIALE D'UNE STATION

L'approche étudiée par Perdrix et al. (2001) et celle qui a été développée plus récemment par AIRNORMAND (Cori et al., 2005) sont traitées en détail dans le corps du document.

Deux autres publications méritent d'être mentionnées.

Dans leur rapport pour la Commission européenne, Spangl et al. (2007) proposent une démarche assez détaillée, étayée de références bibliographiques et assortie d'exemples d'application. Cette méthodologie, qui se réfère à la définition indiquée au paragraphe 2.1, comprend les étapes suivantes :

1. Evaluation des concentrations dans tout l'espace :
 - par modélisation à des résolutions spatiale et temporelle appropriées ;
 - par modélisation paramétrique, interpolation avec variables auxiliaires, etc.
2. Délimitation des zones vérifiant le critère de similarité de concentration ;

3. Découpage du domaine en fonction des émissions (à l'aide d'un inventaire des émissions dans le meilleur des cas ou de données de substitution : occupation du sol, population...) : une condition nécessaire pour qu'un site appartienne à la zone de représentativité d'une station est qu'il se trouve dans la même classe d'émission.
4. Etude de la dispersion à l'échelle locale, régionale ou à grande échelle selon le type de station considéré. Des informations sur le bâti (échelle locale) ou sur la topographie (échelle régionale ou nationale) sont utilisées à cette fin. Une condition nécessaire pour qu'un site appartienne à la zone de représentativité d'une station est qu'il se trouve dans une situation de dispersion similaire.

Plus anciennement, Chan et Hwang (1996) ont défini un critère statistique spatio-temporel, compris entre 0 et 1, qui quantifie la représentativité spatiale d'une station. Ce critère dépend des écarts quadratiques mesurés au cours du temps entre la station étudiée et des sites temporaires disposés sur des cercles concentriques autour de cette station. Cette approche est intéressante mais peu aisée à généraliser car elle suppose de mettre en place simultanément plusieurs moyens mobiles autour d'une station fixe.

3. ANALYSE DES METHODES

3.1 METHODES EXISTANTES

On a vu que pour un polluant donné (ici NO₂ et ozone), la définition de la représentativité spatiale dépendait des objectifs de surveillance et notamment des valeurs limites qui relèvent de ces objectifs : valeurs moyennes sur le long terme (ex : moyennes annuelles) ou valeurs de court terme (ex : seuils horaires).

3.1.1 LONG TERME

Les méthodes analysées dans cette étude répondent à une définition de la représentativité spatiale d'une station fixe pour la moyenne annuelle. Elles concernent plus particulièrement le NO₂, puisque pour l'ozone, il n'existe pas de d'objectif en moyenne annuelle.

Dans ce cas, un point du domaine fait partie de la zone de représentativité d'une station fixe si l'écart entre les concentrations est « faible ».

Cette différence doit être inférieure ou égale à une quantité définie à l'avance, appelée « écart maximal toléré ».

$$\boxed{\left| z_i - z^{SF_j} \right| \leq \delta_i^j}$$

δ_i^j : Écart maximal toléré entre la moyenne annuelle de la station fixe j et la concentration d'un point i
 z_i : Concentration annuelle du NO₂ dans un point i.
 z^{SF_j} : Moyenne annuelle de NO₂ de la SF j.

Équation 1 : Définition de la représentativité spatiale

Comme la valeur réelle de la concentration n'est généralement pas connue dans tous les points du domaine, on la remplace par la valeur estimée par krigeage :

$$\boxed{\left| z_i^* - z^{SF_j} \right| \leq \delta_i^j}$$

z_i^* : Concentration annuelle estimée du NO₂ dans la maille i.

Équation 2 : Définition de la représentativité spatiale en prenant en compte les estimations de la moyenne annuelle de NO₂

Deux méthodes ont été proposées pour répondre à cette définition : la première est celle qui est présentée dans le rapport LCSQA 2001 de l'Ecole des Mines de Douai (Perdrix et al., 2001), la seconde a été développée en 2005 à l'occasion d'un stage de fin d'étude au sein de l'association Air Normand (Cori, 2005).

Dans la méthode proposée par l'Ecole des Mines de Douai, l'expression de l'Équation 2 est utilisée directement pour le calcul des zones de représentativité ; en revanche la méthode proposée par Air Normand tient compte de l'incertitude sur les estimations.

3.1.2 COURT TERME

La définition d'une méthodologie pour définir des zones de représentativité associées à des valeurs limites de court terme est beaucoup plus compliquée. Le problème réside dans l'estimation spatiale d'une variable de dépassement. Par exemple, dans le cas du NO₂², il s'agit de cartographier sur le domaine d'étude le centile 99.8 des concentrations horaires³, puis de le comparer à la valeur seuil de 200 µg/m³.

Pour effectuer une telle estimation, il serait nécessaire de disposer des concentrations horaires pendant une année dans tout le domaine⁴, puis de calculer le centile en chaque point et enfin, de comparer ces centiles à celui de la station fixe dont on veut évaluer la représentativité spatiale.

Il est donc nécessaire de recourir à une méthode permettant de reproduire les concentrations horaires sur tout le domaine.

Deux méthodologies pourraient être utilisées à cette fin ; la première consiste à appliquer la méthode de simulations conditionnelles⁵ et la seconde à employer la méthodologie de cartographie automatique de NO₂ développée par le LCSQA en 2005 et 2006 (cf. BIBLIOGRAPHIE).

Dans les deux cas, une étude de faisabilité doit être réalisée afin de tester les méthodes et de les adapter au cas du NO₂ et de l'ozone. Cela n'a pas été l'objet de cette étude mais pourra être développé à l'avenir par le LCSQA.

² La directive européenne N° 1999/30/CE du 22 avril 1999 dispose qu'à partir de 2010 les concentrations horaires ne doivent pas dépasser une valeur limite de 200 µg/m³ plus de dix-huit fois par an.

³ Si on suppose qu'une année à 8760 heures (=365 jours * 24heures), dans ce cas le percentile se calcule ainsi : $[1-(18*100/876)] = 99.8\%$

⁴ Les percentiles ne peuvent être calculés qu'à partir des mesures continues pendant une année et contrairement aux concentrations, ils ne peuvent pas être interpolés par krigeage car il s'agit d'une quantité non linéaire.

⁵ Le LCSQA a présenté cette méthode dans un rapport de géostatistique (Cardenas, 2004).

3.2 CARACTERISATION DES METHODES

3.2.1 METHODE PROPOSEE PAR L'ECOLE DES MINES DE DOUAI

3.2.1.1 DONNEES D'ENTREE :

- Estimation de la moyenne annuelle du dioxyde d'azote par des méthodes géostatistiques ; cette variable doit être estimée sur une grille couvrant l'ensemble de la zone étudiée.
- Coordonnées géographiques des capteurs et moyenne annuelle des concentrations du dioxyde d'azote.
- δ : Ecart maximal toléré entre la moyenne annuelle de la station fixe et la concentration estimée dans la maille (Deux types d'intervalles sont proposés : le premier résulte de l'étude des incertitudes des stations fixes à l'aide des doublons « *station fixe - tube passif implanté dans la station fixe* ». Le second est égal à la précision demandée dans les directives européennes pour les méthodes d'estimation appliquées au cas d'une évaluation moyenne sur une longue période de temps. Pour la modélisation de la moyenne annuelle de NO₂, cette précision est de 30%).

3.2.1.2 MODE ET OUTILS DE CALCUL :

La méthode préconise d'appliquer directement l'inégalité de l'Équation 2 ; dans ce cas un point est représentatif de la station fixe si l'écart en valeur absolue entre les mesures est inférieur ou égal à une valeur fixée à l'avance ; celle-ci est choisie en fonction d'un pourcentage de la mesure de la station fixe.

Les résultats sont, pour chaque station fixe :

- d'une part, une carte des écarts maximaux (partie gauche de l'Équation 2),
- et d'autre part, une carte avec les zones de représentativité où les écarts maximaux sont inférieurs ou égaux à δ , zones matérialisées, par exemple, par un symbole ou un code de couleurs.

3.2.2 METHODE PROPOSEE PAR AIR NORMAND

3.2.2.1 DONNEES D'ENTREE :

- Estimation et écart - type d'estimation de la moyenne annuelle du dioxyde d'azote, calculés par des méthodes géostatistiques ; ces deux variables doivent être calculées sur une grille couvrant l'ensemble de la zone étudiée.
- Coordonnées géographiques des capteurs et moyenne annuelle des concentrations du dioxyde d'azote.
- Définition des paramètres suivants :
 - δ : Ecart maximal toléré entre la moyenne annuelle de la station fixe et la concentration estimée dans la maille, une valeur de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est le plus souvent utilisée.
 - P : intervalle de confiance prise en compte dans le calcul des zones de représentativité, les valeurs de probabilité les plus souvent retenues sont : 95%, 90% et 66%.

3.2.2.2 MODE ET OUTILS DE CALCUL :

Cette méthode préconise l'introduction de l'erreur d'estimation dans la définition des zones de représentativité :

$$\left| (z_i^* + e_i) - z^{SF_j} \right| \leq \delta_i^j \quad e_i : \text{Erreur d'estimation du NO}_2 \text{ dans la maille } i.$$

Équation 3 : Définition de la représentativité en prenant en compte l'erreur d'estimation de la moyenne annuelle de NO₂

Si l'on applique la théorie de probabilités⁶ et que l'on suppose que l'erreur d'estimation suit une loi gaussienne, on arrive à l'expression :

$$\left\{ \left[G^{-1} \left(\frac{P+1}{2} \right) * \sigma_i^k \right] + \left| z_i^* - z^{SF_j} \right| \right\} \leq \delta_i^j$$

σ_i^k : Écart - type d'estimation de NO₂ (par krigeage) de la maille i.

P : probabilité pour laquelle on calcule les zones de représentativité (95%, 90% ou 66%).

G^{-1} : Fonction de répartition inverse d'une loi gaussienne centrée réduite

Équation 4 : Définition de la représentativité avec prise en compte de l'erreur d'estimation⁷

Cette formule permet d'obtenir des zones dans lesquelles on sait avec une probabilité P que les concentrations s'écartent de celle de la station d'une valeur inférieure ou égale à δ ; les développements mathématiques détaillés sont présentés en Annexe 2.

Pour déterminer dans chaque station fixe les zones de représentativité pour la moyenne annuelle du NO₂, il faut :

- d'abord fixer l'intervalle de confiance ou la probabilité voulue,
- puis calculer la partie gauche de l'expression présentée plus haut,
- et finalement sélectionner les zones où cette quantité est inférieure ou égale à l'écart maximal toléré δ .

⁶ Dans le cas général, on emploie en particulier l'inégalité de Bienaymé – Tchebychev, expression donnant la borne supérieure de la probabilité pour que l'erreur d'estimation soit supérieure à une constante positive (cf. Annexe 2).

⁷ L'Équation 4 peut-être utilisée dans le cas d'une estimation monovariée par krigeage ordinaire ou simple (à moyenne connue) ou dans le cas d'une estimation multivariée par cokrigeage ou cokrigeage colocalisé avec une variable auxiliaire ; une variante de cette expression dans le cas d'une estimation multivariée par le modèle des résidus est présentée en Annexe 3.

Les résultats sont, pour chaque station fixe :

- d'une part une carte des écarts maximaux, qui tiennent compte de l'erreur d'estimation (partie gauche de l'expression présentée plus haut),
- et d'autre part une carte avec les zones de représentativité où les écarts maximaux ont une probabilité P d'être inférieurs ou égaux à δ , zones matérialisées par exemple par un symbole ou un code de couleurs.

3.2.2.2.1 INFLUENCE DES PARAMETRES POUR LE CALCUL DES ZONES DE REPRESENTATIVITE

3.2.2.2.1.1 ECART - TYPE D'ESTIMATION

Si on suppose que la concentration estimée en point donné est égale à la concentration de la station fixe, l'expression de l'Équation 4 se réduit à une condition sur la valeur de l'écart - type (cf. Annexe 4).

$$\sigma_i^k \leq \frac{\delta_i^j}{G^{-\left(\frac{P+1}{2}\right)}}$$

Équation 5 : Calcul d'une zone de représentativité : condition sur l'écart - type de krigeage dans le cas où $Z^ = Z^{SF}$*

Voici quelques exemples des valeurs maximales de l'écart - type d'estimation lorsque la concentration estimée en un point est égale à la concentration de la station fixe :

- Si $\delta=5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $P=99\%$ on obtient $\sigma \leq 5/2.58 \leq 1.94$.
- Si $\delta=5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $P=95\%$ on obtient $\sigma \leq 5/1.96 \leq 2.55$.
- Si $\delta=5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $P=90\%$ on obtient $\sigma \leq 5/1.645 \leq 3.04$.
- Si $\delta=3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $P=99\%$ on obtient $\sigma \leq 3/2.58 \leq 1.17$.
- Si $\delta=3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $P=95\%$ on obtient $\sigma \leq 3/1.96 \leq 1.53$
- Si $\delta=3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $P=90\%$ on obtient $\sigma \leq 3/1.645 \leq 1.83$

Ces résultats montrent que si l'on impose un faible marge d'erreur (forte probabilité ou faible écart maximal toléré) il faut que l'estimation soit la plus précise possible pour que le point soit représentatif de la station.

L'écart - type d'estimation et en conséquence la définition des zones de représentativité, sont fonctions du modèle ajusté lors de l'étude variographique des concentrations moyennes annuelles de NO₂ et donc, de la corrélation spatiale du phénomène.

Un fort effet de pépité produit par exemple des estimations moins précises. C'est le cas du NO₂ en saison estivale où la composante aléatoire est plus importante qu'en période hivernale, cela à cause des phénomènes de diffusion influencés par les conditions climatiques.

Par ailleurs, comme dans les zones mal ou très peu échantillonnées, l'écart - type d'estimation est élevé⁸, celles-ci risquent de ne pas faire partie des zones de représentativité des stations fixes. C'est pourquoi le plan d'échantillonnage doit être le plus adapté possible au domaine d'estimation afin de ne pas exclure à tort une zone à cause d'un mauvais échantillonnage.

Lorsque l'on rencontre des zones de représentativité discontinues, à cause par exemple de l'absence de tubes passifs, il peut être préférable de ne garder que les points les plus proches des stations fixes, de façon à obtenir des zones qui dépendent le moins possible de l'implantation des tubes. Dans ce cas, on propose deux manières de restreindre ces zones :

- la première consiste à sélectionner seulement les mailles connectées physiquement (proximité directe) à celle où la station fixe est implantée ;
- la seconde, à sélectionner les mailles localisées à moins d'une certaine distance autour de chaque station. Une méthode, proposée par Air normand [2005] et qui prend en compte le modèle de variogramme des concentrations (ou des résidus) calculé aux tubes passifs est retranscrit dans l'Annexe 5.

3.2.2.2.1.2 ECART MAXIMAL TOLERE (δ)

On a vu que la définition de ce paramètre peut influencer fortement les résultats finaux. Si on tolère une grosse différence entre les concentrations, on peut rencontrer des zones de représentativité trop larges et peut-être très éloignées de la station fixe, en revanche si on impose un faible écart, on risque de les limiter excessivement et même dans certains cas de ne pas en trouver.

Dans les cas d'étude présentés par la suite, un écart toléré de 5 µg/m³ a été utilisée, pour un capteur mesurant 30 µg/m³ en moyenne annuelle de NO₂. Cet écart représente le 16.67% de la concentration de la station et pour une moyenne annuelle de 40 µg/m³ cela représente le 12.5%.

Il est aussi possible de déterminer cet écart en fonction d'un pourcentage de la moyenne annuelle mesurée dans la station fixe⁹, par exemple 10% ou 5% ; pour une moyenne de 30 µg/m³, l'écart maximal toléré ne serait alors que de 3 µg/m³ (le 10%) ou de 1.5 µg/m³ (le 5%).

⁸ Par définition du krigeage, plus on est loin des points de mesure, plus l'erreur d'estimation est importante et inversement près des tubes celle-ci est faible.

⁹ La méthode de l'EMD prend en compte cette dernière option et propose deux méthodes pour fixer l'intervalle (cf. 3.2.1.1).

Avant de fixer ce paramètre, il peut être utile de calculer d'abord pour une probabilité donnée tous les écarts maximaux entre une estimation et les stations fixes disponibles ; l'écart maximal toléré ne pourra être inférieur au plus petit de ces écarts :

$$\delta \geq \min(\delta_i^j)$$

$$\delta \geq \min \left\{ \left[G^{-1} \left(\frac{P+1}{2} \right) * \sigma_i^k \right] + \left| z_i^* - z^{SF_j} \right| \right\}$$

Équation 6 : Condition sur l'écart maximal toléré¹⁰

Pour un point donné, la station fixe avec laquelle ce point présente le plus petit écart maximal est, en moyenne annuelle, la station dont les niveaux de pollution sont les plus proches de ceux du point. Cette station, qui est la plus représentative du point, est appelée « station de rattachement ». Dans le paragraphe §3.2.2.2.2 une expression plus générale pour calculer les zones de rattachement des stations fixes est donnée.

3.2.2.2.1.3 PROBABILITE

Normalement, il est recommandé d'utiliser une forte valeur de probabilité¹¹, de façon à minimiser la marge d'erreur¹². Cependant, dans certains cas, cela peut résulter en une absence de zones de représentativité, à cause d'un écart - type d'estimation élevé, par exemple lorsque le phénomène est très aléatoire.

Dans ce cas, il est conseillé d'effectuer à l'avance le calcul inverse, c'est-à-dire d'estimer pour chaque maille la probabilité avec laquelle les concentrations moyennes annuelles sont proches à moins de δ de celle mesurée à la station.

Grâce à l'expression de l'Équation 7 (développement présenté en Annexe 6) on peut sélectionner différentes zones de représentativité en fonction de l'écart toléré défini et du risque que l'on est on mesure d'accepter. Il est clair que si on augmente la marge d'erreur (faible probabilité) l'aire des zones de représentativité augmentent également.

¹⁰ L'Équation 6 peut-être utilisée dans le cas d'une estimation monovariante par krigeage ordinaire ou simple (à moyenne connue) ou dans le cas d'une estimation multivariante par cokrigeage ou cokrigeage colocalisé avec une variable auxiliaire ; d'une façon similaire on peut obtenir la condition sur l'écart maximal toléré lors d'une estimation multivariante avec le modèle de résidus, expression présentée en Annexe 3.

¹¹ Il n'est pas possible d'effectuer des calculs pour une probabilité de 100% (risque de se tromper nul) car la fonction de répartition inverse de la loi normale centrée réduite tend vers l'infini lorsque la probabilité tend vers 1.

¹² L'usage le plus répandu est de faire en sorte que le risque de se tromper soit aux alentours de 1 ou 5 %

$$P(|z_i^* - z^{SF_j}| \leq \delta_i^j) \leq \left[G\left(\frac{(\delta_i^j - |z_i^* - z^{SF_j}|)}{\sigma_i^k} \right) * 2 \right] - 1$$

G: Fonction de répartition d'une loi gaussienne centrée réduite

Équation 7 : Calcul de la probabilité que l'écart entre les concentrations soit inférieur ou égal à δ

En conclusion, le choix des paramètres pour le calcul des zones de représentativité est en pratique le résultat d'un compromis entre précision voulue et faisabilité de la méthode, en fonction des caractéristiques des données disponibles (nombre de stations fixes, niveaux de pollution rencontrés, etc.)

En conséquence, les paramètres à utiliser sont à définir au cas par cas, le plus important étant de comprendre leur influence sur les résultats finaux.

3.2.2.2.2 RATTACHEMENT D'UN POINT A UNE STATION FIXE

Dans le paragraphe 3.2.2.2.1.2 « la station *la plus représentative* » d'un point est définie comme celle qui présente le plus petit des écarts maximaux avec celle-ci. Ce calcul peut être utile pour distinguer les zones de représentativité des stations fixes calculées dans les mêmes conditions, lorsque celles-ci se recoupent¹³.

Comme un point est toujours rattaché à la même station, l'expression de l'Équation 8 est suffisante pour calculer les zones de rattachement :

$$ZONE \text{ RATTACHEMENT} = \min(\sigma_i^k + |z_i^* - z^{SF_j}|)$$

Équation 8 : Calcul d'une station de rattachement

Les zones de rattachement peuvent également être limitées en ne sélectionnant que les points se trouvant à l'intérieur d'une certaine distance de la station ; distance définie par exemple en fonction du modèle du variogramme des campagnes par tubes.

On obtient donc une carte de l'ensemble des zones rattachables aux stations ; celles-ci peuvent être représentées par un symbole ou un code de couleurs.

3.2.2.2.3 DEPASSEMENT DE SEUILS

L'expression de l'Équation 6 permet d'estimer avec une probabilité donnée l'écart maximal entre la concentration d'un point et celle de la station fixe à laquelle celui-

¹³ Le calcul des zones de rattachement peut donc être un outil intéressant pour caractériser la pollution et mesurer l'impact (de l'installation) ou du retrait d'un capteur vis-à-vis des exigences réglementaires

ci est rattaché. On connaît donc pour chaque point l'intervalle des concentrations dans lequel se situe la concentration réelle du point :

En conséquence, on peut comparer cet intervalle par rapport à un seuil réglementaire, et déterminer si la concentration réelle du point dépasse ou non cette concentration fixée. Les expressions suivantes montrent les résultats qui peuvent être obtenus en fonction de la position du seuil par rapport à l'intervalle des concentrations possibles :

Équation 9 : Expressions permettant de déterminer la possibilité de dépasser une concentration donnée (seuil réglementaire) dans une zone rattachée à une

Pour une probabilité donnée :

si $(z_j^{SF} + \delta_i^j) < S \Rightarrow$ pas de dépassement dans la maille i

si $(z_j^{SF} - \delta_i^j) > S \Rightarrow$ dépassement dans la maille i

si $(z_j^{SF} - \delta_i^j) \leq S \leq (z_j^{SF} + \delta_i^j) \Rightarrow$ dépassement incertain

δ_i^j : Écart maximal entre la moyenne annuelle de la station fixe de rattachement j et la concentration estimée dans la maille i

z_j^{SF} : Moyenne annuelle de NO₂ dans la SF j

S : Concentration de dioxyde d'azote à ne pas dépasser en moyenne annuelle, la valeur fixée par la norme est de 40 µg/m³, cependant d'autres seuils peuvent être utilisés de façon à déterminer plusieurs zones de dépassement (par ex : 35, 30 ou 20 µg/m³)

station fixe

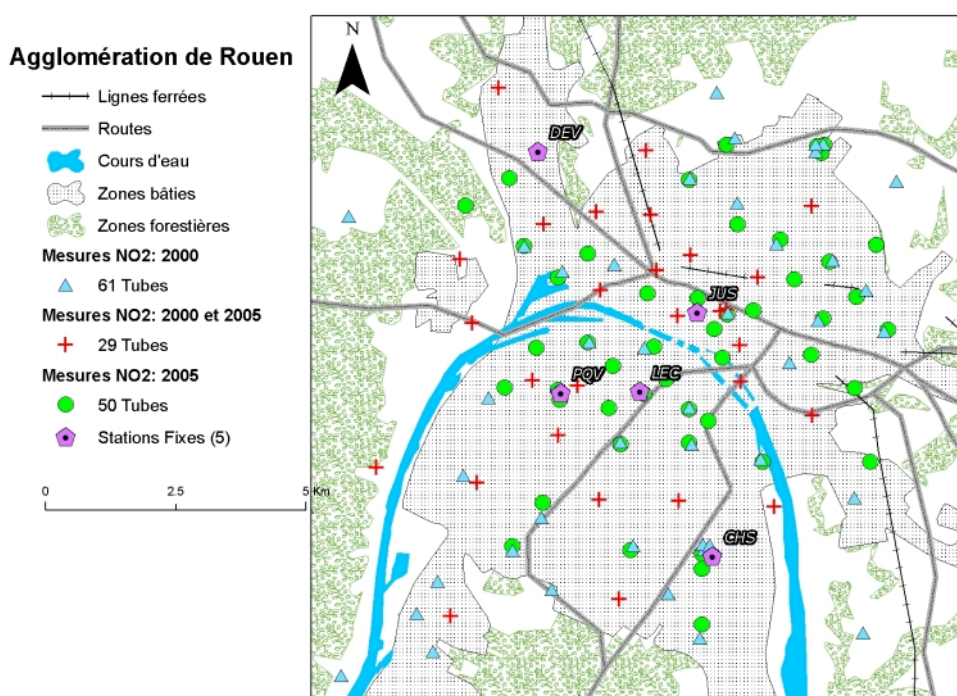
Le résultat est donc la carte d'une variable indiquant trois possibilités : dépassement, pas de dépassement ou dépassement incertain, ces zones peuvent être matérialisées par un symbole ou un code de couleurs.

3.3 ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS

3.3.1 ROUEN

On dispose d'une part de 5 stations fixes pour lesquelles on veut calculer les zones de représentativité et d'autre part des concentrations de NO₂ mesurées par échantillonnage passif sur 140 sites (années 2000 et 2005).

L'échantillonnage effectué à Rouen est partiellement hétérotopique (quelques points ne disposent que d'une année de mesure), la figure ci-dessous montre la localisation et le nombre de mesures disponibles pour chaque année.



Année	Seul 2000	Seul 2005	2000 et 2005	Total 2000	Total 2005	Total TP
Nb de TP	61	50	29	90	79	140

Figure 1: ROUEN - Localisation et nombre de mesures par tubes passifs disponibles

Pour calculer les zones de représentativité des stations, par rapport à la moyenne annuelle de l'année 2005, il faut d'abord effectuer une estimation des concentrations sur une maille couvrant l'agglomération de Rouen.

Afin de présenter les différentes étapes du calcul des zones de représentativité, une analyse sans prendre en compte les informations auxiliaires qui décrivent la typologique de la pollution a, dans un premier temps, été effectuée.

La méthode d'estimation utilisée est le cokrigage entre les moyennes des années disponibles, cette méthode permet d'exploiter en covariables les 90 mesures de l'année 2000 dans l'estimation des concentrations en 2005. Les développements détaillés pour l'estimation de la moyenne annuelle 2005 et de l'écart - type d'estimation associé sont présentés en Annexe 7.

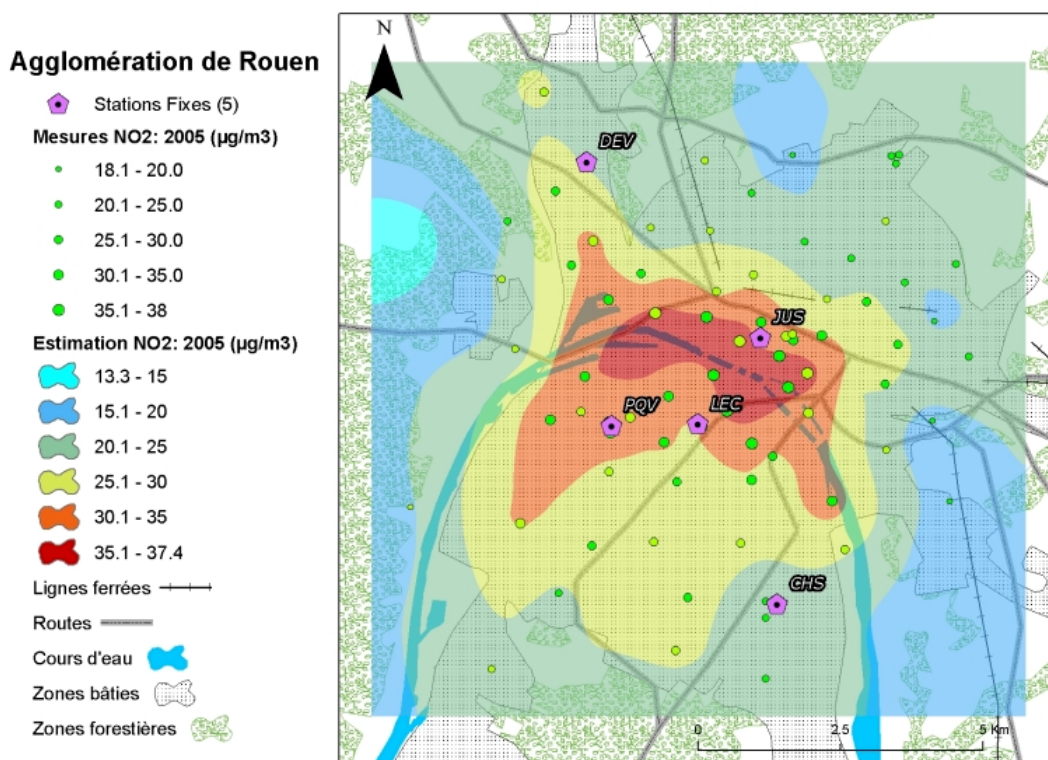


Figure 2 : ROUEN - Carte de l'estimation de la moyenne annuelle de NO₂ pour l'année 2005

Dans cette carte, les concentrations ont été groupées en 6 classes ; à l'exception du premier et dernier groupe, la largeur de chaque intervalle est de 5 µg/m³, on observe que logiquement les concentrations sont les plus fortes en centre ville et décroissent lorsqu'on s'éloigne vers la périphérie de l'agglomération.

Les stations DEV et CHS sont localisées sur des lieux présentant des estimations inférieures à 25 µg/m³ en moyenne annuelle ; les stations PQV et LEC sont situées dans les zones où les concentrations oscillent entre 30 et 35 µg/m³ et la station JUS est la plus proche des zones où les concentrations estimées sont supérieures à 35 µg/m³.

Ces observations sont confirmées par les informations du Tableau 4, où sont affichées les valeurs de la moyenne annuelle de NO₂ mesurées dans ces stations pour lesquelles le calcul des zones de représentativité est effectué par la suite.

Station	JUS	LEC	PQV	CHS	DEV
Moyenne annuelle NO₂ (2005)	32.81	30.86	31.55	23.89	24.02

Tableau 4 : Moyenne Annuelle de NO₂ calculé aux cinq SF

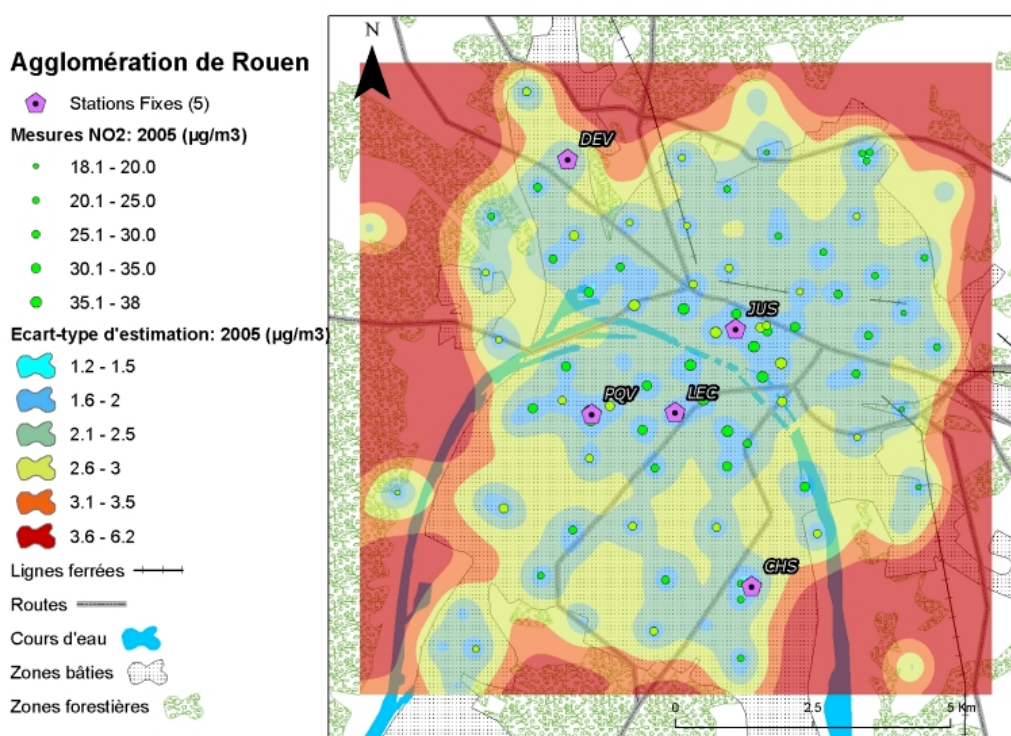


Figure 3 : ROUEN - Carte de l'écart - type de krigeage de la moyenne annuelle de NO₂ pour l'année 2005

Les statistiques de l'écart - type d'estimation suggèrent une bonne précision des estimations en centre ville (valeurs inférieures à 2.5, cf. §3.2.2.2.1.1). Dans cette partie de la ville, il y a donc de fortes chances de retrouver, à un faible marge d'erreur, des zones de représentativité pour les stations fixes.

3.3.1.1 ZONES DE REPRESENTATIVITE PAR STATION FIXE

Les deux cartes ci-après montrent la différence entre les deux approches proposées pour le calcul des zones de représentativité ; la Figure 4 correspond à l'écart en valeur absolue entre les concentrations estimées et celle de la station Justice ($32.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)¹⁴, il s'agit de l'application de la méthode présentée en 2001 par l'EMD.

La Figure 5 représente la valeur de cet écart augmentée d'une quantité qui est fonction de l'écart - type d'estimation et de l'intervalle de confiance fixé à 95%, il s'agit de la méthode proposée en 2005 par Air Normand (cf. Équation 4). Afin de comparer les deux quantités, la largeur de chaque classe de l'échelle de couleur est égale sur les deux cartes ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Si on considère un écart maximal toléré de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui correspond aux zones en bleu clair sur les cartes (premier intervalle), la première figure indique que la station Justice est représentative de la plupart des points localisés en centre ville. En revanche, la seconde figure montre que lorsqu'on prend en compte l'incertitude de l'estimation et une marge d'erreur de 5%, les zones de représentativité sont beaucoup plus petites. Par la méthode « EMD » certaines zones peuvent apparaître avec un écart nul, alors que par la méthode « Air Normand » il peut-être faible mais significatif ($2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

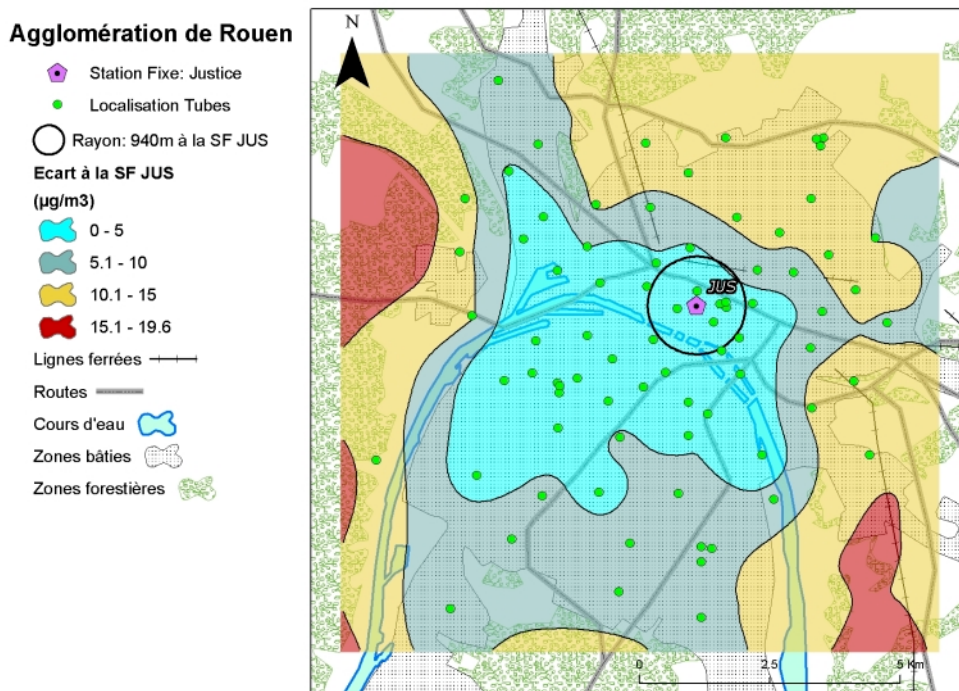


Figure 4 : ROUEN : Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Justice ($32.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

¹⁴ Les cartes relatives aux autres stations sont présentées en Annexe 9.

La zone hachurée¹⁵ de la Figure 5 est une région encore plus petite d'environ 5km de longueur et 500m de largeur où les mailles sont connectées (connexes) à la station fixe. Le cercle dessiné dans les deux figures représente les zones se trouvant à une distance maximale de 940m du capteur (cf. Annexe 7, Figure 33).

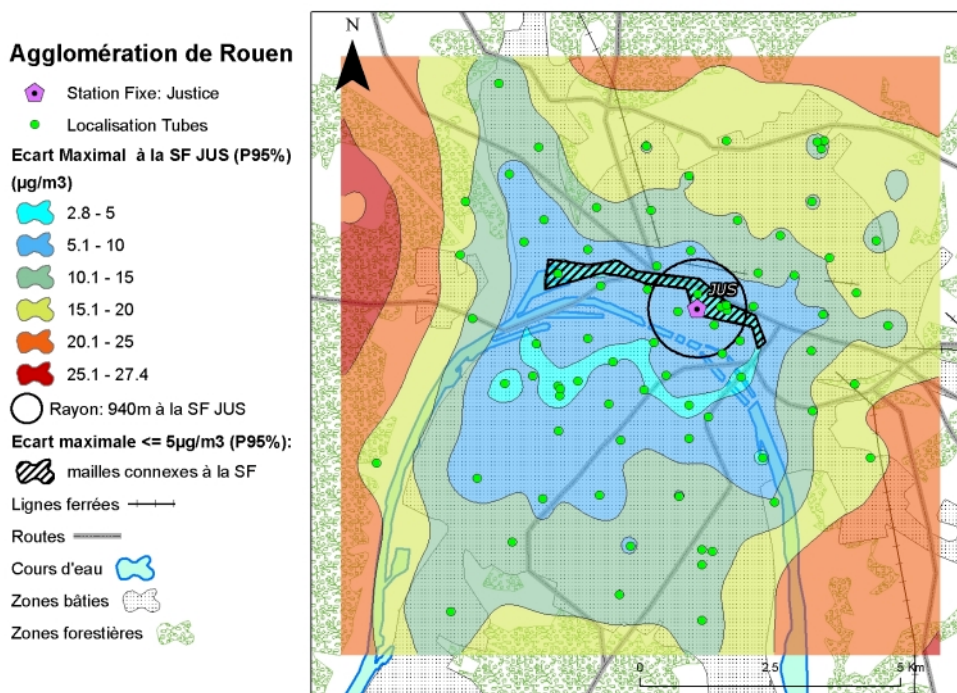


Figure 5 : ROUEN : Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Justice ($32.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 95%

La carte de la Figure 6 résulte de l'application de l'inégalité de l'Équation 7, calculée pour la station Justice (JUS)¹⁶ ; il s'agit de la probabilité maximale que l'écart entre les concentrations estimées et celle de la station fixe soit inférieur ou égal à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Vu que la concentration de la station est de $32.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la carte représente la probabilité que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle allant entre 27.8 et $37.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Si la marge d'erreur augmente, on obtient des zones de représentativité plus étendues ; dans les zones de l'agglomération où la probabilité n'a pas été calculée, la probabilité que les concentrations soient supérieures à $27.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est considérée comme nulle, zones localisées en périphérie de l'agglomération.

¹⁵ La forme particulière de cette région est liée à l'emplacement des tubes passifs.

¹⁶ Les cartes relatives aux autres stations sont présentées en Annexe 9.

Agglomération de Rouen

Station Fixe: Justice

Localisation Tubes

P. Maximale (écart $\leq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

0 - 0.2

0.21 - 0.5

0.51 - 0.7

0.71 - 0.8

0.81 - 0.9

0.91 - 0.95

0.96 - 0.98

0.99 - 1

Isoligne: P $\geq 95\%$

Lignes ferrées

Routes

Cours d'eau

Zones bâties

Zones forestières

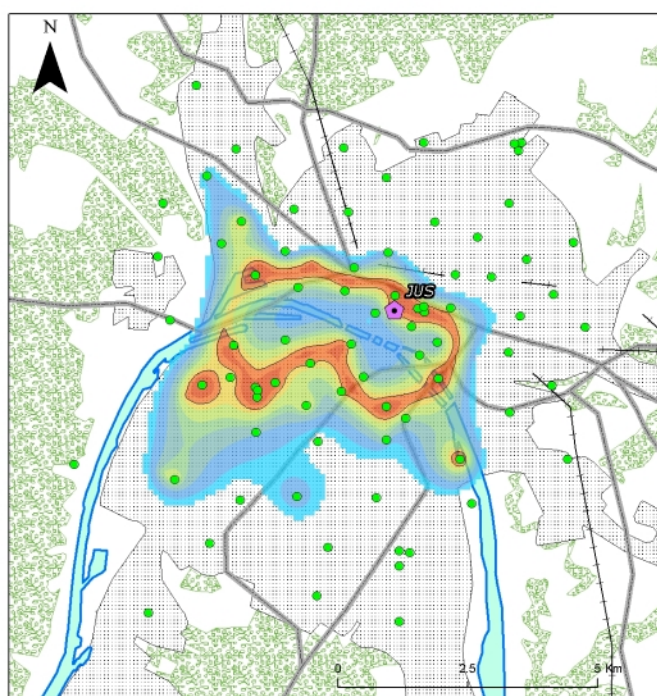


Figure 6 : ROUEN – SF JUS : Carte de la probabilité maximale que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 27.8 et 37.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

3.3.1.2 RATTACHEMENT D'UN POINT A UNE STATION FIXE

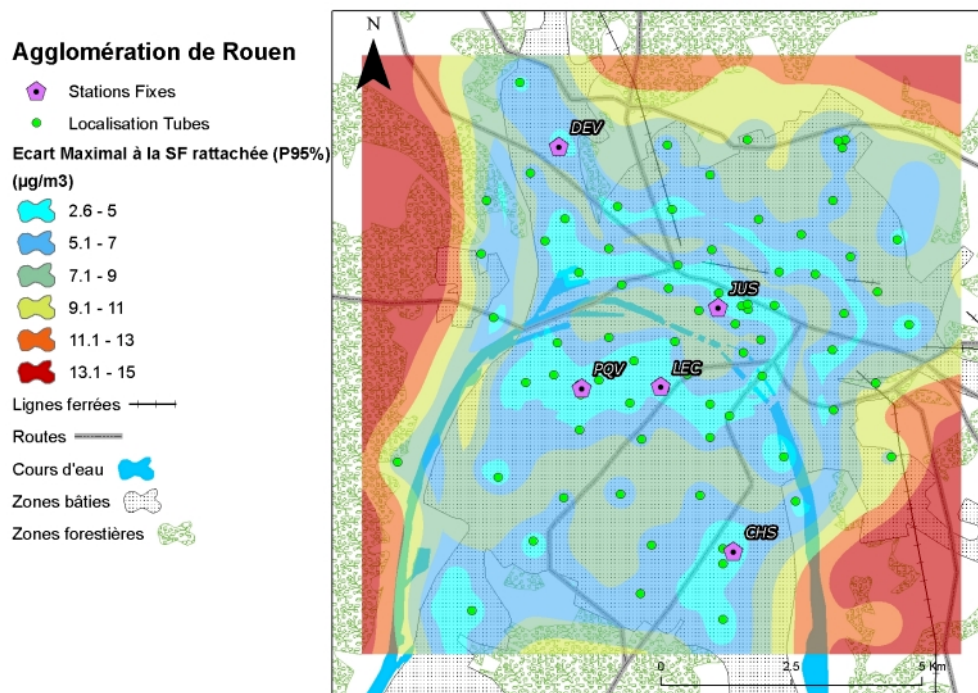


Figure 7 : ROUEN - Carte de la plus petite valeur des écarts maximaux (quantité δ') pour une probabilité de 95%

La Figure 7 montre pour chaque maille, le plus petit «écart maximal» que l'on peut calculer pour une probabilité de 95% (cf. Équation 6). Dans la majeure partie de l'agglomération, l'écart est compris entre 2.6 et 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en revanche aux limites du domaine, où la densité de l'échantillonnage est faible (et où l'erreur d'estimation est donc plus forte, l'écart peut monter jusqu'à 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La Figure 8 montre pour chaque maille, la station la plus représentative, c'est-à-dire celle avec laquelle on a calculé l'écart maximal le plus petit.

A Rouen, la plupart des points localisés en centre ville sont rattachés à la station Justice (région en rouge dans la Figure 8). On peut donc affirmer qu'en moyenne annuelle les concentrations estimées dans le centre ville sont plus proches de celles mesurées par ce capteur.

Contrairement à ce que l'on peut penser, les points proches de la station PQV ne sont pas rattachés à celle-ci mais à la station JUS.

La Figure 9 montre les zones de rattachement se trouvant à une distance de 940m de chaque capteur. La région la plus petite correspond à la station PQV.

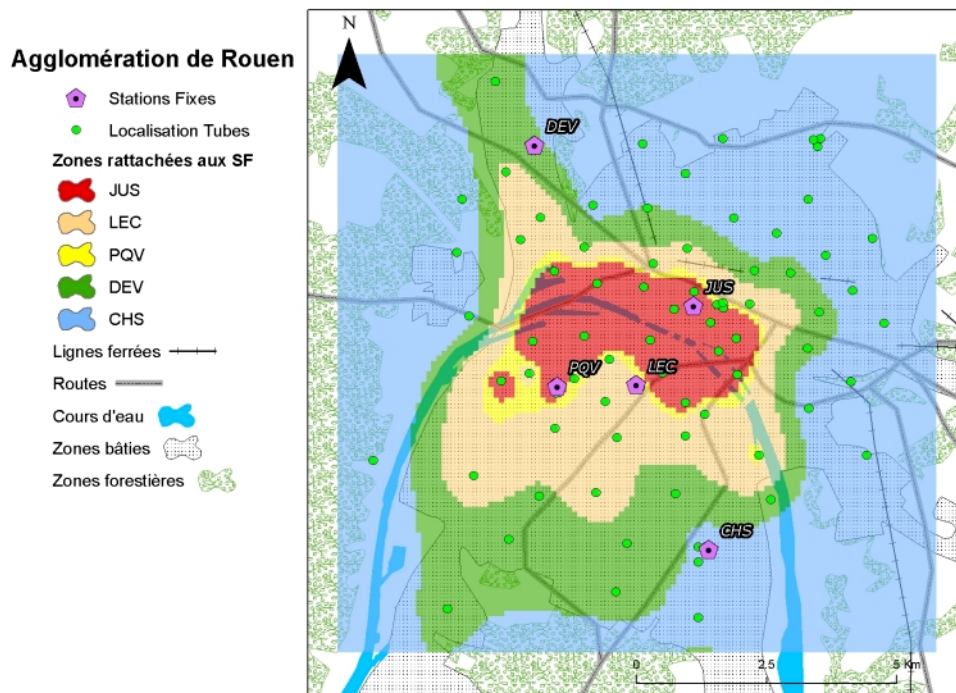


Figure 8 : ROUEN : Zones rattachées aux stations fixes

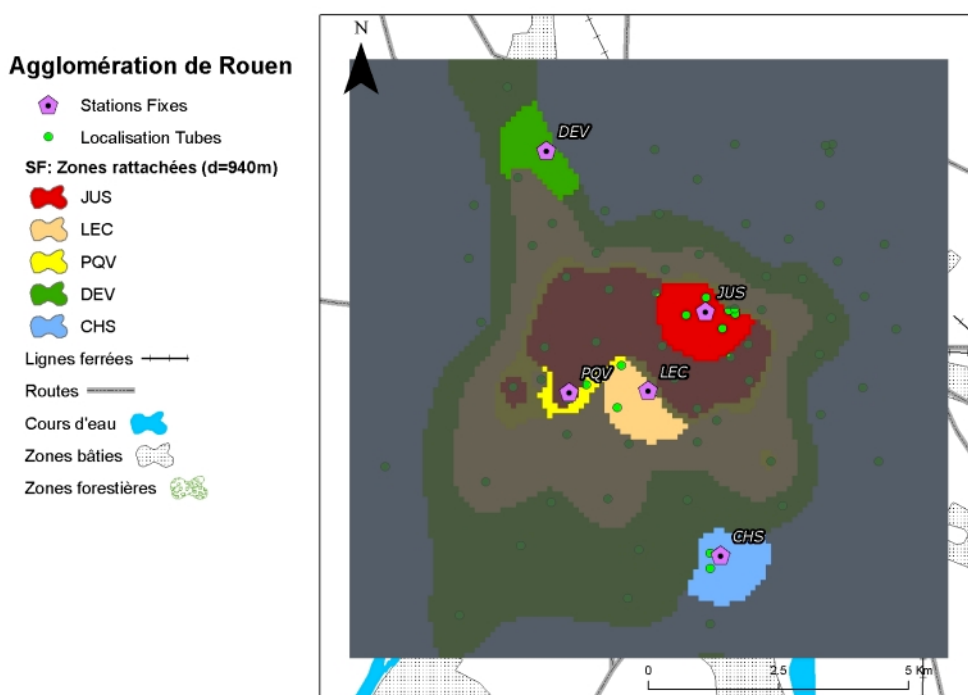


Figure 9 : ROUEN : Zones rattachées se trouvant à une distance maximale de 940m des stations fixes.

3.3.1.3 DEPASSEMENT DE SEUILS

La Figure 10 montre les points rattachés aux stations fixes et se trouvant à une distance maximale de 940m de celles-ci, dans les zones en vert foncé les concentrations ne dépassent pas le seuil de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (confiance de 95%, cf. Équation 9). La plupart de ces zones correspondent aux stations localisées en périphérie de l'agglomération : DEV et CHS.

Dans les zones en bleu foncé, on ne peut pas donner des indications concernant le dépassement du seuil indiqué, la plupart de ces régions sont localisées en centre ville et associées aux stations JUS, PQV et LEC.

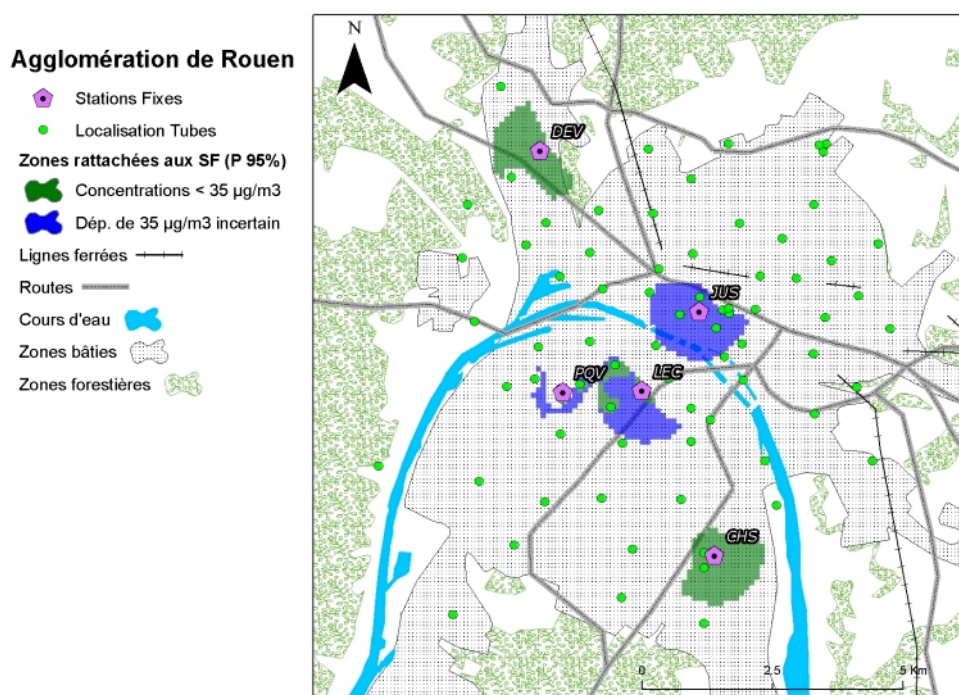


Figure 10 : ROUEN : Dépassement par rapport à un seuil de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec 95% de confiance

La Figure 11 affiche les zones de dépassement pour un seuil de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dans les stations DEV et CHS les zones où on est certain de ne pas dépasser le seuil sont plus petites que précédemment. Dans ces zones les concentrations sont plus proches de ce seuil et le risque de le dépasser est donc plus important.

Dans les zones rattachées aux stations du centre ville, on ne peut encore rien dire par rapport à un seuil de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, les concentrations peuvent aussi être supérieures ou inférieures à ce seuil.

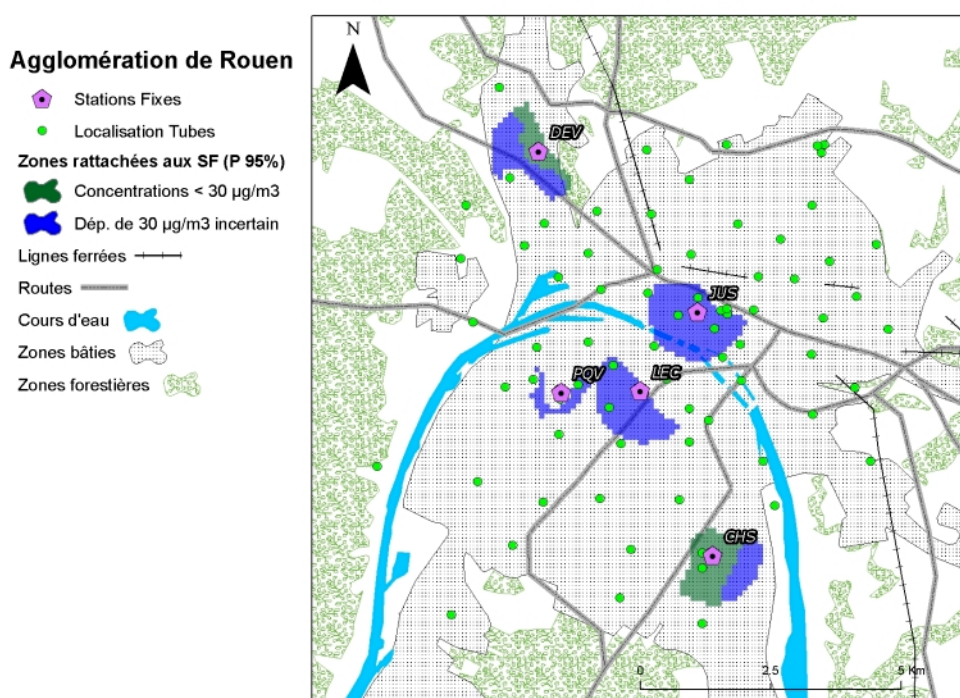


Figure 11 : ROUEN : Dépassement par rapport à un seuil de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec 95% de confiance

Ces calculs ont été réalisés avec une forte probabilité (95%). Cependant il peut être intéressant de connaître les mêmes résultats avec un risque plus grand, les cartes ci-dessous présentent les zones de dépassement de seuil pour une probabilité de 66%.

Si on prend en compte une marge d'erreur plus importante, les zones où les concentrations ne dépassent pas le seuil de 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les stations CHS et DEV, restent inchangées, en revanche pour les stations LEC et PQV l'aire de ces zones augmentent.

Pour un seuil de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dans les stations CHS et DEV, les zones où les concentrations ne dépassent pas cette valeur augmentent ; pour les stations LEC et PQV, le dépassement de ce seuil continue dans la plupart des points à être incertain.

L'étude de zones de dépassement de seuil permet donc de conclure ce qui suit :

- Dans la plupart des zones rattachées aux stations DEV et CHS, il est très probable que les concentrations soient inférieures à $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Dans une grande partie des points rattachés aux stations PQV et LEC les concentrations peuvent être inférieures à $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Dans la plupart des points rattachés à la station Justice le dépassement des deux seuils est incertain.

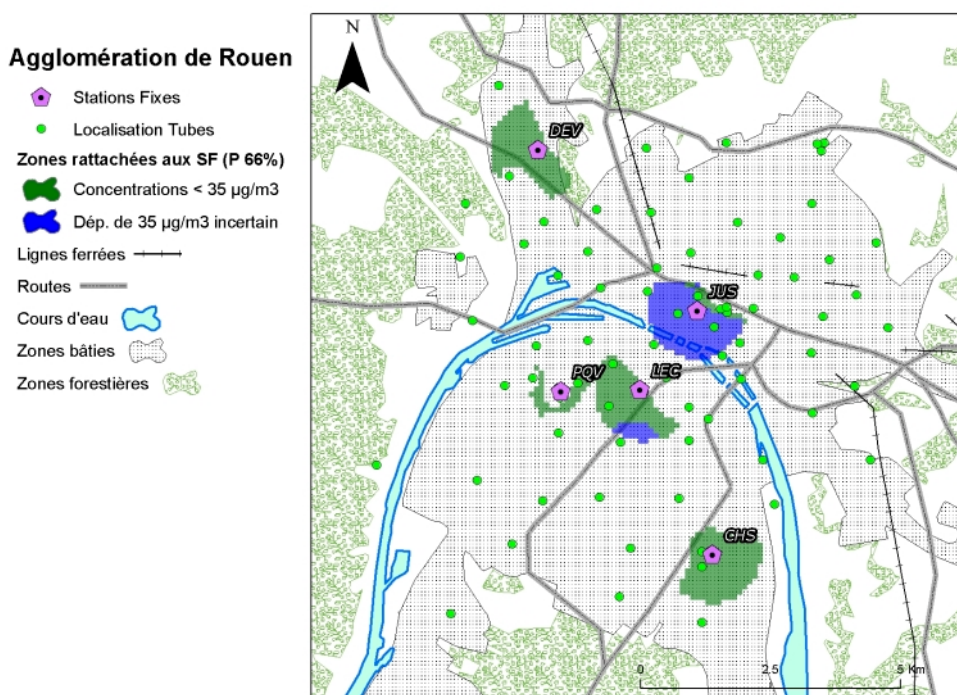


Figure 12 : ROUEN : Dépassement par rapport à un seuil de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec 66% de confiance

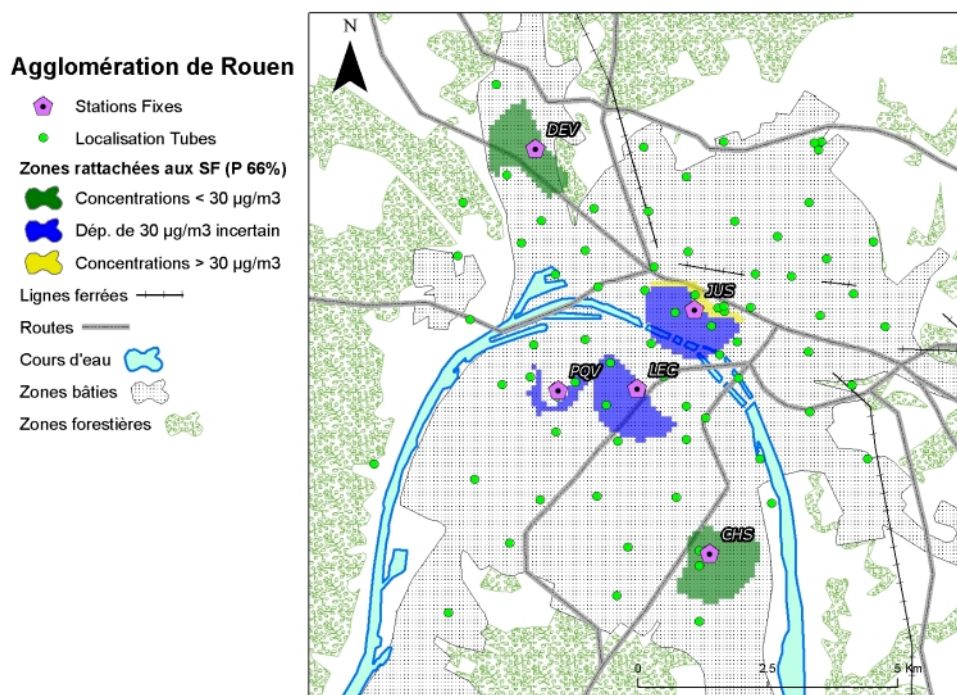


Figure 13 : ROUEN : Dépassement par rapport à un seuil de 30 µg/m³ avec 66% de confiance

3.3.2 LILLE

On dispose de 9 stations fixes de fond (7 urbaines et 2 périurbaines) et d'environ 130 mesures par tubes passifs ; on s'intéresse donc au calcul des zones de représentativité de ces capteurs vis-à-vis de la moyenne annuelle de NO₂ pour l'année 2003-2004¹⁷.

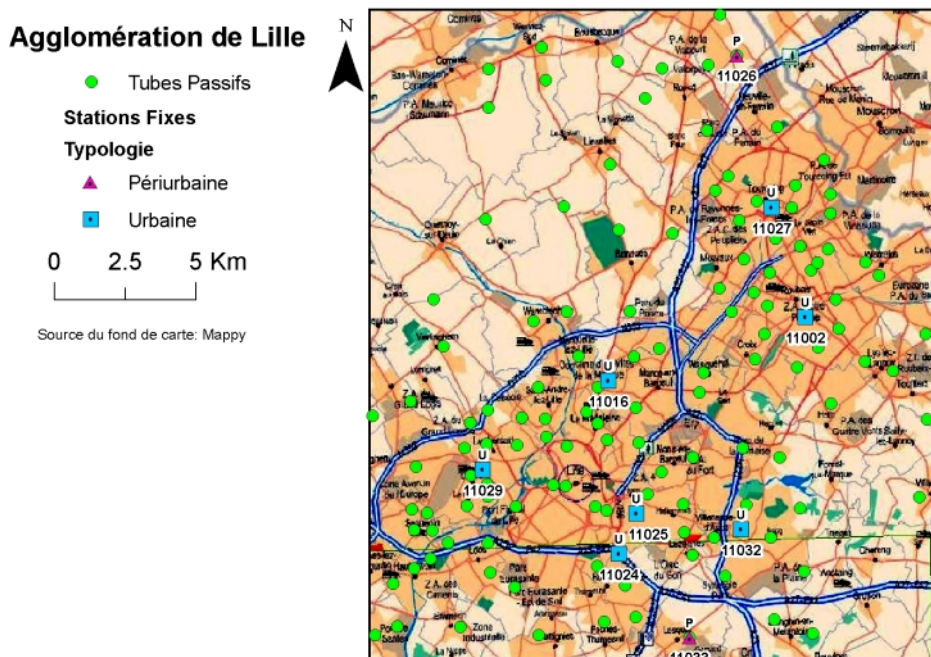


Figure 14: LILLE - Localisation de mesures par TP disponibles

La méthode du cokrigeage entre concentrations estivales et hivernales a été employée comme algorithme d'interpolation, avec comme dérive externe, une fonction auxiliaire construite à partir de la densité de population et des émissions¹⁸.

¹⁷ La moyenne de l'année 2003-2004 a été calculée à partir des 3 campagnes de mesure par tubes passifs menées entre mai et juillet 2003 et 3 autres campagnes menées entre janvier et février 2004. Celles-ci ont déjà été l'objet de plusieurs analyses au sein du LCSQA, d'une part en 2001, lors du calcul des zones de représentativité par l'EMD et d'autre part, en 2005 et 2006, lors de la mise au point de la méthode de cartographie journalière automatique de NO₂.

¹⁸ Les résultats ont été repris de l'étude [Cardenas et al., 2006] du LCSQA, et sont présentés dans l'Annexe 11.

Agglomération de Lille

Mesures Moy. NO₂: 2003-2004
µg/m³

- 17.9 - 25.0
- 25.1 - 30.0
- 30.1 - 35.0
- 35.1 - 40.0
- 40.1 - 51.0

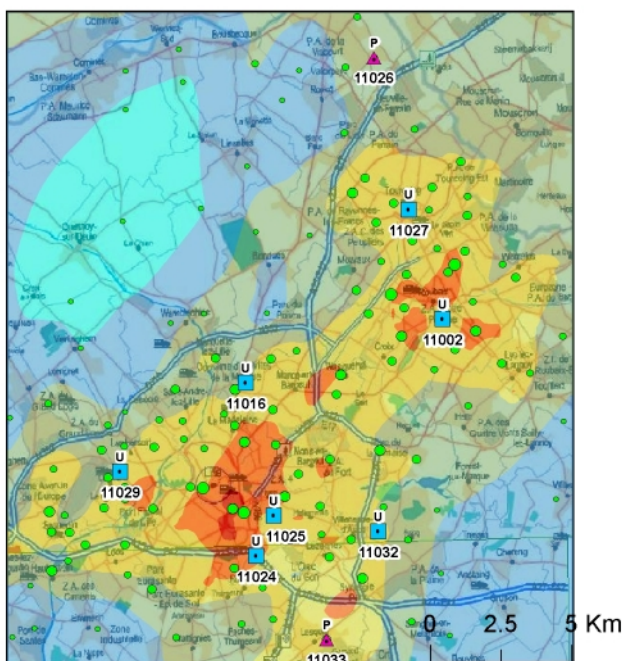
Stations Fixes

Typologie

- ▲ Périurbaine
- Urbaine

NO₂: Estimation Moy. 2003-2004

- 17.9 - 20
- 20.1 - 25
- 25.1 - 30
- 30.1 - 35
- 35.1 - 40
- 40.1 - 42.7



Source du fond de carte: Mappy

Figure 15 : LILLE - Carte de l'estimation de la moyenne annuelle de NO₂ pour l'année 2003-2004

Cette carte montre des niveaux de pollution supérieurs à 35 µg/m³ dans les centres ville de deux principales agglomérations (Lille et Roubaix), dans les zones industrielles qui leurs sont accolées et dans quelques croisements autoroutiers (A1, A22, A23, A27). Les capteurs les plus proches de ces zones sont Roubaix Château (11002), Lille Faidherbe (11024) et Lille Fives Lakanal (11025).

Dans les communes voisines, les concentrations oscillent entre 30 et 35 µg/m³. C'est le cas de la périphérie de Lille, et Roubaix, où se situent les stations Tourcoing Bienfaisance (11027), Marcq – en - Barœul (11016), Lomme (11029), Villeneuve d'Ascq (11032) et Lesquin (11033).

La station Halluin Caillou est localisée dans une zone périurbaine au nord du domaine où les concentrations sont inférieures à 30 µg/m³. Finalement en lisière des zones habitées au nord-ouest et au sud-ouest du domaine, les concentrations sont inférieures à 25 µg/m³.

Les concentrations mesurées aux capteurs (cf. Tableau 5) sont similaires aux estimations des zones où ils sont implantés, par exemple la station 11024, localisée en centre ville de Lille et celle localisée en centre ville de Roubaix (11002) présentent également des mesures supérieures à $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les capteurs peuvent se classer en trois groupes en fonction des niveaux de concentrations mesurés et donc de leur localisation.

Le premier est composé par les deux stations mesurant plus de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (11024 et 11002) et localisées en centre ville des deux agglomérations principales. Les zones de représentativité de ces deux stations seront étudiées plus en détail par la suite.

Le second groupe est formé par 5 stations localisées plutôt en zone périphérique à l'ouest et à l'est des pôles urbains et présentant des concentrations entre 30 et $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$: 11033, 11027, 11025, 11016, 11029. Le troisième groupe est composé des deux stations mesurant moins de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$: 11026 et 11032. Les zones de représentativité de ces capteurs sont présentées en annexe.

Code Station	Nom Station	Typologie	Moyenne annuelle NO2 (2003-2004)
11026	HALLUIN CAILLOUX	P	27.83
11032	V D'ASCQ RAMEAU	U	28.80
11029	LOMME	U	30.59
11016	MARCQ EN BAROEUL CTM	U	32.18
11025	LILLE FIVES LAKANAL	U	32.47
11027	TOURCOING BIENFAISANCE	U	32.78
11033	LESQUIN	P	33.90
11002	ROUBAIX CHATEAU	U	35.78
11024	LILLE FAIDHERBE	U	39.46

Tableau 5 : Moyenne annuelle de NO2 calculée aux SF

La valeur la plus faible de l'écart - type de krigeage est de 2.82 (cf. Figure 16). Cette valeur représente plus du double de l'écart - type d'estimation minimal obtenu à Rouen (1.2), les incertitudes sont donc plus importantes à Lille.

Cela est sans doute dû à l'importance de l'effet de pépité dans les modèles de variogramme ajustés pour chaque agglomération. A Rouen la Figure 33 de l'annexe 6 montre une composante pépitique représentant seulement +/-2.5% de la variance totale.

En revanche à Lille, la Figure 49 de l'annexe 10 montre pour la saison estivale un effet de pépité représentant 46% de la variance totale.

Ce fort écart d'estimation empêche le calcul des zones de représentativité pour un écart maximal toléré de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à 95% de confiance¹⁹.

¹⁹ Puisque la valeur minimale de l'écart type n'est pas inférieure à 2.55, condition qui devrait être respectée dans le cas extrême où les concentrations du point et du capteur sont égales (cf. § 3.2.2.2.1.1).

Agglomération de Lille

Mesures Moy. NO₂: 2003-2004
µg/m³

- 17.9 - 25.0
- 25.1 - 30.0
- 30.1 - 35.0
- 35.1 - 40.0
- 40.1 - 51.0

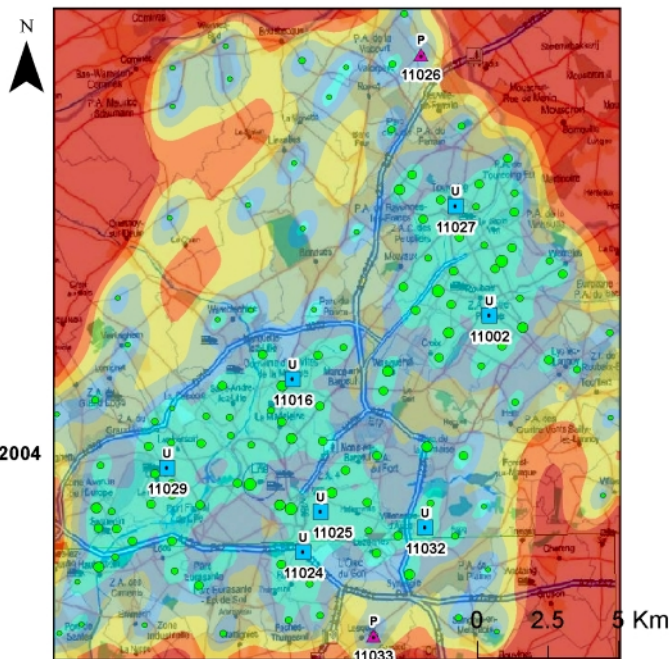
Stations Fixes

Typologie

- ▲ Périurbaine
- Urbaine

Ecart-type d'estimation Moy. 2003-2004

- 2.82 - 3
- 3.01 - 3.1
- 3.11 - 3.2
- 3.21 - 3.3
- 3.31 - 3.4
- 3.41 - 4.79



Source du fond de carte: Mappy

Figure 16 : LILLE - Carte de l'écart - type de krigeage de la moyenne annuelle de NO₂ pour l'année 2003-2004

3.3.2.1 ZONES DE REPRESENTATIVITE PAR STATION FIXE

Les résultats des méthodes appliquées sur les deux stations mesurant les plus fortes concentrations, à savoir Lille Faidherbe et Roubaix Château, sont présentés par la suite. Les cartes correspondant aux 7 autres stations se trouvent dans les annexes 12, 13 et 14.

Les cartes de la Figure 17 et de la Figure 20 démontrent que, pour les stations 11024 et 11002, la plus forte probabilité que l'on peut considérer est d'environ 90%, mais qu'il faut descendre à 80% pour trouver des zones de représentativité plus ou moins importantes.

Par exemple sur la carte de la Figure 17, on observe que l'isoline des probabilités supérieures à 80% englobe la zone du centre ville de Lille, ces zones se trouvent à un peu plus d'un kilomètre de distance au nord-ouest de la station considérée.

Le rayon du cercle centré sur la station, qui est de 1040 m, a été calculé à partir du modèle de variogramme des campagnes par tubes (cf. Figure 49 de l'Annexe 11).

Par conséquent, si on retient ce critère, seule une très petite zone serait représentative de cette station pour une marge d'erreur de 80% et un écart de 5 µg/m³.

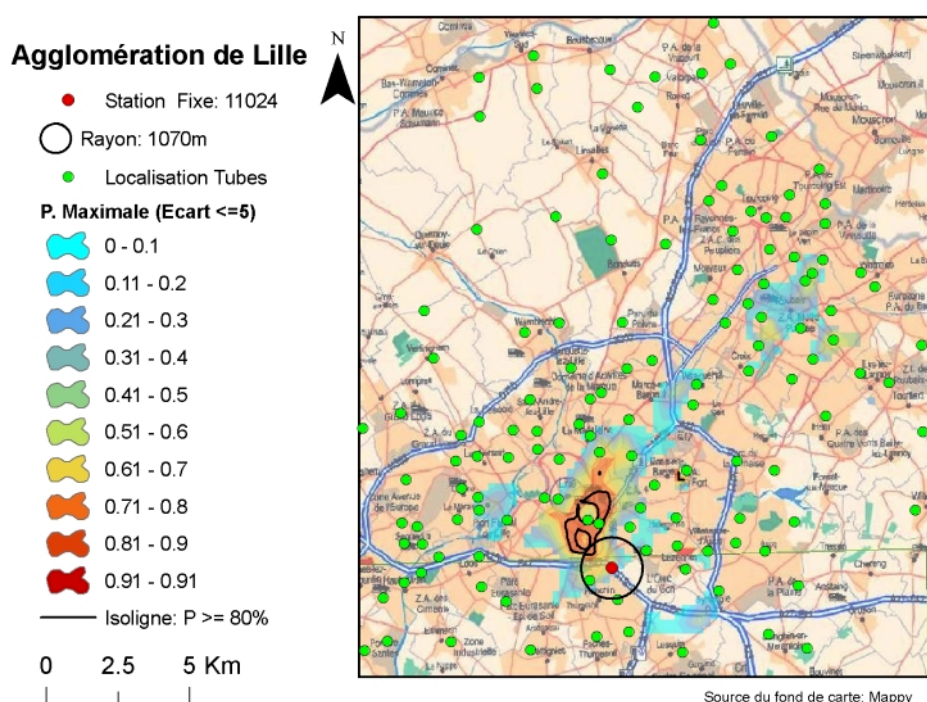


Figure 17 : LILLE – SF Lille Faidherbe (11024) : Carte de la probabilité maximale que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 44.46 et 34.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

La Figure 18 montre l'écart en valeur absolue entre les concentrations estimées et celle de la station fixe ; la première classe de l'échelle des couleurs représente les écarts inférieurs ou égaux à $5\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les zones de représentativité seraient donc, sans considérer l'incertitude des estimations, localisées dans le secteur nord-ouest du cercle.

Cependant, la Figure 19 montre que si on prend en compte l'écart - type d'estimation, il faut augmenter la marge d'erreur pour trouver des zones de représentativité semblables. Dans ce cas, un écart maximal toléré de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ et une probabilité de 90% doivent être considérés.

Agglomération de Lille

● Station Fixe: 11024

○ Rayon: 1070m

● Localisation Tubes

Ecart à la SF 11024

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

0 - 5

5.1 - 10

10.1 - 15

15.1 - 20

20.1 - 21.6

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

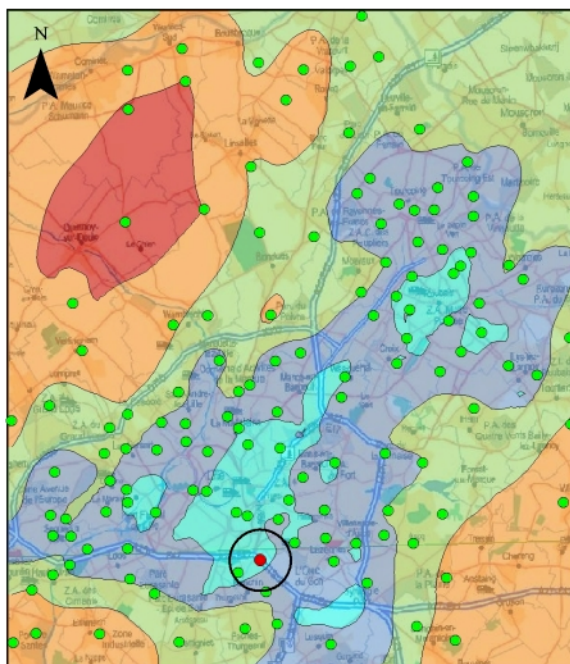


Figure 18 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Lille Faidherbe ($39.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Agglomération de Lille

● Station Fixe: 11024

○ Rayon: 1070m

● Localisation Tubes

Ecart Maximal à la SF 11024 (P90%)

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

4.9 - 5

5.1 - 10

10.1 - 15

15.1 - 20

20.1 - 25

25.1 - 27.1

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

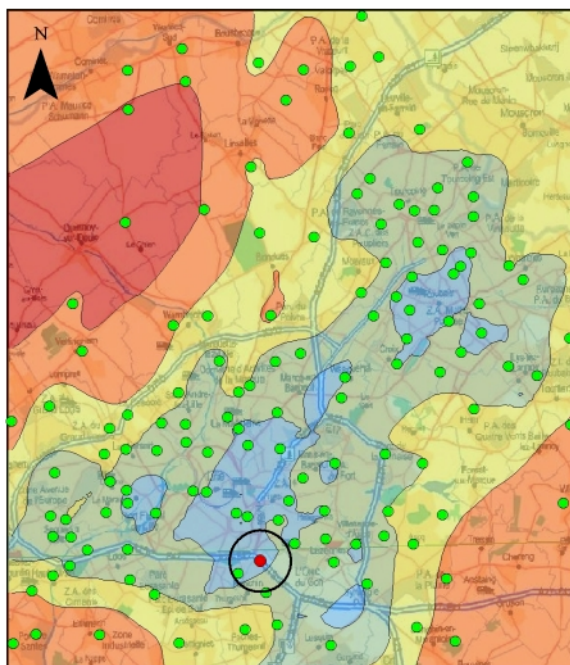


Figure 19 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Lille Faidherbe ($39.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%

Les zones englobées par l'isoligne représentant une probabilité de 80% sont plus importantes pour la station Roubaix Château. On observe que cette station peut être représentative de la pollution dans les deux plus importantes agglomérations : Lille et Roubaix.

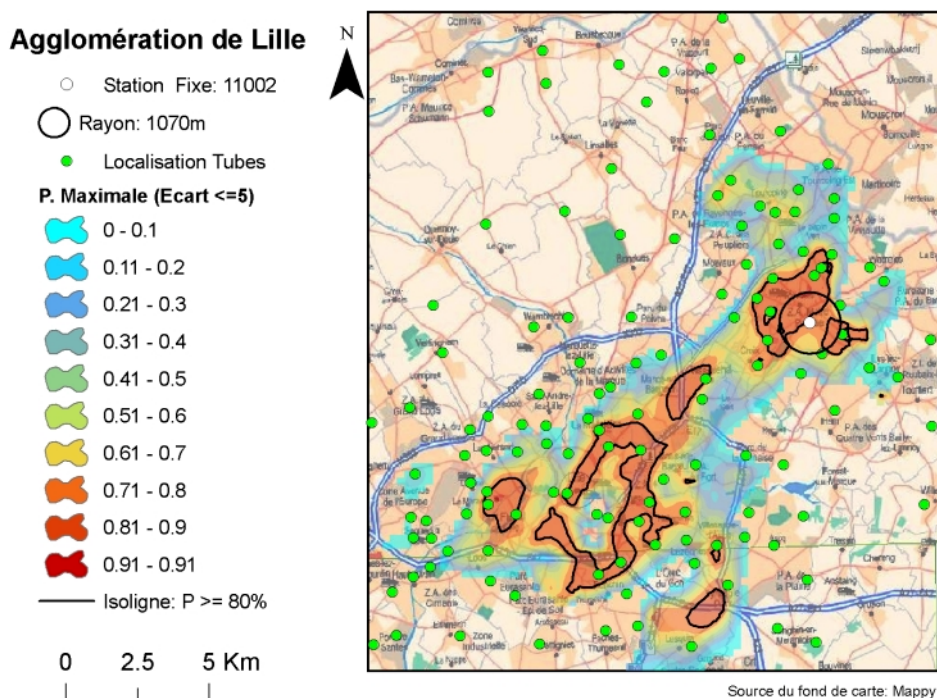


Figure 20 : LILLE – SF Roubaix Château (11002) : Carte de la probabilité maximale que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 40.78 et 30.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Les deux cartes ci-jointes montrent les zones de représentativité pour cette station calculées par les deux méthodes étudiées. Dans les deux cas la plupart des zones habitées sont concernées.

De la même façon que pour la station Lille Faidherbe, pour obtenir des zones de représentativité semblables, les marges d'erreur diffèrent d'une méthode à l'autre, dans la Figure 21 celui-ci est de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et dans la Figure 22 de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec un niveau de confiance de 90%.

Agglomération de Lille

○ Station Fixe: 11002

○ Rayon: 1070m

● Localisation Tubes

Ecart à la SF 11002

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

0 - 5

5.1 - 10

10.1 - 15

15.1 - 17.9

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

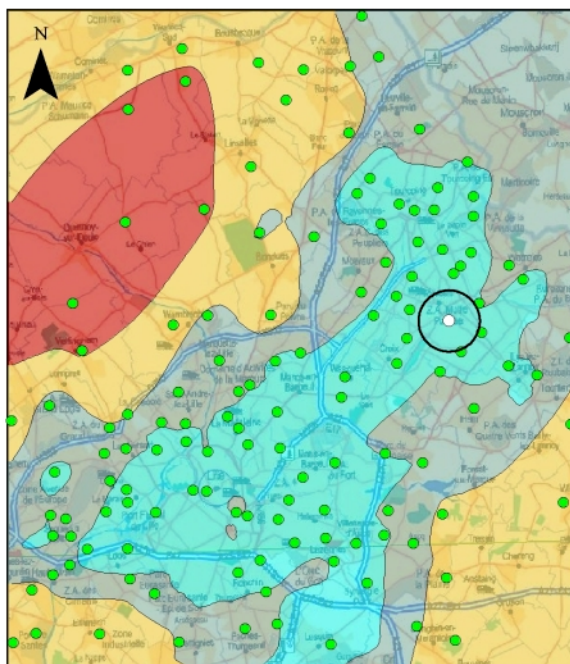


Figure 21 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Roubaix Château ($35.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Agglomération de Lille

○ Station Fixe: 11002

○ Rayon: 1070m

● Localisation Tubes

Ecart Maximal à la SF 11002 (P90%)

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

4.8 - 5

5.1 - 10

10.1 - 15

15.1 - 20

20.1 - 23.4

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

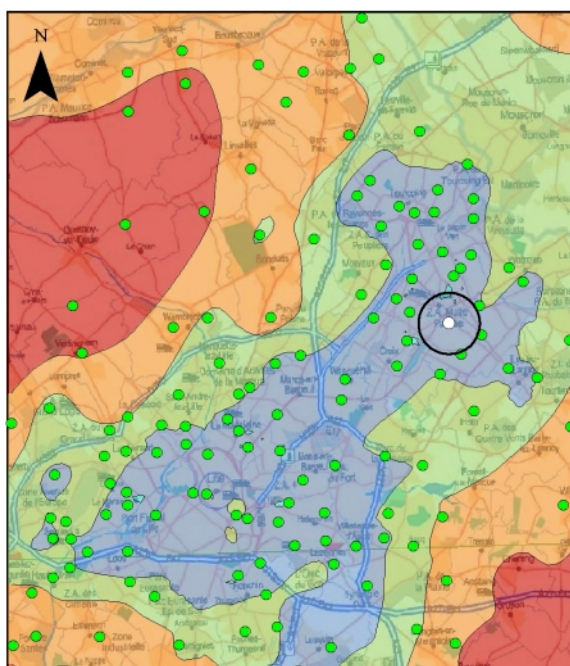


Figure 22 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Roubaix Château ($35.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%

3.3.2.2 RATTACHEMENT D'UN POINT A UNE STATION FIXE

La carte de la Figure 23 montre le plus petit écart maximal qu'on peut calculer sur le domaine d'étude en prenant en compte un niveau de confiance de 95% et toutes les 9 stations fixes ; cet écart est compris entre 5.6 et 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans la plupart du domaine et dans les zones les plus habitées.

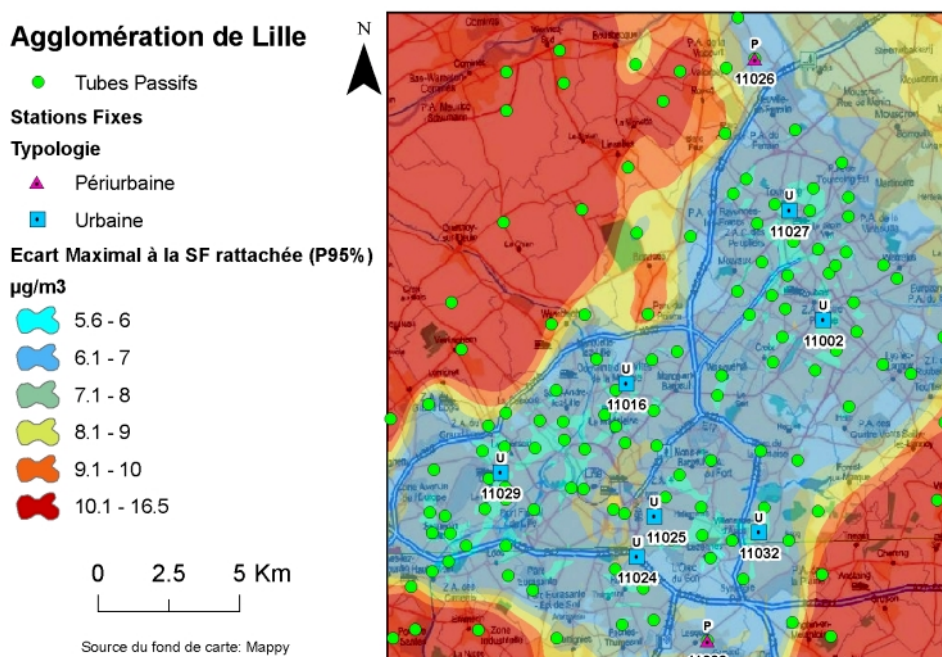


Figure 23 : LILLE - Carte de la plus petite valeur des écarts maximaux pour une probabilité de 95%

Le calcul des zones de rattachement confirme que la station Roubaix Château est représentative des niveaux de pollution dans les zones urbaines des deux plus importantes agglomérations (cf. Figure 24). En ce qui concerne la station Lille Faidherbe, elle est représentative des zones les plus exposées localisées en centre ville de Lille.

Les zones présentant des niveaux de pollution intermédiaires sont rattachées aux 5 stations localisées en zone périphérie à l'ouest et à l'est des pôles urbains : 11033, 11027, 11025, 11016, 11029.

Les stations 11026 et 11032 sont représentatives des zones présentant les plus faibles concentrations et localisées en bordure du domaine.

Si on applique un rayon de 1040m autour des stations, on observe que les zones de rattachement se réduisent considérablement (cf. Figure 25).

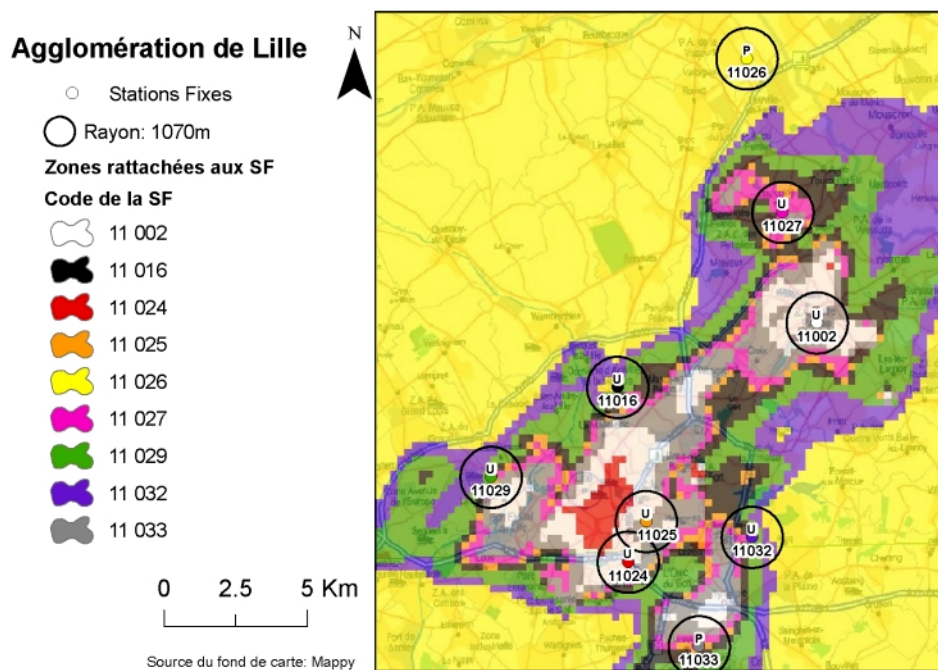


Figure 24 : LILLE - Zones rattachées et rayon représentant une distance de 1070m des stations fixes

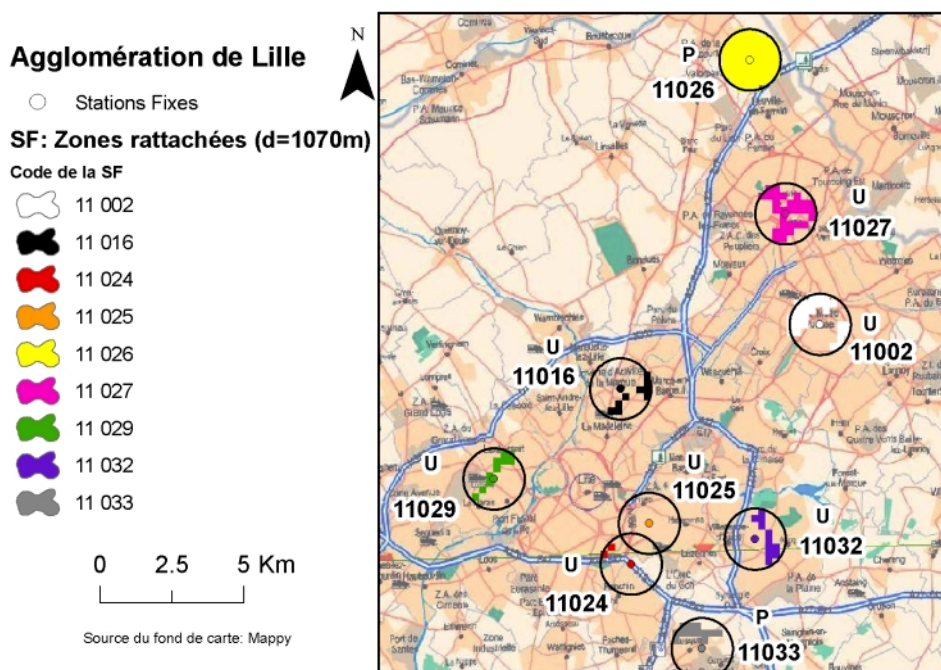


Figure 25 : LILLE - Zones rattachées se trouvant à une distance maximale de 1070m des stations fixes

3.3.2.3 DEPASSEMENT DE SEUILS

Deux seuils ont été considérés à Lille, le premier est $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, il correspond au seuil réglementaire à respecter en moyenne annuelle, le second est $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Deux marges d'erreur ont également été prises en compte, la première impose un niveau de confiance à 90% et la seconde moins rigoureuse correspond à une probabilité de 66%.

Sur les quatre cartes, présentées par la suite, seules les zones de rattachement des deux stations 11002 et 11024 sont affichées. Les codes de couleurs représentent pour chaque station les résultats obtenus par rapport au seuil considéré.

On observe que la plupart des zones rattachées à la station Roubaix Château peuvent être inférieures à $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (confiance de 66%) en revanche pour les zones rattachées à la station Lille Faidherbe on ne peut rien affirmer, cela veut dire que les concentrations peuvent être supérieures ou inférieures à ce seuil.

Pour le reste, on peut qu'affirmer qu'il y a une forte probabilité pour que la plupart des points rattachés aux deux stations dépassent le seuil de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

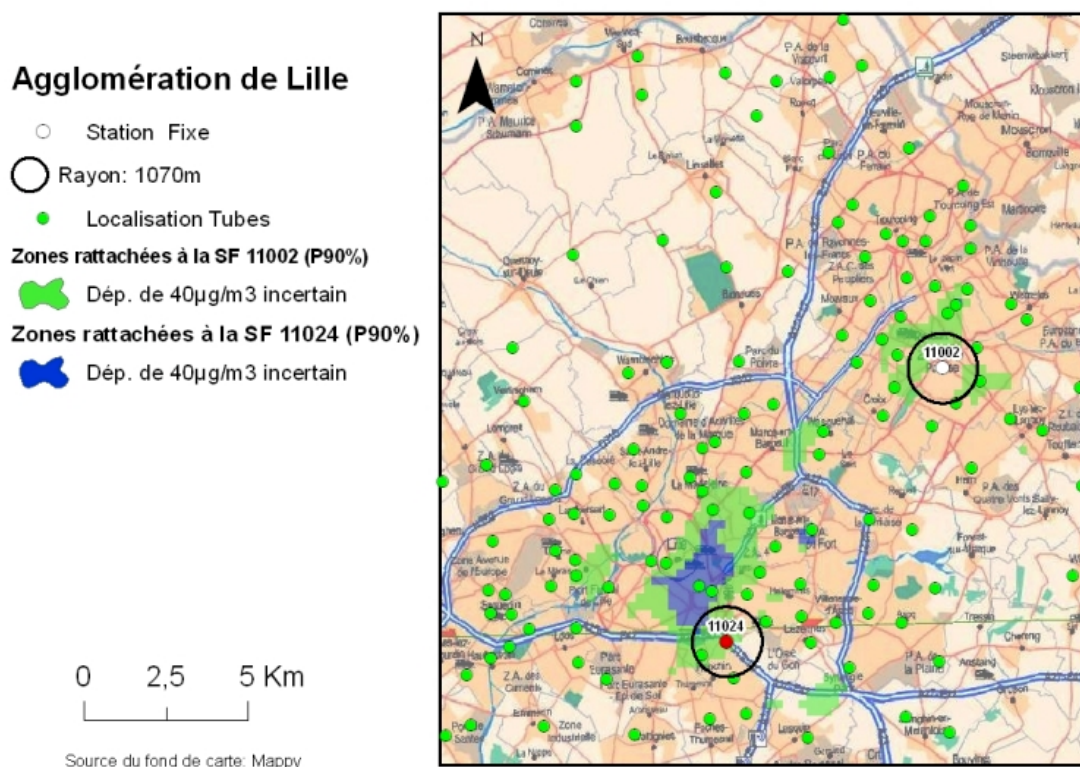


Figure 26 : LILLE - dépassement par rapport à un seuil de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (P 90%), Stations Roubaix Châteaux (11002) et Lille Faidherbe (11024)

Agglomération de Lille

- Station Fixe
- Rayon: 1070m
- Localisation Tubes
- Zones rattachées à la SF 11002 (P66%)**
 - Concentrations < 40µg/m³
 - Dép. de 40µg/m³ incertain
- Zones rattachées à la SF 11024 (P66%)**
 - Dép. de 40µg/m³ incertain

0 2,5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

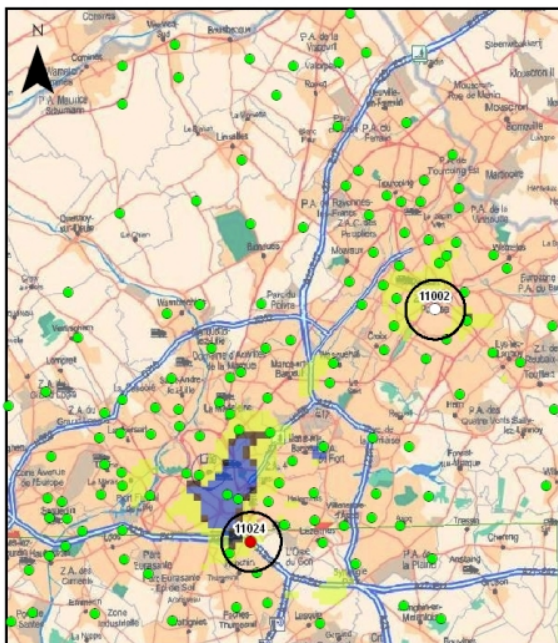


Figure 27 : LILLE - dépassement par rapport à un seuil de 40 µg/m³ (P 66%), Stations Roubaix Châteaux (11002) et Lille Faidherbe (11024)

Agglomération de Lille

- Station Fixe
- Rayon: 1070m
- Localisation Tubes
- Zones rattachées à la SF 11024 (P90%)**
 - Concentrations > 30µg/m³
- Zones rattachées à la SF 11002 (P90%)**
 - Dép. de 30µg/m³ incertain
 - Concentrations > 30µg/m³

0 2,5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

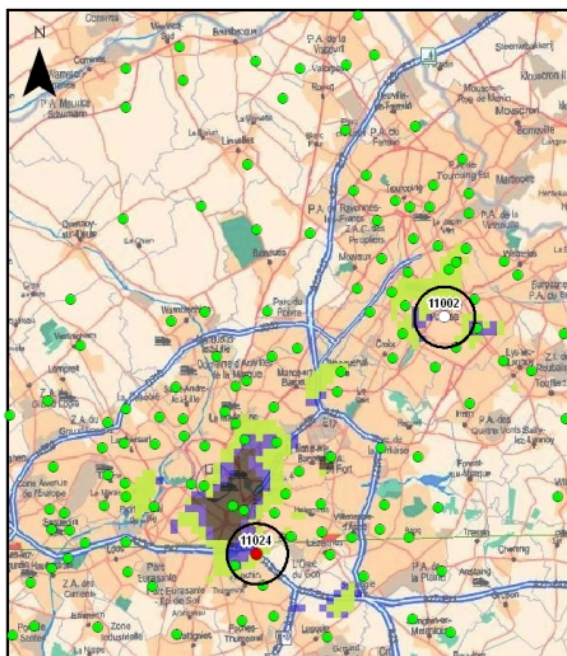


Figure 28 : LILLE - dépassement par rapport à un seuil de 30 µg/m³ (P 90%), Stations Roubaix Châteaux (11002) et Lille Faidherbe (11024)

Agglomération de Lille

- Station Fixe
- Rayon: 1070m
- Localisation Tubes
- Zones rattachées à la SF 11024 (P66%)**
- Concentrations > $30\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Zones rattachées à la SF 11002 (P66%)**
- Concentrations > $30\mu\text{g}/\text{m}^3$

0 2,5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

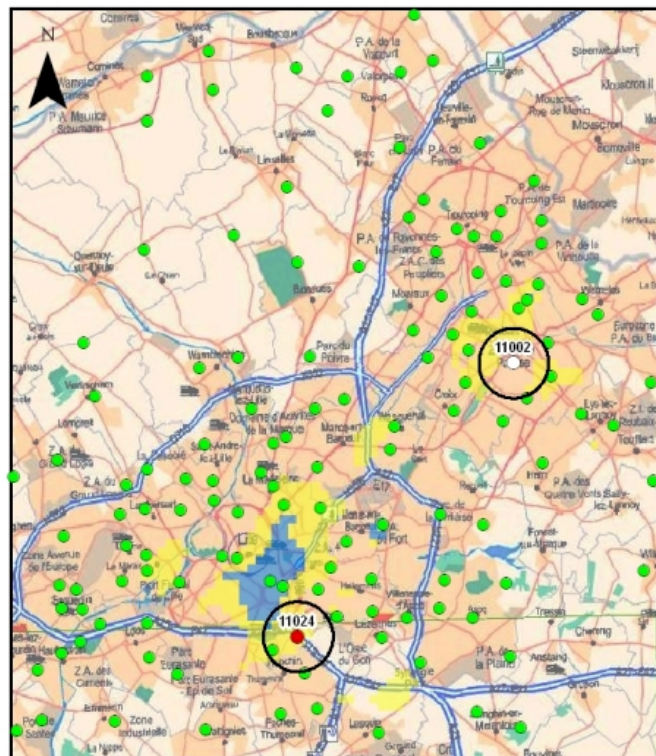


Figure 29 : LILLE - dépassement par rapport à un seuil de $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ (P 66%), Stations Roubaix Châteaux (11002) et Lille Faidherbe (11024)

4. CONCLUSIONS

Cette démarche apparaît comme indispensable pour la mise en œuvre des directives européennes qui usent largement de cette notion de représentativité.

Cette étude présente et analyse deux méthodes possibles pour le calcul des zones de représentativité spatiales des stations fixes vis-à-vis d'un objectif qualifiant la qualité de l'air (moyennes annuelles).

Pour les deux méthodes proposées, un point du domaine fait partie de la zone de représentativité d'une station fixe si l'écart entre les concentrations est « faible ». Cette différence doit être inférieure ou égale à une quantité définie à l'avance, appelée « écart maximal toléré ».

Les deux méthodologies requièrent la réalisation d'une cartographie des concentrations du polluant. Pour obtenir cette carte, il est conseillé d'employer les méthodes géostatistiques d'interpolation de données issues de campagnes de tubes passifs par exemple, car cette cartographie doit être la plus précise possible.

La première méthode développée par le LCSQA en 2001, préconise de comparer directement au seuil l'écart entre les concentrations estimées et mesurées par la station fixe.

La seconde méthode, développée en 2005 par Air Normand, recommande, avant d'appliquer le seuil pour la sélection des zones de représentativité, d'ajouter à cet écart un terme qui est fonction de l'incertitude de l'estimation, représentée par l'écart - type de krigeage.

Le développement de cette méthodologie fait appel aux concepts de la théorie de probabilités, ce qui permet d'aboutir à l'obtention des zones de représentativité en fonction d'un niveau de confiance ou probabilité qu'il faut déterminer à l'avance.

En conséquence, cette méthode fournit à plusieurs zones possibles de représentativité en fonction des paramètres choisis : risque accepté et écart maximal toléré. Il est donc conseillé d'effectuer à chaque fois une étude de sensibilité aux paramètres, afin de comprendre l'influence de ces derniers sur les résultats finaux.

Sur dans deux cas d'étude il a été montré que la prise en compte des incertitudes d'estimation résultait en une diminution des zones de représentativité et que dans quelques cas, comme à Lille par exemple, cela revenait à les éliminer complètement.

Il faut cependant noter que le développement théorique même de la méthode peut aussi contribuer à ce résultat. En effet, comme il est mentionné en annexe 2, il conduit à restreindre la condition initiale d'appartenance à la zone de représentativité d'une station.

D'autre part, du fait que la configuration des points de mesure influence l'écart type d'estimation, les zones de représentativité peuvent être sensibles au plan d'échantillonnage. Celui-ci doit donc couvrir au mieux le domaine d'étude.

En conclusion, le choix de la méthode et des paramètres requis pour le calcul des zones de représentativité dépend de la précision voulue et de la possibilité

d'application en fonction des caractéristiques des données disponibles : existence de campagnes par tubes passifs, possibilité d'application des méthodes géostatistiques pour l'obtention de la moyenne annuelle de NO₂, structure spatiale du phénomène, etc.

La représentativité spatiale vis-à-vis d'un objectif de surveillance à long terme a été considérée dans cette étude. Concernant un objectif à court terme, il est possible de développer une démarche similaire mais celle-ci devra être adoptée en fonction du caractère des données disponibles et des résultats attendus.

Par exemple, dans le cas de l'ozone, les normes ne s'intéressent pas à une moyenne annuelle, comme pour le dioxyde d'azote, mais au maximum journalier d'une moyenne glissante sur huit heures.

Il faut donc travailler sur ce type de statistiques pour déterminer une nouvelle définition de la représentativité vis-à-vis d'un objectif de surveillance à court terme ; cela pourra être développé à l'avenir par le LCSQA.

5. BIBLIOGRAPHIE

- AIR NORMAND, 2005. Travail d'option d'Anne Cori - Deuxième partie : Représentativité spatiale des stations de mesure de la concentration moyenne annuelle en NO₂.
- Chan CC et Hwang JS, 1996. Site Representativeness of Urban Air Monitoring Stations. Air Waste Manage. Assoc. 1996 ; 46: 755-760.
- ADEME, 2002. Classification et critères d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air. ADEME Editions, Paris, 2002.
- Spangl W., Schneider J., Moosmann L., Nagl C., 2007. Final report. Representativeness and classification of air quality monitoring stations. Report REP-0121. Ed. Umweltbundesamt.
- www.umweltbundesamt.at/en/publikationen/english_studies.
- Van den Hout D., Larssen S., 2006. Representativeness and network design. Draft 02-08-06.

Rapports LCSQA :

- Perdrix, E., Fourche B., Plaisance H., Wroblewski A., Représentativité spatiale des stations urbaines. LCSQA/EMD – Etude 7 –Décembre 2001
- Cardenas G. «Géostatistique et estimation de probabilités de dépassements de seuils». LCSQA/INERIS - Etude 13 - 2004.
- Perdrix E., Wroblewski A., Fourché B. et Plaisance H. Cartographie des concentrations en dioxyde d'azote à partir des mesures en stations fixes. LCSQA/EMD - Etude 11 – 2004.
- Cardenas G. et Perdrix E. « Adaptation de méthodes géostatistiques à la cartographie automatique de NO₂ ». LCSQA/INERIS/EMD - Etude 31 - 2005.
- Cardenas G. et Perdrix, E. « Méthode de surveillance de concentrations de NO₂ : cartographie automatique à partir de stations fixes et prise en compte de la proximité ». LCSQA – Décembre 2006.

6. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	: Document de référence de l'étude	4
Annexe 2	: Déduction de la formule pour le calcul des zones de représentativité	5
Annexe 3	: Déduction de la formule pour le calcul des zones de représentativité dans le cas du modèle des résidus	2
Annexe 4	: Déduction de la condition sur l'écart - type de krigeage	2
Annexe 6	: Déduction de la formule pour le calcul de la probabilité que l'écart entre les concentrations soit inférieur ou égal à	2
Annexe 7	: ROUEN - Application de la méthode de cokrigeage pour l'estimation de la moyenne annuelle de 2005 de la concentration de NO ₂	7
Annexe 8	: ROUEN – Méthode EMD, Cartes des écarts	4
Annexe 9	: ROUEN - Cartes des probabilités maximales pour un écart $\leq 5\mu\text{g}/\text{m}^3$	4
Annexe 10	: ROUEN - Cartes des écarts maximaux pour une $P \leq 95\%$	4
Annexe 11	: LILLE - Application de la méthode de cokrigeage temporel pour l'estimation de la moyenne annuelle de l'année 2003-2004 de la concentration de NO ₂	5
Annexe 12	: LILLE – Méthode EMD, Cartes des écarts	7
Annexe 13	: LILLE - Cartes des probabilités maximales pour un écart $\leq 5\mu\text{g}/\text{m}^3$	7
Annexe 14	: LILLE - Cartes des écarts maximaux pour une probabilité de 90%	7

**THEME GENERAL : MODELISATION – TRAITEMENTS
NUMERIQUES**

**Etude : Représentativité des stations de mesures
du réseau national de surveillance de la qualité de l'air**

Objectif

Une réflexion est engagée en France depuis 2005, avec la rédaction des PSQA, sur la remise à niveau du réseau de mesure français. En particulier, il faut envisager le redéploiement du réseau PM pour prendre en compte les mesures futures de PM 2.5 et reconsidérer le réseau des autres polluants classiques (notamment ozone et NO₂) pour intégrer les possibilités offertes par les nouvelles méthodes d'évaluation (combinaison mesures en continu / mesures temporaires, modélisation).

L'objectif de cette étude est de fournir des éléments techniques d'appréciation permettant de mener à bien et d'encadrer cette évolution.

Contexte et travaux antérieurs

Cette étude s'appuie sur l'analyse des PSQA réalisée par le LCSQA en 2006, et sur des travaux liés à la représentativité spatiale des stations de mesure urbaines menés par l'EMD en 2001 et par Air Normand en 2005.

Travaux proposés pour 2007

- **Application de la méthode des zones d'homogénéité à l'évaluation de la représentativité spatio-temporelle des stations de mesure des PM, O₃ et NO₂ (action EMD)**

Il sera réalisé un état descriptif de la situation actuelle du dispositif de mesure :

- des particules PM₁₀ et PM_{2.5}
- de l'ozone
- du dioxyde d'azote.

Cette étape de mise à jour apparaît indispensable en préambule de l'ensemble des travaux proposés, qui seront réalisés en liaison avec les AASQA.

Mesure des PM

Les travaux finalisés en 2005 et 2006 sur les zones d'homogénéité des stations de mesure des PM 10 et PM 2.5 seront utilisés pour établir des propositions de réduction du parc PM10 en vue du redéploiement des appareils en configuration PM 2.5. Cette partie de l'étude sera réalisée en 2007.

Mesure d'O₃

Les concentrations en O₃ mesurées en zones périurbaines et rurales par un nombre élevé d'appareils ont des évolutions spatio-temporelles assez semblables sur de vastes zones ; cette observation a conduit naturellement à s'interroger sur la densité du réseau de surveillance correspondant.

Une démarche orientée vers une optimisation du réseau basée sur la détermination de zones d'homogénéité est proposée afin de réduire, soit le parc de stations ou la durée de la surveillance.

La connaissance des zones d'homogénéité sera initiée dans une première étape par l'étude de données journalières (ou moyennes sur 8 heures) selon la méthodologie déjà utilisée pour les données PM10. Cette étape sera réalisée en 2007 et prolongée en 2008 pour l'étape finale d'optimisation.

Mesure de NO₂

Une démarche similaire à celle mise en œuvre pour O₃ sera initiée pour NO₂ en zones urbaines et rurales.

Les données issues de situations de proximité automobile et industrielle ne seront pas prises en compte du fait de leur non-représentativité spatiale et temporelle.

Cette partie de l'étude sera exécutée en parallèle avec celle relative à O₃.

- **Application des méthodes géostatistiques à l'évaluation de la représentativité spatiale des stations NO₂ et O₃ (action INERIS)**

Cette étude, prévue sur deux ans, sera conduite en collaboration avec AIR NORMAND et d'autres AASQA volontaires. Son objectif est double. Il s'agit de :

- mettre au point une méthodologie qui permette aux AASQA d'évaluer la représentativité spatiale de leurs stations relativement à certains objectifs de surveillance et par suite, les aider à atteindre plus efficacement ces objectifs,
- disposer d'une assise scientifique et de résultats quantitatifs afin de proposer une éventuelle réactualisation des critères de représentativité et d'implantation contenus dans le guide ADEME (*Classification et implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air*, 2002).

Les activités envisagées pour 2007 constituent la partie exploratoire de ce travail. Elles comprendront les points suivants :

- **définition de l'objet d'étude :**

Suivant quels critères de concentration est définie la représentativité spatiale d'un point de mesure ? Pour quelles variables de pollution s'agit-il d'évaluer cette représentativité : moyenne annuelle, saisonnière, horaire, quantile, nombre de dépassements de seuil... ?

Cette première étape tiendra compte des exigences réglementaires et des valeurs limites fixées pour le dioxyde d'azote et l'ozone. Elle comprendra une étude bibliographique ainsi qu'une revue des méthodes utilisées en France ou à l'étranger pour qualifier ou quantifier l'aire de représentativité de stations de mesure.

- **analyse des méthodes existantes :**

Cette analyse portera sur les techniques mises en œuvre par l'EMD en 2001 et par AIR Normand en 2005. Elle pourra s'étendre à toute autre méthode identifiée dans l'étape précédente. Elle se déroulera en quatre temps :

- caractérisation des méthodes : données d'entrée, hypothèses requises, mode et outils de calcul, réponses fournies par rapport aux exigences réglementaires,...
- calculs complémentaires sur les jeux de données déjà traités afin de permettre la comparaison des méthodes (en collaboration avec l'EMD)
- analyse des résultats obtenus, mise en évidence des avantages et faiblesses de chaque méthode
- propositions d'améliorations. A cette occasion, on examinera la façon d'exploiter au mieux les variables auxiliaires (densité de population, d'occupation du sol ou d'émissions par exemple).

- **application à de nouveaux cas :**

En tenant compte de l'analyse précédente, les méthodes étudiées seront appliquées à un ou plusieurs autres jeux de données, à définir en concertation avec les AASQA participantes. Ceux-ci concerneront le NO₂ et, selon les possibilités des méthodes et les données disponibles, l'ozone.

Si les résultats obtenus permettent de dégager une ou plusieurs méthodes pertinentes, des calculs approfondis seront réalisés en 2008 afin d'évaluer la solidité de ces techniques et de les appliquer dans différentes situations.

Annexe 2 : Dédution de la formule pour le calcul des zones de représentativité

Définition initiale de la représentativité :

- δ_i^j : Écart maximal toléré entre la moyenne annuelle de la station fixe j et la concentration d'un point i
1. $\left| z_i - z^{SF_j} \right| \leq \delta_i^j$ z_i : Concentration annuelle du NO₂ dans un point i.
 z^{SF_j} : Moyenne annuelle de NO₂ de la SF j.

Remplacement des valeurs réelles par des estimations et prise en compte de l'erreur d'estimation :

- $z_i = z_i^* + e_i$ z_i : Concentration annuelle estimée du NO₂ dans la maille i.
- $\left| (z_i^* + e_i) - z^{SF_j} \right| \leq \delta_i^j$
2. $\left| e_i + z_i^* - z^{SF_j} \right| \leq \delta_i^j$ e_i : Erreur d'estimation du NO₂ dans la maille i.

Si on applique l'inégalité triangulaire :

$$\left| e_i + (z_i^* - z^{SF_j}) \right| \leq |e_i| + \left| z_i^* - z^{SF_j} \right|$$

on obtient :

3. $|e_i| + \left| z_i^* - z^{SF_j} \right| \leq \delta_i^j$
4. $|e_i| \leq \delta_i^j - \left| z_i^* - z^{SF_j} \right|$

Parmi les points du domaine en étude, ceux où l'erreur d'estimation respecte la condition de l'expression 4 seront donc représentatifs de la station fixe. Cependant, cette expression est une condition suffisante mais non nécessaire pour que l'inégalité 2 soit vérifiée. Ainsi, il est possible que des z_i^* , qui vérifient pourtant l'inégalité 2, soient exclus de la zone de représentativité. L'utilisation de l'inégalité triangulaire restreint donc la zone de représentativité.

On recourt à l'inégalité de Bienaymé-Tchebychev de façon à majorer l'erreur d'estimation, en exploitant les paramètres connus : l'espérance, nulle d'après la contrainte de non biais du krigeage et l'écart - type d'estimation.

Inégalité de Bienaymé-Tchebychev : la probabilité pour qu'une réalisation de X tombe à une distance de la moyenne supérieure à K fois l'écart - type, est inférieure à $1/k^2$:

$$P\left[|x - E(x)| > k\sigma(x)\right] \leq \frac{1}{k^2}$$

$E(x)$: Esperance mathématique ou moyenne de la variable aléatoire x.
 $\sigma(x)$: Ecart-type de la variable aléatoire x.

Si on remplace la variable x par l'erreur d'estimation :

$$P\left[|e_i| > k\sigma_i\right] \leq \frac{1}{k^2}$$

Comme $P(x > a) = [1 - P(x \leq a)]$, le membre gauche de cette inégalité devient :

$$6. \quad P\left[|e_i| \leq k\sigma_i\right] \geq 1 - \frac{1}{k^2}$$

On peut donc dire avec une probabilité fixée $P = 1 - (1/k^2)$ que l'erreur d'estimation se trouve à l'intérieur d'un certain intervalle : $-\sigma_i, \sigma_i$. Par ailleurs, dans une zone où :

$$7. \quad k\sigma_i \leq \delta_i^j - \left|z_i^* - z^{SF_j}\right| \quad \text{d'après l'expression 6, on peut dire que :}$$

$$P\left[|e_i| \leq \delta_i^j - \left|z_i^* - z^{SF_j}\right|\right] \geq 1 - \frac{1}{k^2} \quad \text{soit encore:}$$

$$P\left[|e_i| + \left|z_i^* - z^{SF_j}\right| \leq \delta_i^j\right] \geq 1 - \frac{1}{k^2}$$

$$\text{mais comme: } |e_i| + \left|z_i^* - z^{SF_j}\right| \geq \left|e_i + z_i^* - z^{SF_j}\right| \quad \text{alors :}$$

$$P\left[|e_i| + \left|z_i^* - z^{SF_j}\right| \leq \delta_i^j\right] \geq P\left[\left|e_i + z_i^* - z^{SF_j}\right| \leq \delta_i^j\right]$$

En conséquence :

$$P\left[\left|e_i + z_i^* - z^{SF_j}\right| \leq \delta_i^j\right] \geq 1 - \frac{1}{k^2} \quad \text{soit encore :}$$

$$P\left[\left|z_i - z^{SF_j}\right| \leq \delta_i^j\right] \geq 1 - \frac{1}{k^2}$$

Pour estimer les zones de représentativité avec une probabilité donnée, il faut donc sélectionner les zones où :

$$8. \quad k\sigma_i \leq \delta_i^j - \left| z_i^* - z^{SF_j} \right| \quad \text{avec} \quad k = \sqrt{\frac{1}{1-P}}$$

Ou, appliquer directement l'expression:

$$9. \quad \left[\sqrt{\frac{1}{(1-P)}} \right] * \sigma_i + \left| z_i^* - z^{SF_j} \right| \leq \delta_i^j$$

Dans le cas où la probabilité fixée est de 95% (marge d'erreur de 5%), les zones à sélectionner doivent respecter la condition :

$$4.47\sigma_i + \left| z_i^* - z^{SF_j} \right| \leq \delta_i^j$$

Notons là encore que l'inégalité 9 est une condition suffisante et définit donc de façon restrictive la zone de représentativité.

Cas de la loi gaussienne :

Une variable aléatoire X est dite variable gaussienne, lorsque sa densité de probabilité est la célèbre courbe en cloche :

$$g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2}$$

La fonction de répartition d'une variable gaussienne est :

$$F(x) = P[X \leq x] = \int_{-\infty}^x g(x) dx$$

Pour une variable gaussienne centrée réduite T (moyenne nulle et variance égale à un), la fonction de densité de probabilité est :

$$g(t) = \frac{1}{1 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-0}{1} \right)^2}$$

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

Et la fonction de répartition est :

$$G(t) = P[T \leq t] = \int_{-\infty}^t g(t) dt = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

On dispose de tables donnant des approximations de la fonction de répartition d'une variable centrée réduite (fonction G), on peut donc connaître la probabilité qu'une variable gaussienne T soit inférieure à une valeur gaussienne t .

Une variable gaussienne non réduite X , peut se ramener à une variable gaussienne réduite T par la relation suivante :

$$T = \frac{X - m}{\sigma}$$

$$X = \sigma T + m$$

Expression très commode permettant de ramener tout calcul de probabilité relatif à la loi gaussienne à un calcul de probabilité relatif à la loi normale centrée réduite, dont on connaît densité et fonction de répartition ; par exemple en utilisant ces formules on obtient la fonction de répartition de X :

$$F(x) = G\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)$$

$$P(X \leq x) = G\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)$$

$$P(X \leq x) = G(t)$$

Si a et b sont deux réels tels que $a \leq b$, des formules précédentes on déduit encore :

$$P(a \leq X \leq b) = P(X \leq b) - P(X \leq a)$$

$$P(a \leq X \leq b) = F(b) - F(a)$$

$$P(a \leq X \leq b) = G\left(\frac{b-m}{\sigma}\right) - G\left(\frac{a-m}{\sigma}\right)$$

Si $a = (m - t\sigma)$ et $b = (m + t\sigma)$, intervalle centré à la moyenne, on a :

$$P(m - t\sigma \leq X \leq m + t\sigma) = G\left(\frac{m + t\sigma - m}{\sigma}\right) - G\left(\frac{m - t\sigma - m}{\sigma}\right)$$

$$P(m - t\sigma \leq X \leq m + t\sigma) = G(t) - G(-t) \Rightarrow P = G(t) - [1 - G(t)]$$

$$P = G(t) - 1 + G(t) \Rightarrow P = 2G(t) - 1$$

$$t = G^{-1}\left(\frac{P+1}{2}\right)$$

L'intervalle centré à la moyenne $[(m - t\sigma), (m + t\sigma)]$ est appelé plage de normalité au niveau de confiance P ; c'est un intervalle dans lequel se trouve $P\%$ de la population lorsque la distribution est gaussienne.

Par exemple si $P=95\%$, t est égale²⁰ à 1.96 ; cela veut dire que le 95% de la population d'une variable gaussienne se trouve dans un intervalle entre -1.96 et 1.96.

Si on suppose que l'erreur d'estimation est une variable gaussienne avec espérance nulle²¹ et écart - type égal à l'écart - type de krigeage, on a :

$$P(-t\sigma \leq e \leq t\sigma) = 2G(t) - 1 \Rightarrow t = G^{-1}\left(\frac{P+1}{2}\right)$$

De la même façon que dans le cas général, la condition de l'expression 4 devient :

$$|e_i| \leq \delta_i^j - |z_i^* - z^{SF_j}| \quad \text{et} \quad |e_i| \leq t\sigma_i \quad \text{alors si} \quad t\sigma_i \leq \delta_i^j - |z_i^* - z^{SF_j}| :$$

$$P\left[|e_i| \leq \delta_i^j - |z_i^* - z^{SF_j}|\right] \geq 2G(t) - 1$$

Et en procédant de la même façon que dans le cas général, on arrive à l'expression :

$$P\left[|z_i - z^{SF_j}| \leq \delta_i^j\right] \geq 2G(t) - 1$$

En conclusion, pour estimer les zones de représentativité en supposant l'erreur d'estimation gaussienne, il faut sélectionner les zones où :

$$G^{-1}\left(\frac{P+1}{2}\right) * \sigma_i + |z_i^* - z^{SF_j}| \leq \delta_i^j$$

²⁰ Valeur consultée dans une table de la fonction de répartition inverse de la loi normale centrée réduite pour $0.975=1.95/2$.

²¹ Condition de non-biais du krigeage.

*Annexe 3 : Dédution de la formule pour le calcul des zones de représentativité
dans le cas du modèle des résidus*

Dans le cas d'une estimation multivariable par le modèle des résidus, une décomposition de la concentration en deux variables est effectuée. La première variable est une fonction de dérive connue partout dans la maille d'estimation et dans les points de mesure (tubes passifs et stations fixes) ; la deuxième est un résidu aléatoire ($NO_2 = \text{dérive} + \text{résidu}$).

Grâce à ce modèle, les résidus sont calculés aux tubes passifs puis interpolés par krigeage en obtenant également l'écart - type de krigeage associé.

Si on remplace les concentrations dans l'Équation 4, par leurs équivalents dans ce modèle (dérive +résidus), on obtient :

$$\left\{ \left[G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)} * \sigma_i^r \right] + \left(\left| r_i^* - r^{SF_j} + f_i - f^{SF_j} \right| \right) \right\} \leq \delta_i^j$$

avec : $z_i = f_i + r_i$ (Modèle des résidus)

σ_i^r : Écart - type d'estimation des résidus (krigeage) de la maille i.

r_i^* : Estimation des résidus dans la maille i.

r^{SF_j} : Moyenne annuelle des résidus de la SF j.

f_i : Valeur de la dérive dans la maille i

f^{SF_j} : Valeur de la dérive dans la SF j

Équation 10 : Définition de représentativité avec prise en compte de l'erreur d'estimation (estimation multivariable par le modèle des résidus)

Lors de l'estimation multivariable par le modèle des résidus, l'inégalité de l'Équation 10 impose (ainsi que celle de l'Équation 4) un écart faible entre les concentrations (dans ce cas entre la décomposition $NO_2 = \text{dérive} + \text{résidu}$ dans la maille d'estimation et dans la station fixe) ; cependant si on applique l'inégalité à chaque partie du modèle, on arrive à une autre condition plus stricte :

$$\left\{ \left[G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)} * \sigma_i^r \right] + \left(\left| r_i^* - r^{SF_j} \right| + \left| f_i - f^{SF_j} \right| \right) \right\} \leq \delta_i^j$$

Équation 11 : Condition imposant un milieu similaire à celui de la station dans la définition de la représentativité avec une estimation multivariable par le modèle des résidus

Le critère sur les concentrations est divisé en deux : on doit maintenant respecter un écart faible entre les résidus et entre les fonctions de dérive (aux stations fixes et dans la maille d'estimation).

La dérive est construite à partir des fonctions comme la densité de population, la densité d'émissions, l'altitude, etc., variables représentant la typologie du milieu d'exposition (pollution de proximité ou de fond). Par conséquent, l'Équation 10 répond à une condition *n'imposant pas de similarité de milieu* et l'Équation 11 à une condition *imposant un milieu similaire* à celui de la station.

D'une façon similaire on obtient les expressions pour la détermination de la station fixe rattachée à chaque point de la maille lors d'une estimation multivariable avec le modèle de résidus :

$$\min \left\{ \sigma_i^r + \left(\left| r_i^* - r^{SF_j} + f_i - f^{SF_j} \right| \right) \right\}$$

Équation 12 : Calcul d'une station de rattachement (estimation multivariable par modèle des résidus : condition n'imposant pas de similarité de milieu)

$$\min \left\{ \sigma_i^r + \left(\left| r_i^* - r^{SF_j} \right| + \left| f_i - f^{SF_j} \right| \right) \right\}$$

Équation 13 : Calcul d'une station de rattachement (estimation multivariable par modèle des résidus : condition imposant un milieu similaire à celui de la station)

Annexe 4 : Dédution de la condition sur l'écart - type de krigeage

$$\left\{ \left[G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)} * \sigma_i^k \right] + \left| z_i^* - z^{SF_j} \right| \right\} \leq \delta_i^j$$

$$G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)} * \sigma_i^k \leq \delta_i^j - \left| z_i^* - z^{SF_j} \right|$$

$$\sigma_i^k \leq \frac{\delta_i^j - \left| z_i^* - z^{SF_j} \right|}{G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)}}$$

Si la concentration estimée est égale à celle de la station fixe, on a :

$$\sigma_i^k \leq \frac{\delta_i^j}{G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)}}$$

Dans le cas d'une estimation multivariable par le modèle des résidus²², la condition sur l'écart - type d'estimation des résidus s'écrit :

$$\sigma_i^r \leq \frac{\delta_i^j - \left(\left| r_i^* - r^{SF_j} \right| + \left| f_i - f^{SF_j} \right| \right)}{G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)}}$$

Si les deux composantes du modèle des résidus sont égales, la condition sur l'écart - type d'estimation des résidus devient d'une part :

$$\sigma_i^r \leq \frac{\delta_i^j}{G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)}}$$

D'autre part, si le résidu estimé est égal à celle de la station fixe, on obtient :

$$\sigma_i^r \leq \frac{\delta_i^j - \left| f_i - f^{SF_j} \right|}{G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)}}$$

²² Contrainte de similitude de milieu

Et inversement, si la dérive est égale à celle de la station fixe, on a

$$\sigma_i^r \leq \frac{\delta_i^j - \left(r_i^* - r^{SF_j} \right)}{G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)}}$$

On rajoute dans ces deux derniers cas une troisième variable, l'écart entre les dérivées ou entre les résidus, cela produit en même temps une contrainte supplémentaire, l'écart maximal toléré doit être supérieur à cette nouvelle variable.

Annexe 5 : Développement d'une méthode permettant de restreindre les zones de représentativité: Définition d'un rayon maximal d'influence pour les stations²³

Soit $Z(x)$ la concentration moyenne annuelle en dioxyde d'azote, posons : $Y_h(x) = Z(x+h)$ et supposons pour simplifier que $Z(x+h)$ et $Y_h(x)$ soient normées.

Si on admet qu' $Y_h(x)$ puisse être estimée linéairement par $Z(x)$.

On a donc, avec les notations classiques : $Y_h^{est}(x) = [\rho(h) * Z(x)]$, où :

$$\rho(h) = \frac{Cov(Y_h, Z)}{\sigma_{Y_h} \sigma_Z} = Cov(Y_h, Z) = C(h), \text{ puisque les variables sont normées.}$$

On peut donc écrire : $Y_h(x) = [Y_h(x)^{est} + R(x)] = [\rho(h) * Z(x)] + R(x)$ en notant R le résidu de la régression linéaire.

La variable $Z(x)$ et le résidu $R(x)$ sont dans ce cas non corrélés (propriété classique d'une régression linéaire).

D'où : $Var[Y_h(x)] = \{\rho(h)^2 * Var[Z(x)]\} + Var[R(x)]$ $Y_h(x)$ et $Z(x)$ étant supposées normées, leurs variances valent 1. Finalement, on a :

$$Var[R(x)] = [1 - \rho(h)^2] \text{ soit encore :}$$

$$Var[Y_h(x)] = \{\rho(h)^2 * Var[Z(x)]\} + [1 - \rho(h)^2]$$

Or on cherche une zone pour laquelle $Y_h(x)$ et $Z(x)$ sont bien corrélés. On peut par exemple considérer que c'est le cas si la valeur de la variance de $Y_h(x)$ est due pour plus de 50% à celle de la variance de $Z(x)$, c'est-à-dire que $\rho(h)^2 \geq 50\%$, soit :

$$\rho(h)^2 \geq 0.5, \text{ mais : } \rho(h) = \left[\frac{C(h)}{\sigma^2} \right] = \left[\frac{C(h)}{C(0)} \right], \text{ alors : } C(h) \geq [0.71 * C(0)]$$

Mais encore : $\gamma(h) = [C(0) - C(h)] \Rightarrow$ Relation entre le variog. et la cov. spatiale

$$C(h) = [C(0) - \gamma(h)], \text{ et donc :}$$

$$[C(0) - \gamma(h)] \geq [0.71 * C(0)]$$

$$\gamma(h) \leq \{C(0) - [0.71 * C(0)]\}$$

$$\gamma(h) \leq [0.29 * C(0)]$$

Par la relation entre le variogramme et la covariance spatiale, on déduit que la valeur $C(0)$ est égale à la somme des paliers du variogramme. La méthode proposée pour calculer le rayon maximal d'influence d'une mesure consiste donc à chercher graphiquement la distance h pour laquelle le modèle de variogramme est égale à 29% de la somme des paliers (cf. fig. 33, annexe 7 et fig. 49, annexe 11).

²³ Texte issu de la référence : AIR NORMAND, 2005.

Annexe 6 : Dédution de la formule pour le calcul de la probabilité que l'écart entre les concentrations soit inférieur ou égal à δ

$$\left\{ \left[G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)} * \sigma_i^k \right] + \left| z_i^* - z^{SF_j} \right| \right\} \leq \delta_i^j$$

$$\left[G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)} * \sigma_i^k \right] \leq \delta_i^j - \left| z_i^* - z^{SF_j} \right|$$

$$G^{-\left(\frac{P+1}{2} \right)} \leq \frac{\delta_i^j - \left| z_i^* - z^{SF_j} \right|}{\sigma_i^k}$$

$$\frac{P+1}{2} \leq G \left(\frac{\delta_i^j - \left| z_i^* - z^{SF_j} \right|}{\sigma_i^k} \right)$$

$$P \leq \left[G \left(\frac{\delta_i^j - \left| z_i^* - z^{SF_j} \right|}{\sigma_i^k} \right) * 2 \right] - 1$$

Dans le cas d'une estimation multivariable par le modèle des résidus, la condition sur la probabilité s'écrit :

$$P \leq \left[G \left(\frac{\delta_i^j - \left(\left| r_i^* - r^{SF_j} + f_i - f^{SF_j} \right| \right)}{\sigma_i^k} \right) * 2 \right] - 1$$

Et si on prend en compte les similarités de milieux :

$$P \leq \left[G \left(\frac{\delta_i^j - \left(|r_i^* - r^{SF_j}| + |f_i - f^{SF_j}| \right)}{\sigma_i^k} \right) * 2 \right] - 1$$

Annexe 7 : ROUEN - Application de la méthode de cokrigage pour l'estimation de la moyenne annuelle de 2005 de la concentration de NO2

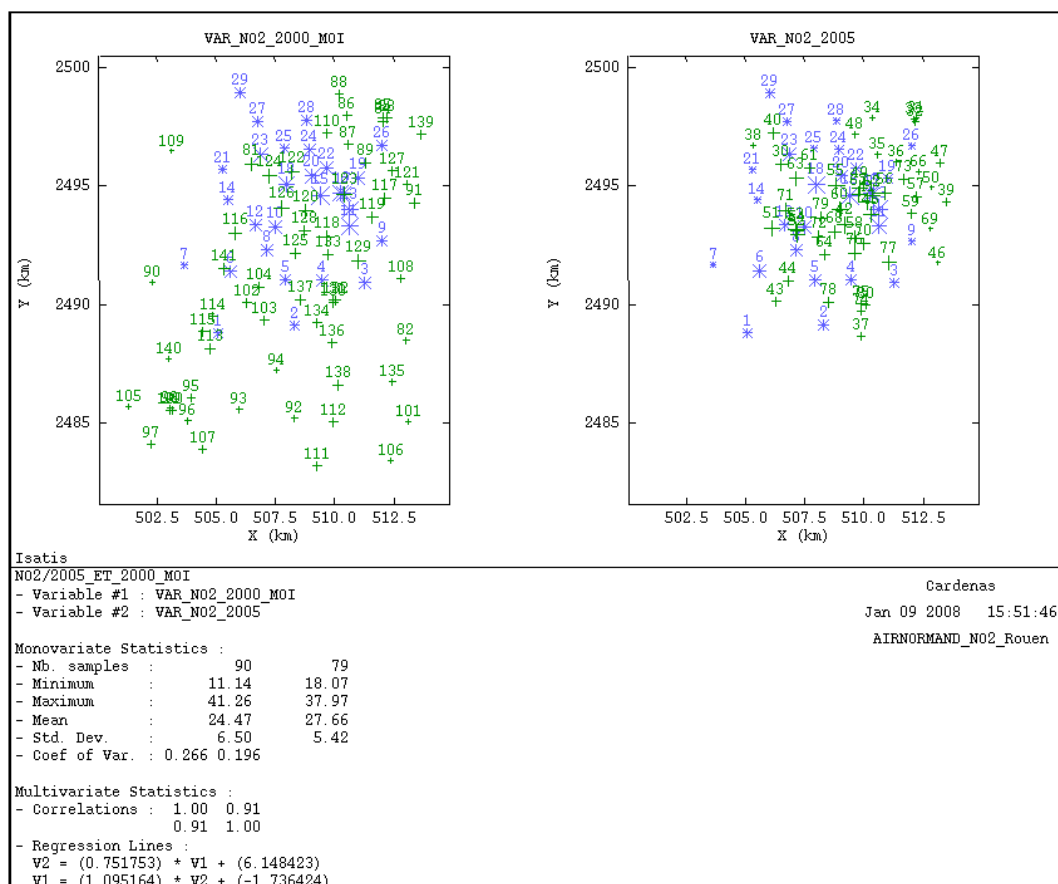


Figure 30 : ROUEN - Localisation des tubes passifs, campagnes de 2000 et 2005

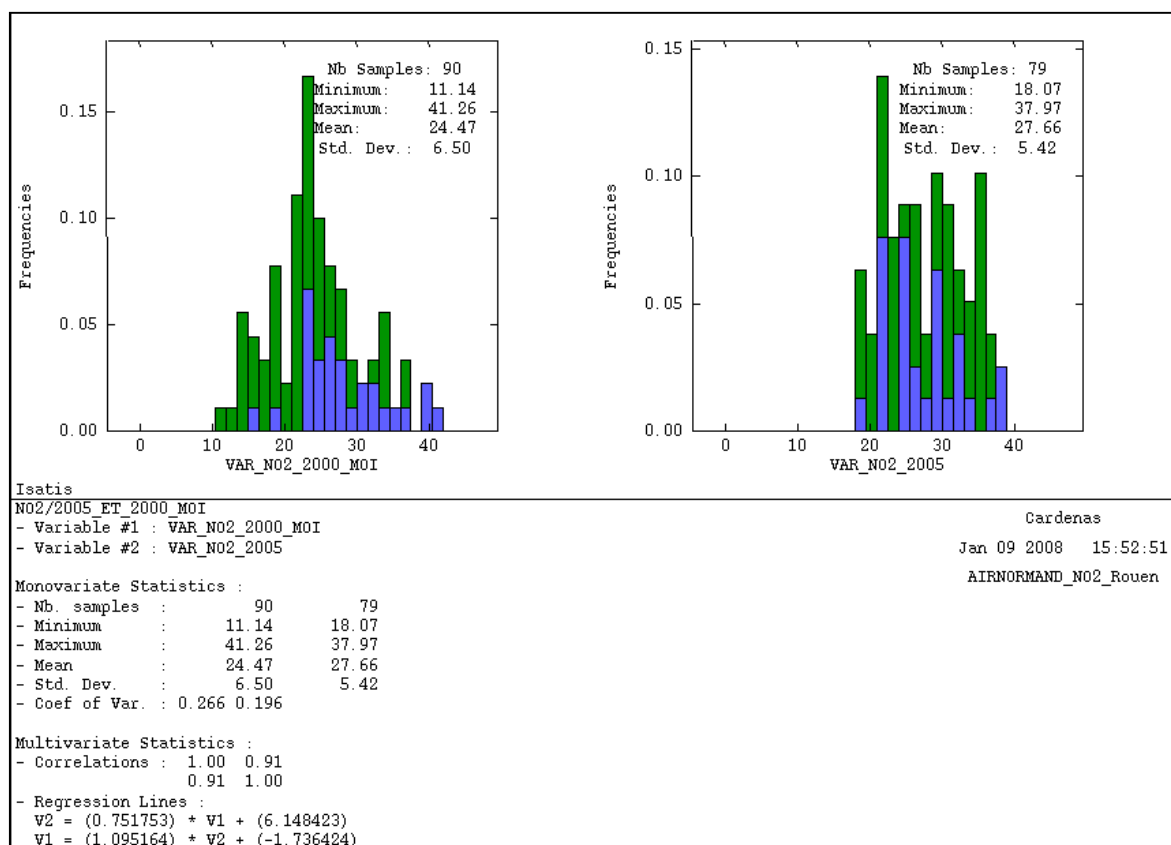


Figure 31 : ROUEN – Statistiques de la moyenne annuelle des campagnes de 2000 et 2005

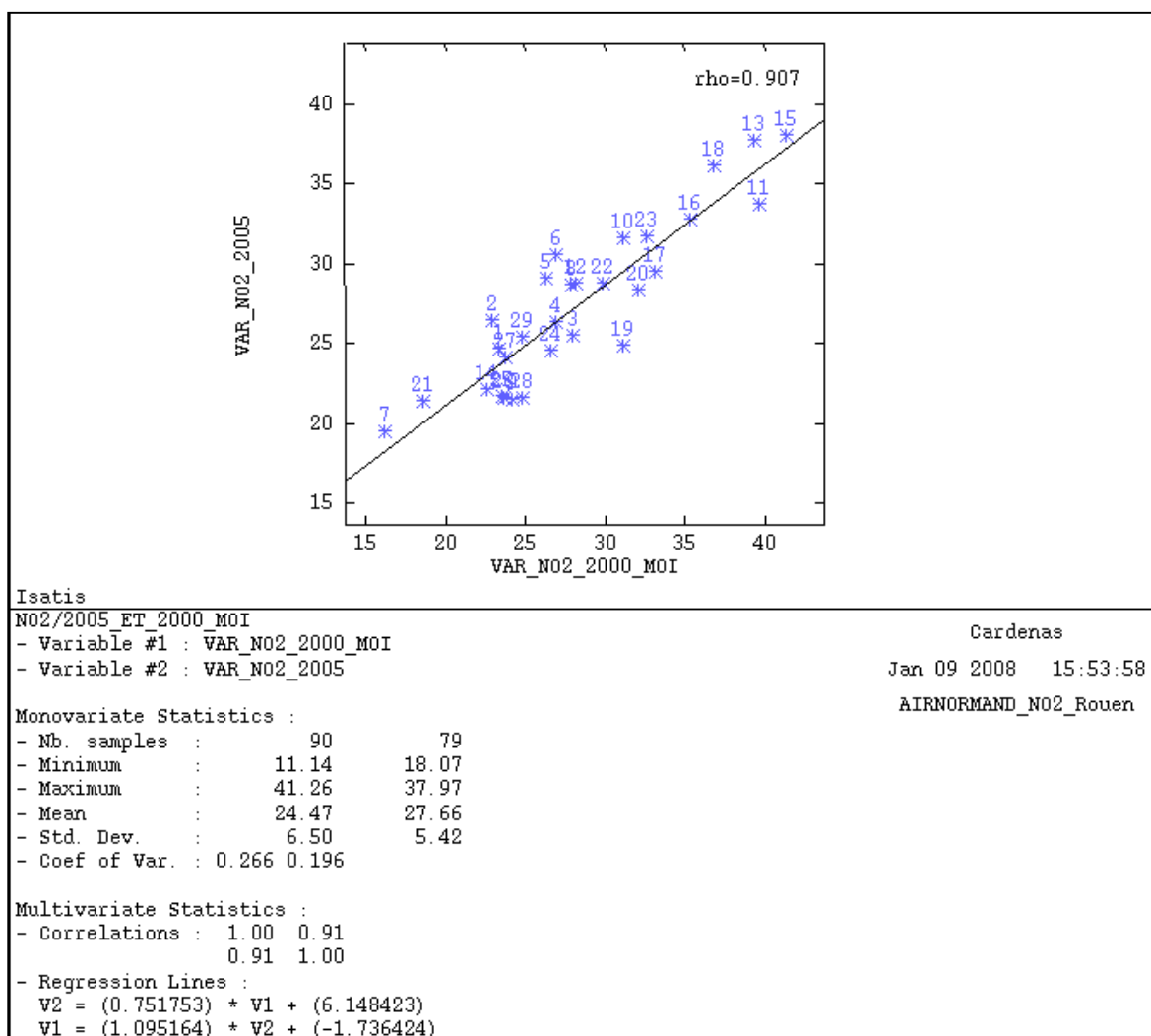
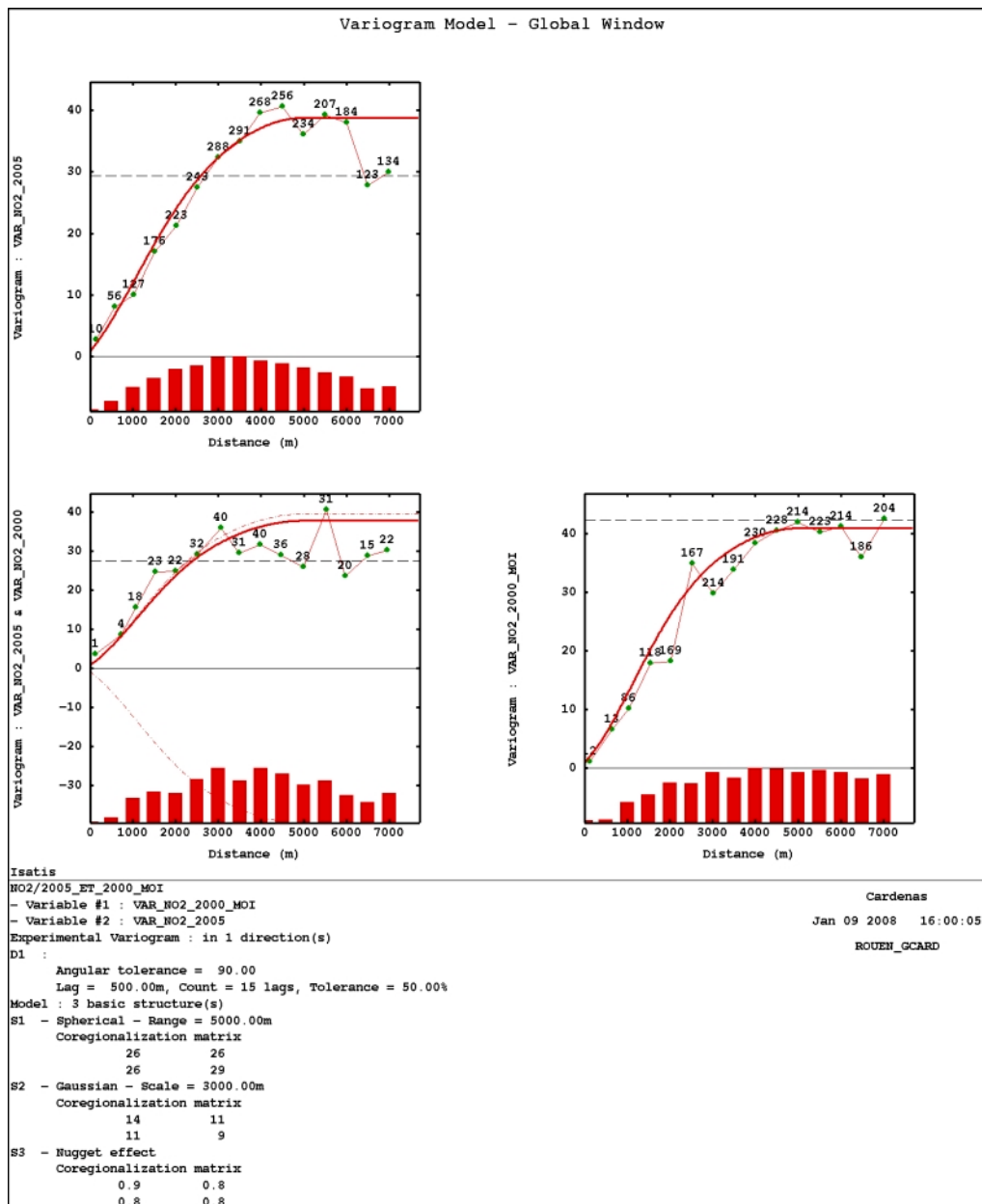


Figure 32 : ROUEN – Nuage de corrélation entre les moyennes annuelles de campagnes de 2000 et 2005



La méthode présentée dans l'Annexe 5 pour calculer le rayon maximal d'influence d'une mesure consiste, dans ce cas, à chercher graphiquement la distance h pour laquelle le variogramme est égale²⁴ à (38.8×0.29) , c'est-à-dire la valeur $\gamma^- (11.36)$. Sur le modèle des concentrations de l'année 2005, cette distance est de 940m.

Figure 33 : ROUEN – Modèle de variogramme croisé entre les campagnes de 2000 et 2005

²⁴ La somme de paliers du modèle, est égale à 38.8, cette valeur correspond à la covariance $C(0)$ de l'expression présentée dans l'Annexe 5.

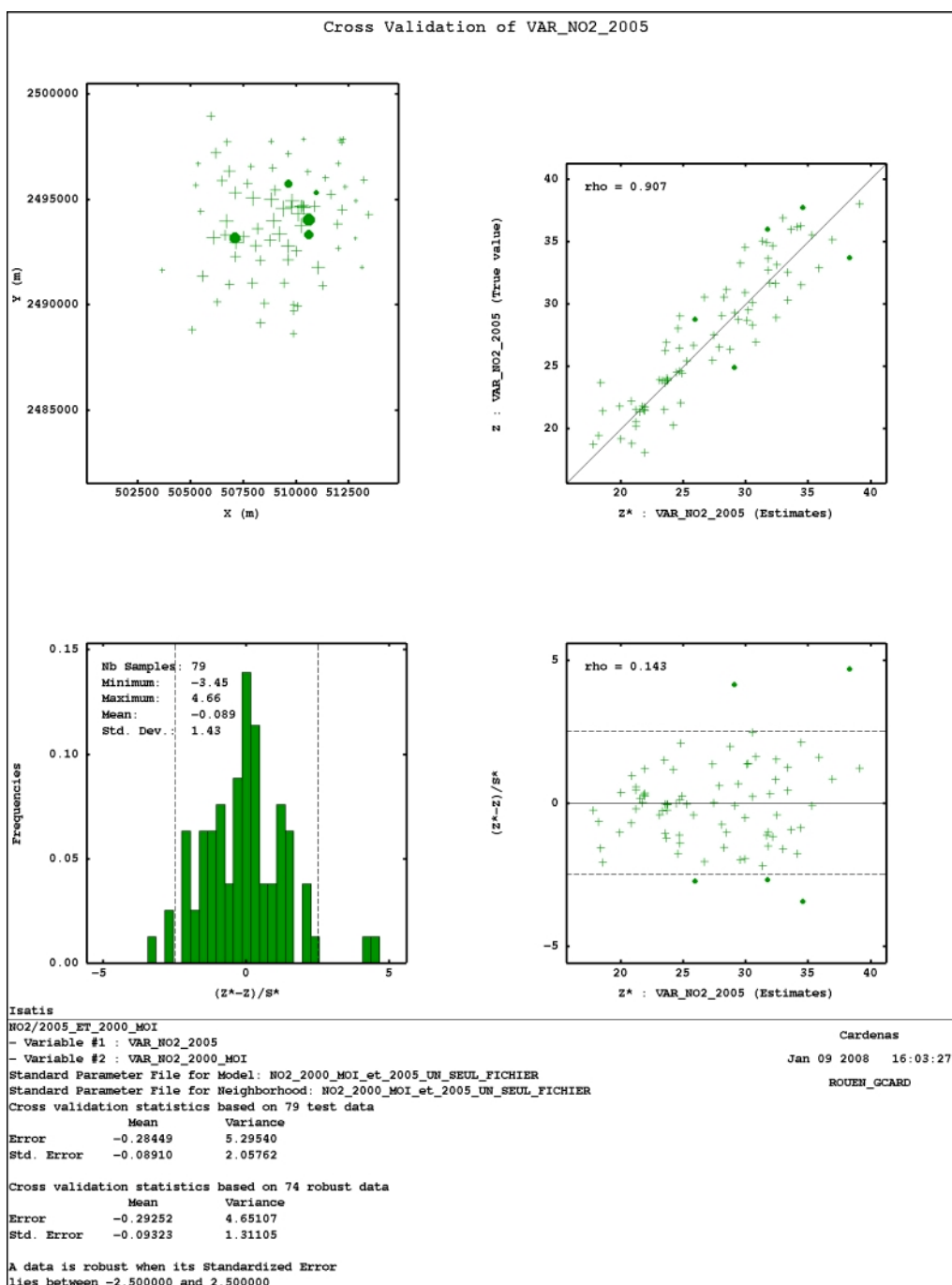


Figure 34 : ROUEN – Validation croisée pour la moyenne 2005 du model de variogramme ajusté entre les campagnes de 2000 et 2005

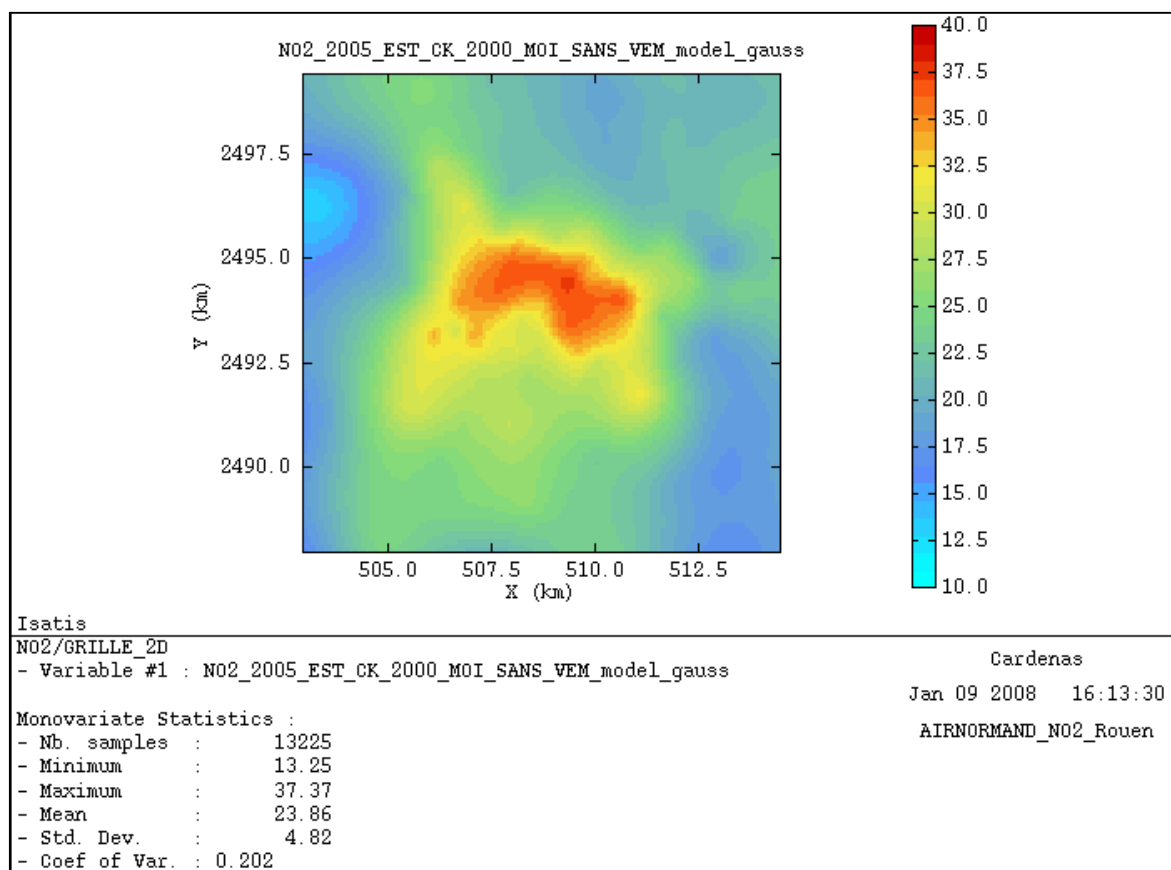


Figure 35 : ROUEN – Carte d'estimation de la moyenne 2005 de NO₂

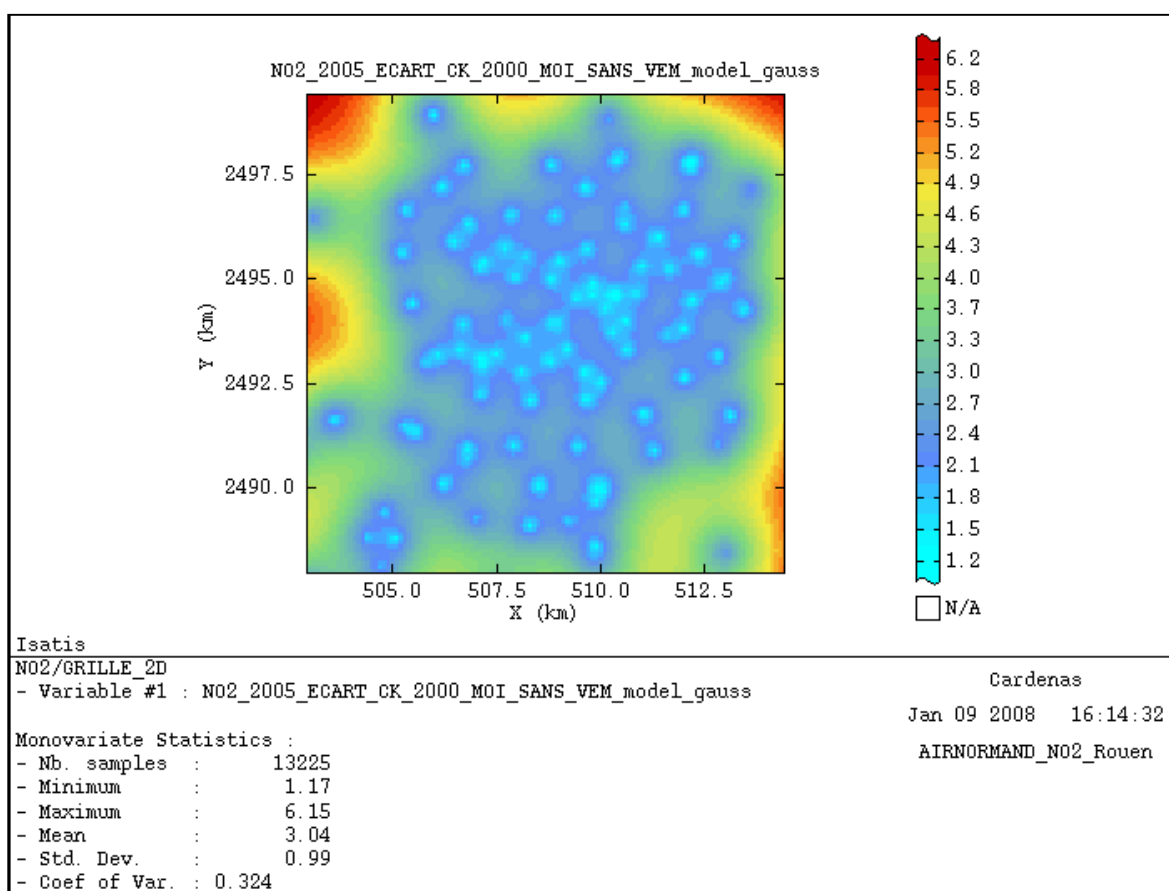


Figure 36 : ROUEN – Carte de l'écart - type d'estimation de la moyenne 2005 de NO₂

Annexe 8 : ROUEN – Méthode EMD, Cartes des écarts

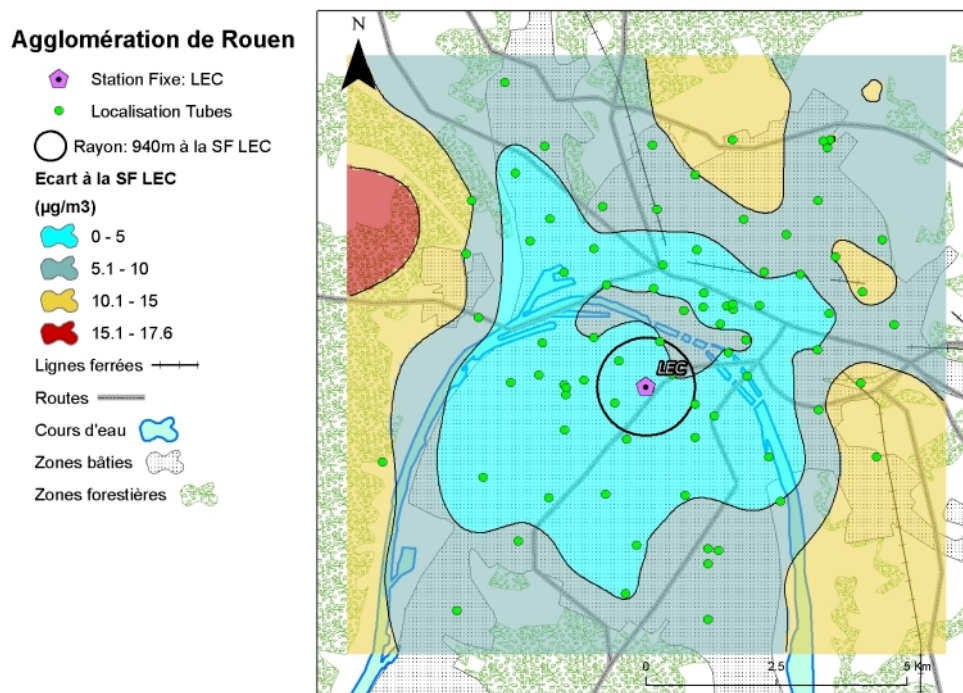


Figure 37 : ROUEN : Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe LEC ($30.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

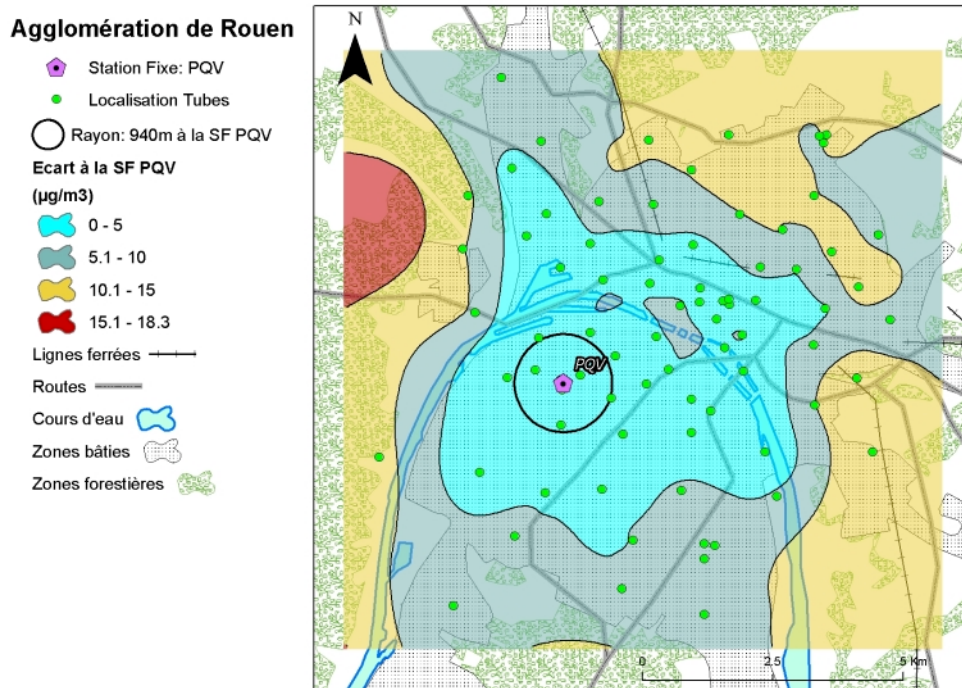


Figure 38 : ROUEN : Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe PQV ($31.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

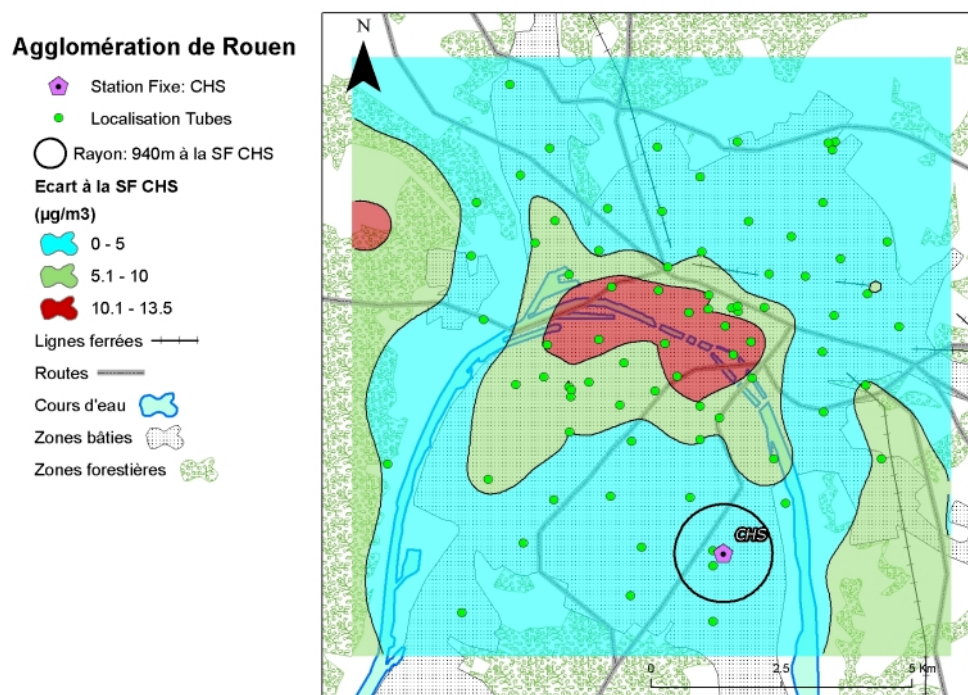


Figure 39 : ROUEN : Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe CHS ($23.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

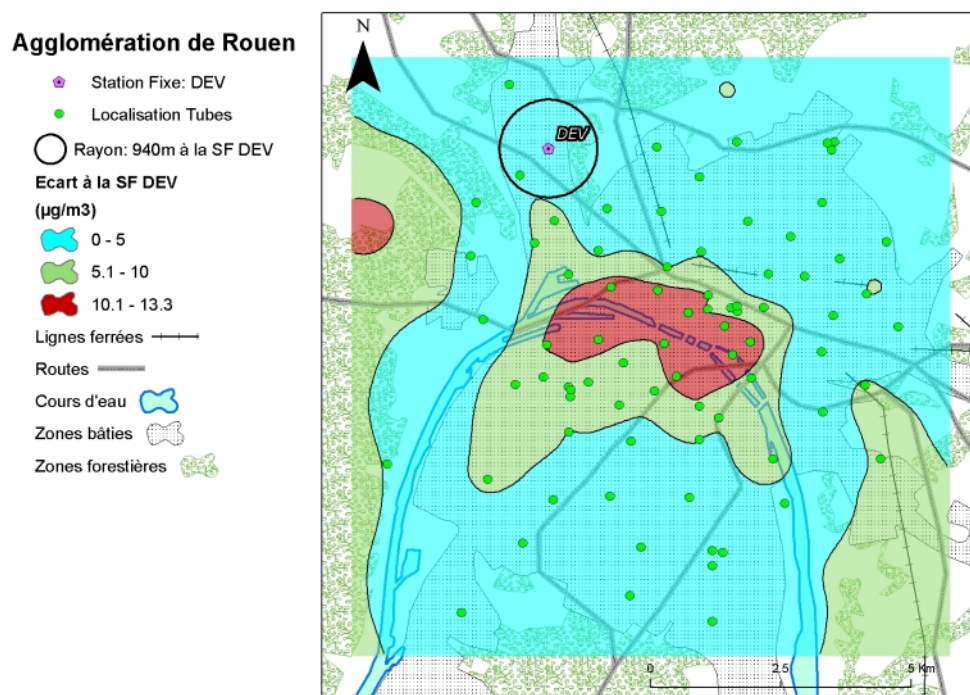


Figure 40 : ROUEN : Carte de l'écart maximal entre la concentration estimée et celle de la station fixe DEV ($24.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Annexe 9 : ROUEN - Cartes des probabilités maximales pour un écart $\leq 5\mu\text{g}/\text{m}^3$

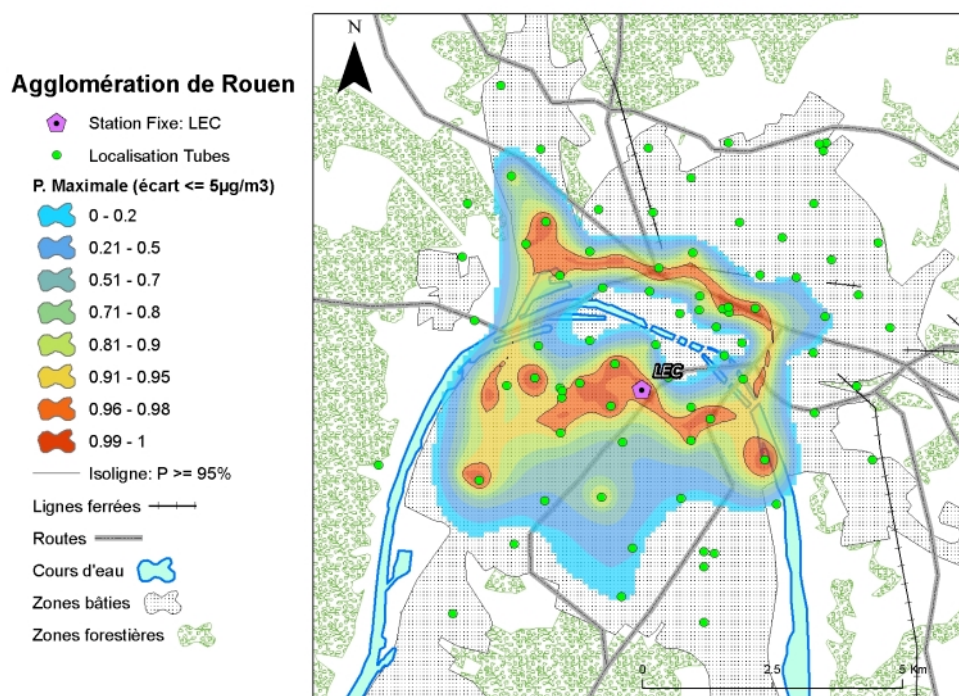


Figure 41 : ROUEN - SF LEC : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 35.9 et 25.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

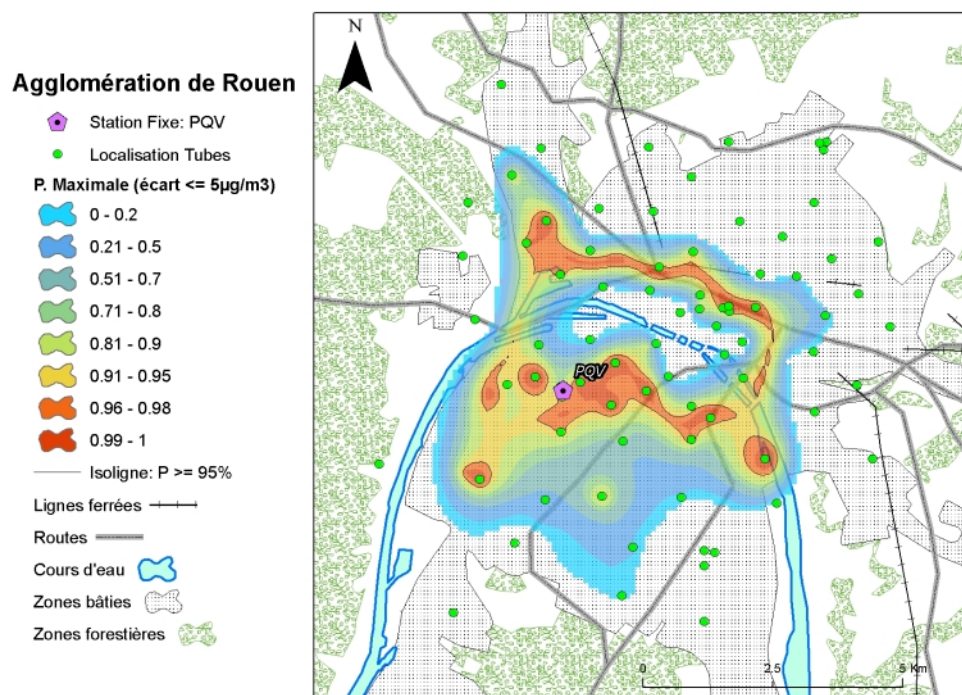


Figure 42 : ROUEN - SF PQV : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 36.6 et 26.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

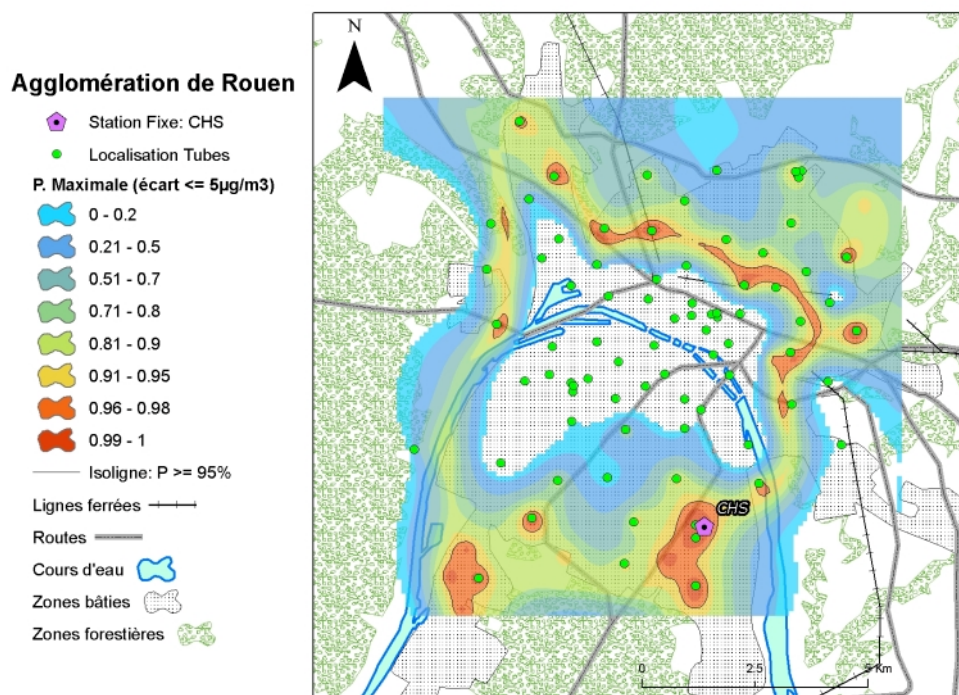


Figure 43 : ROUEN - SF CHS : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 28.89 et 18.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

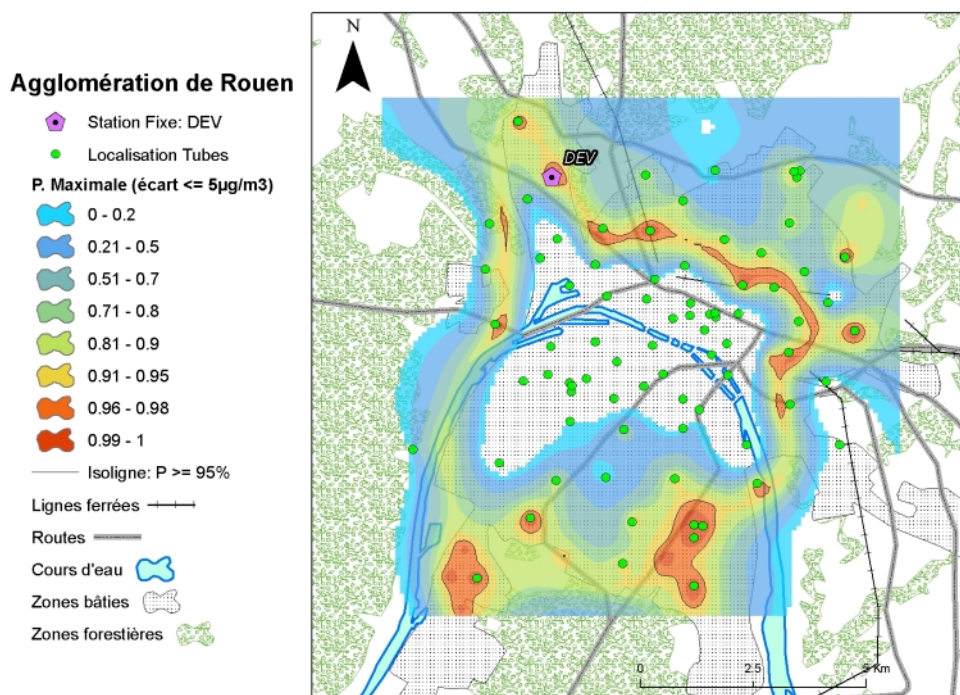


Figure 44 : ROUEN - SF DEV : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 29.02 et 19.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Annexe 10 : ROUEN - Cartes des écarts maximaux pour une $P \leq 95\%$

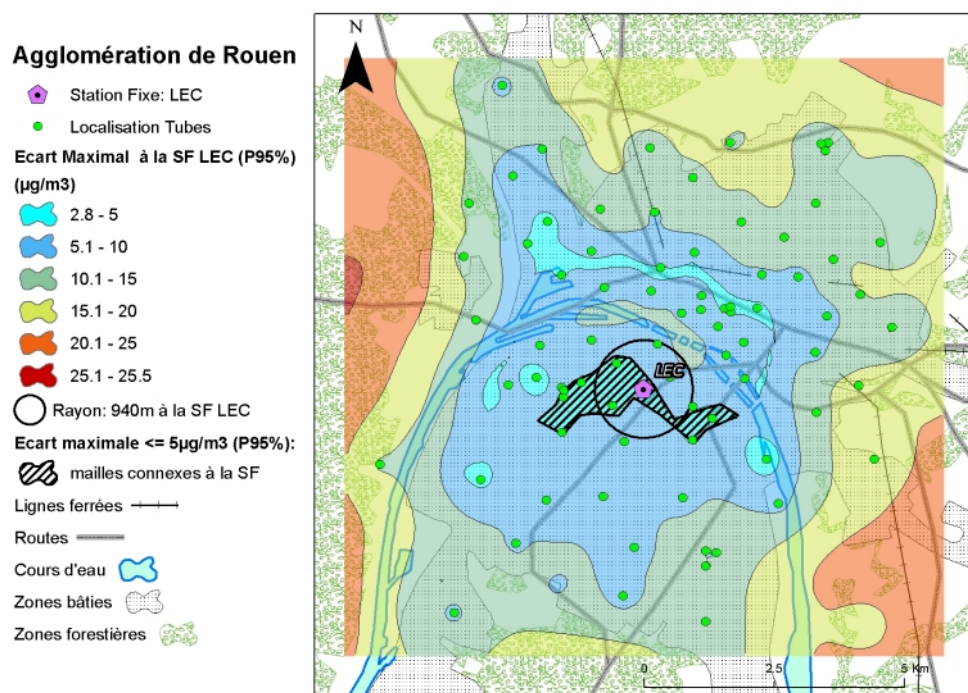


Figure 45 : ROUEN : Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe LEC ($30.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 95%

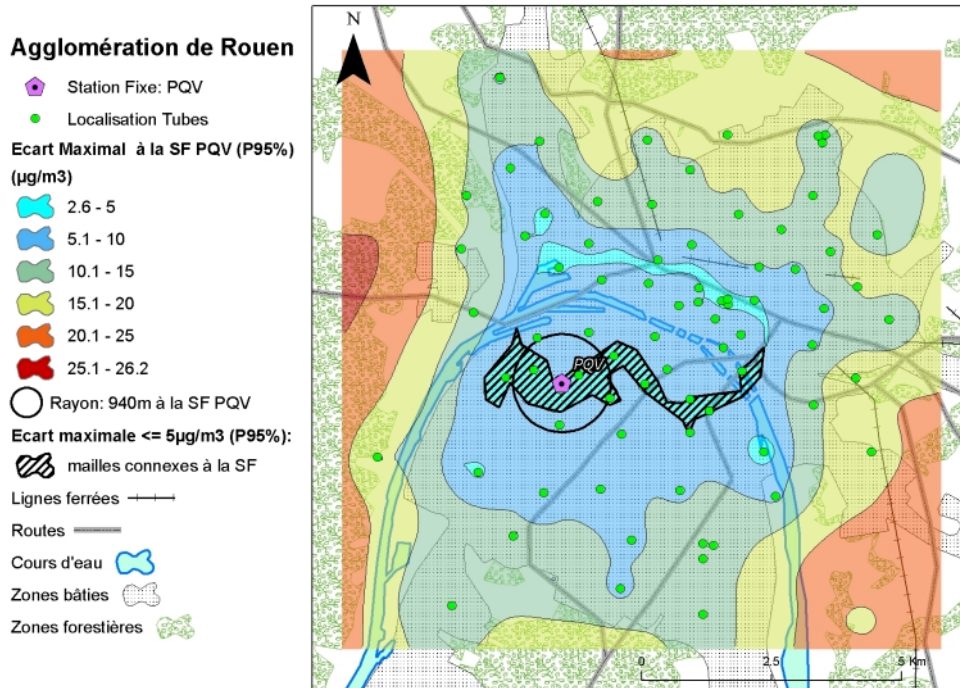


Figure 46 : ROUEN : Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe PQV ($31.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 95%

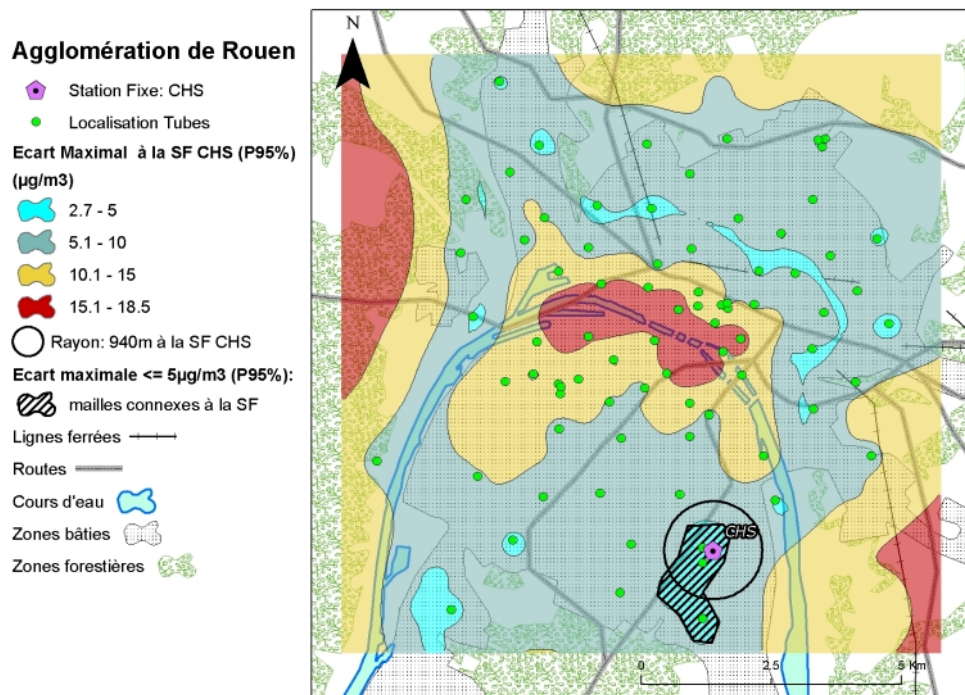


Figure 47 : ROUEN : Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe CHS ($23.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 95%

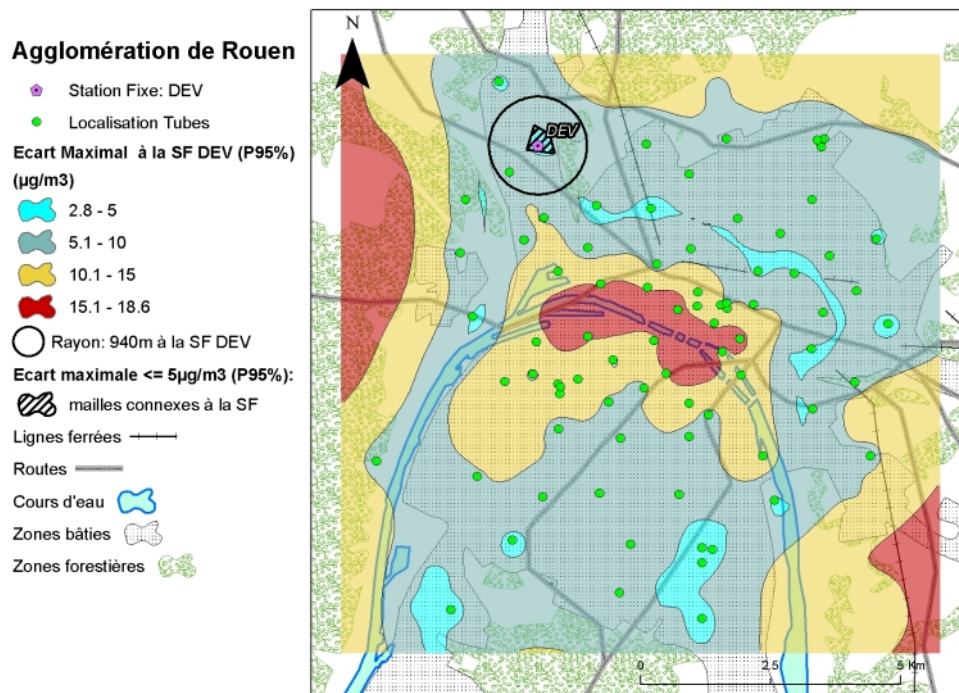


Figure 48 : ROUEN : Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe DEV ($24.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 95%

*Annexe 11 : LILLE - Application de la méthode de cokrigage temporel pour
l'estimation de la moyenne annuelle de l'année 2003-2004 de la
concentration de NO₂*

Rappel de la définition du krigage temporelle : la moyenne annuelle du NO₂ est calculée en prenant la moyenne des estimations obtenues par le cokrigage entre la moyenne de la saison hivernale et la moyenne de la saison estivale. Voici, la démonstration mathématique de cette méthode :

$$\begin{aligned}
 z_{AN}^* &= \sum (\lambda_h z_h) + \sum (\lambda_e z_e) \\
 E(z_{AN}^*) &= E\left[\sum (\lambda_h z_h) + \sum (\lambda_e z_e)\right] \\
 E\left(\frac{z_h^* + z_e^*}{2}\right) &= E\left[\sum (\lambda_h z_h)\right] + E\left[\sum (\lambda_e z_e)\right] \\
 \text{si : } E(z_h^*) &= m_h \quad \text{et} \quad E(z_e^*) = m_e, \quad \text{alors :} \\
 \left(\frac{1}{2}m_h + \frac{1}{2}m_e\right) &= E\left[\sum (\lambda_h z_h)\right] + E\left[\sum (\lambda_e z_e)\right] \\
 \text{comme : } E(z_h) &= E(z_h^*) = m_h \quad \text{et} \quad E(z_e) = E(z_e^*) = m_e, \quad \text{alors :} \\
 \left(\frac{1}{2}m_h + \frac{1}{2}m_e\right) &= \sum (\lambda_h) * m_h + \sum (\lambda_e) * m_e \\
 m_h \left(\frac{1}{2} - \sum (\lambda_h)\right) &+ m_e \left(\frac{1}{2} - \sum (\lambda_e)\right) = 0
 \end{aligned}$$

Une solution suffisante mais pas nécessaire de cette égalité est :

$$\Rightarrow \sum (\lambda_h) = \frac{1}{2} \quad \text{et} \quad \sum (\lambda_e) = \frac{1}{2}$$

En conséquence :

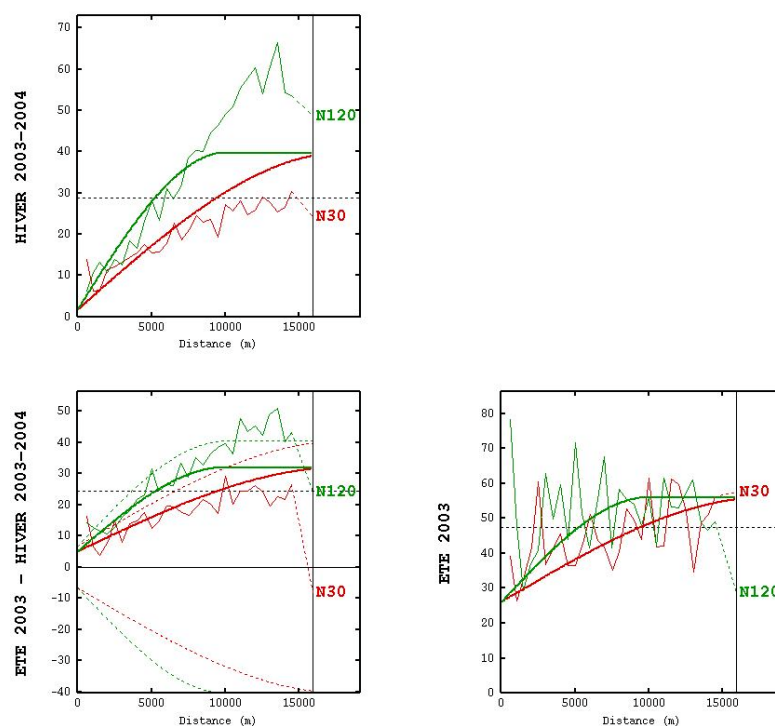
$$\begin{aligned}
 z_{AN}^* &= \sum (\lambda_h z_h) + \sum (\lambda_e z_e) \\
 \text{avec : } \sum (\lambda_h) &= \sum (\lambda_e) = \frac{1}{2}
 \end{aligned}$$

Expression pour le calcul de l'écart - type d'estimation :

$$\begin{aligned}
 Var(e) &= E(e^2) = E\left[(z_{AN} - z_{AN}^*)^2\right] \\
 Var(e) &= E\left\{\left[\frac{1}{2}z_h + \frac{1}{2}z_e - \frac{1}{2}z_h^* - \frac{1}{2}z_e^*\right]^2\right\} \\
 Var(e) &= E\left\{\left[\frac{1}{2}e_e + \frac{1}{2}e_h\right]^2\right\} = \frac{1}{4} * E\{[e_e + e_h]^2\} \\
 Var(e) &= \frac{1}{4} * \{E[(e_e)^2] + E[(e_h)^2] + 2 * cov(e_e, e_h)\} \\
 cov(e_e, e_h) &= 0 \quad \Rightarrow \quad \text{erreurs ind.} \\
 Var(e) &= \frac{1}{4} * [Var(e_e) + Var(e_h)] \\
 \sigma(e) &= \frac{1}{2} * \sqrt{[\sigma(e_e)]^2 + [\sigma(e_h)]^2}
 \end{aligned}$$

Équation 14 : LILLE - Déduction de l'expression pour le calcul de l'écart - type d'estimation de la moyenne annuelle

Dans la pratique il faut modéliser le variogramme croisé et effectuer le cokrigage entre les moyennes saisonnières ; la moyenne annuelle est la moyenne des deux estimations résultantes et la variance d'estimation correspond à 25% de la somme des variances des estimations saisonnières. Les résultats sont montrés dans les figures ci-jointes.



Variable	Direction	Structure	Palier	Portée (Km)
Eté 2003	N30°E (Courbe Rouge)	Pépite	26	---
		Sphérique	30	18
	N120 = N60°O (Courbe verte)	Pépite	26	---
		Sphérique	30	10
Hiver 2003-2004	N30°E (Courbe Rouge)	Pépite	1.76	---
		Sphérique	38	18
	N120 = N60°O (Courbe verte)	Pépite	1.76	---
		Sphérique	38	10
Croisée	N30°E (Courbe Rouge)	Pépite	5	---
		Sphérique	27	18
	N120 = N60°O (Courbe verte)	Pépite	5	---
		Sphérique	27	10

La méthode présentée dans l'Annexe 5 pour calculer le rayon maximal d'influence d'une mesure consiste, dans ce cas, à chercher graphiquement la distance « h » pour laquelle le variogramme est égale²⁵ à (32×0.29) , c'est-à-dire dans le modèle croisé, la valeur γ^- (9.6). Comme le phénomène est anisotrope, une ellipse devrait en réalité être employée, mais de façon à simplifier les calculs, il a été décidé de laisser un cercle dont le rayon est de 1040m.

Figure 49 : LILLE - Modèle des variogrammes simples et croisés des moyennes saisonnières

²⁵ La somme de paliers du modèle croisé, est égale à 32, cette valeur correspond à la covariance $C(0)$ de l'expression présentée dans l'Annexe 5.

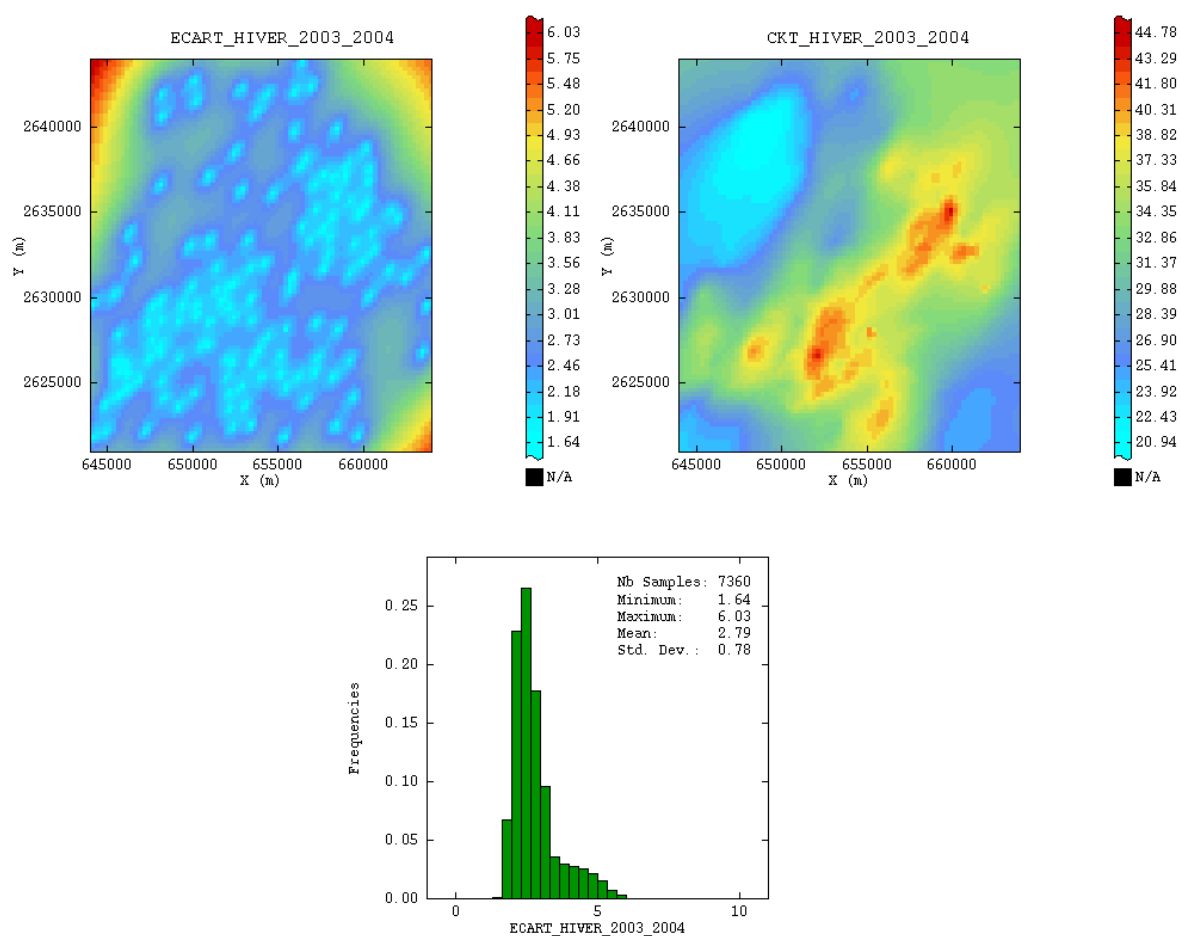


Figure 50 : LILLE - Cartes des estimations et de l'écart - type d'estimation de la moyenne de l'hiver 2003-2004

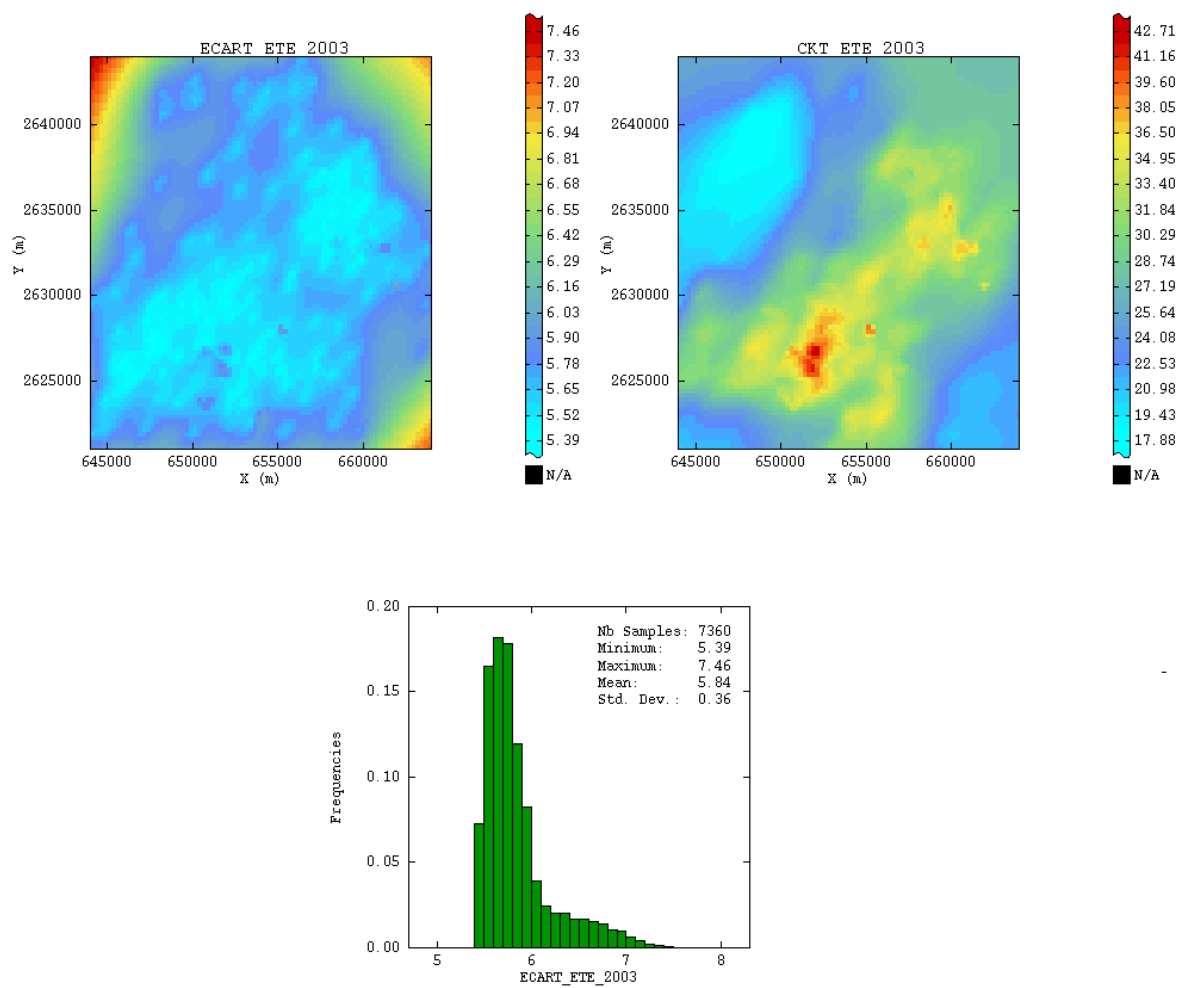


Figure 51 : LILLE - Cartes des estimations et de l'écart - type d'estimation de la moyenne de l'été 2003

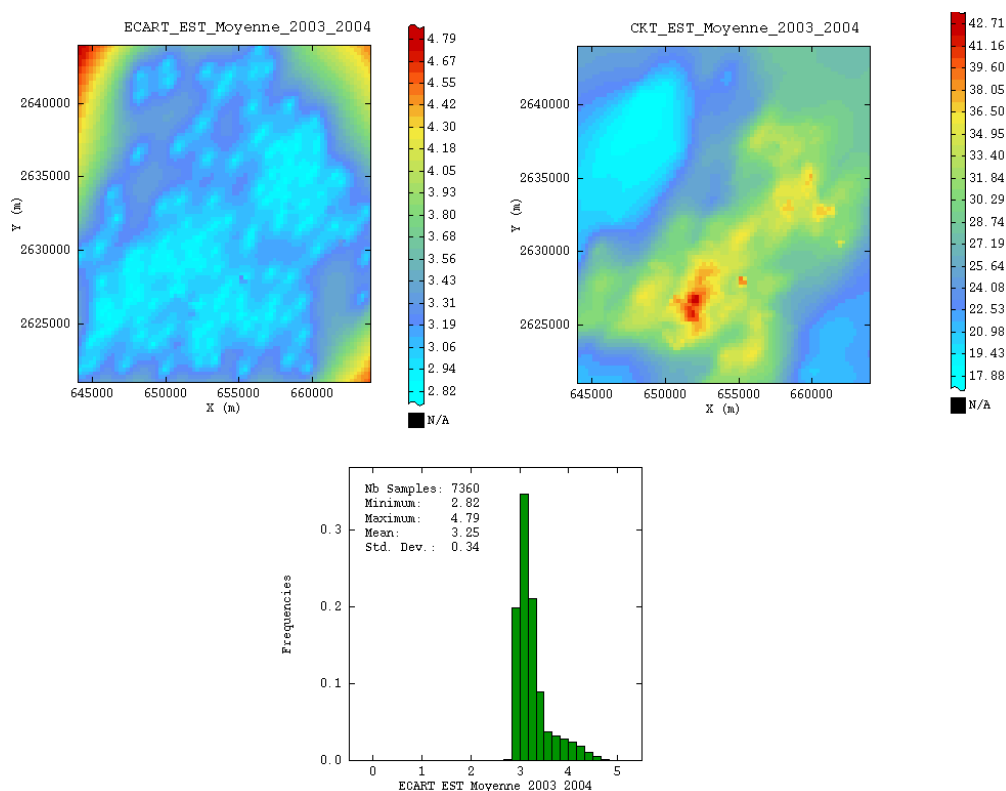


Figure 52 : LILLE - Cartes des estimations et de l'écart - type d'estimation de la moyenne annuelle 2003-2004

Annexe 12 : LILLE – Méthode EMD, Cartes des écarts

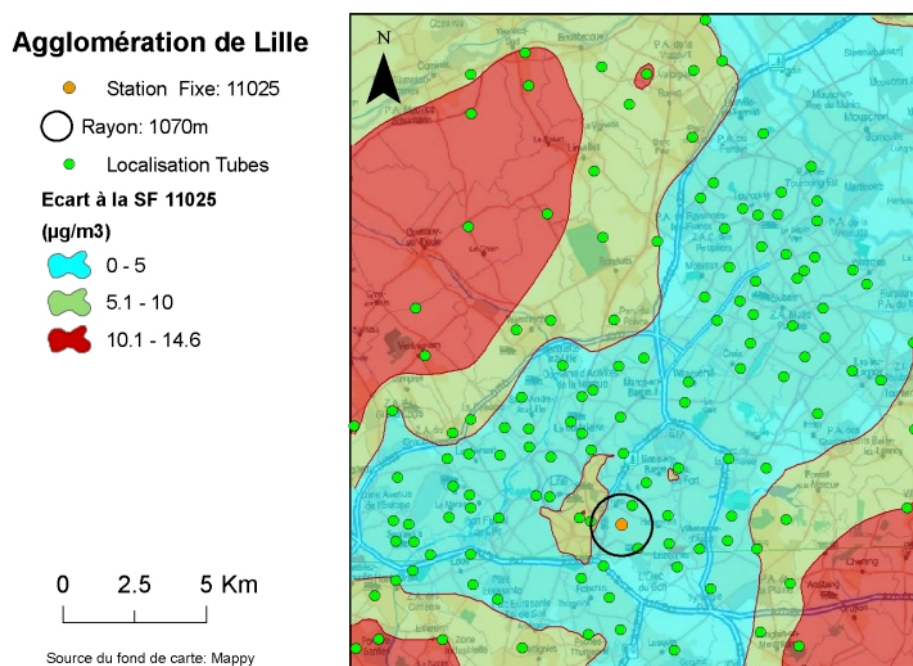


Figure 53 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Lille Five Lakanal ($32.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Agglomération de Lille

● Station Fixe: 11026

○ Rayon: 1070m

● Localisation Tubes

Ecart à la SF 11026

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

0 - 5

5.1 - 10

10.1 - 14.9

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

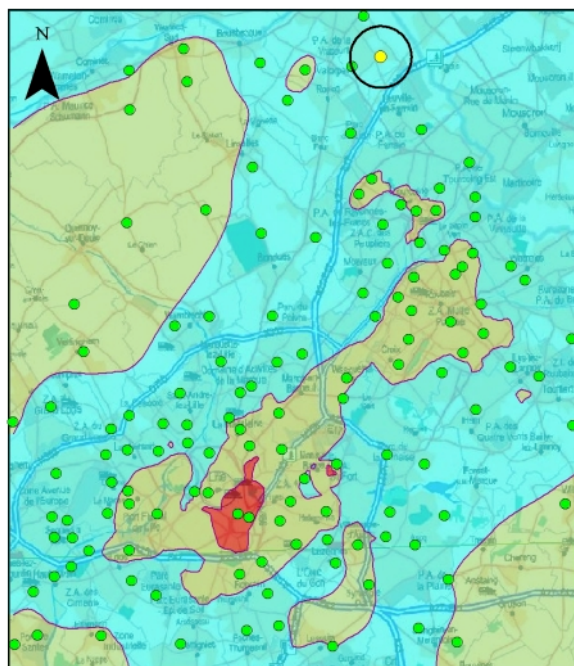


Figure 54 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Halluin Caillaux ($27.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Agglomération de Lille

● Station Fixe: 11033

○ Rayon: 1070m

● Localisation Tubes

Ecart à la SF 11033

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

0 - 5

5.1 - 10

10.1 - 15

15.1 - 16

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

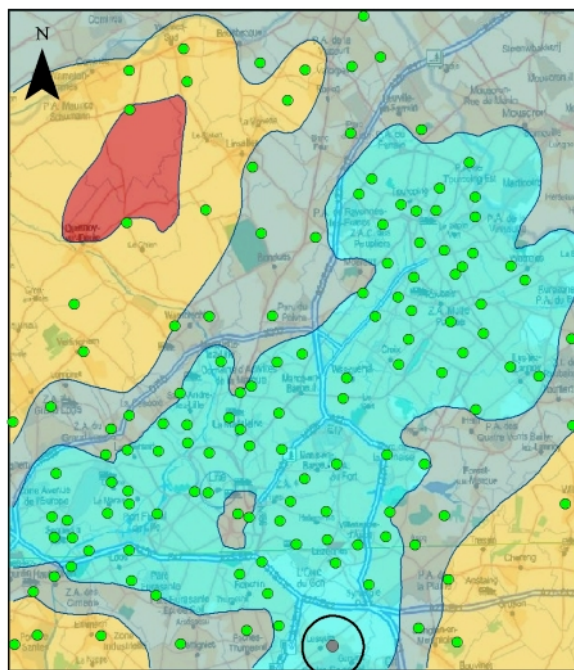


Figure 55 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Lesquin ($33.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Agglomération de Lille

● Station Fixe: 11027

○ Rayon: 1070m

● Localisation Tubes

Ecart à la SF 11027

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

0 - 5

5.1 - 10

10.1 - 14.9

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

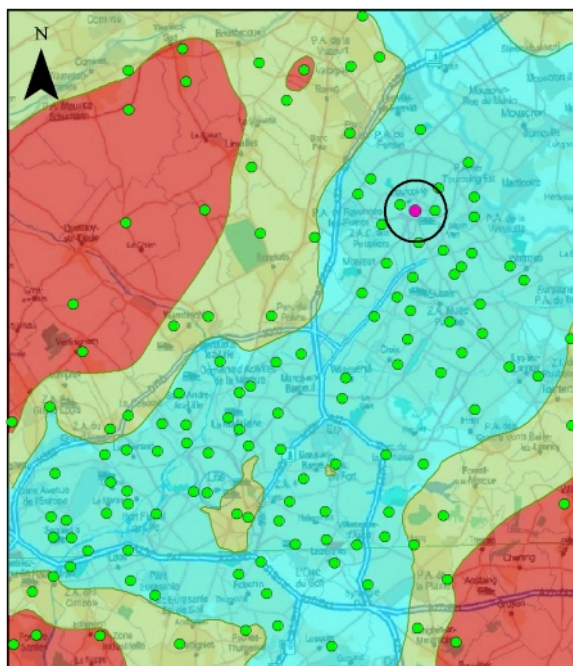


Figure 56 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Tourcoing – Bienfaisance ($32.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Agglomération de Lille

● Station Fixe: 11016

○ Rayon: 1070m

● Localisation Tubes

Ecart à la SF 11016

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

0 - 5

5.1 - 10

10.1 - 14.3

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

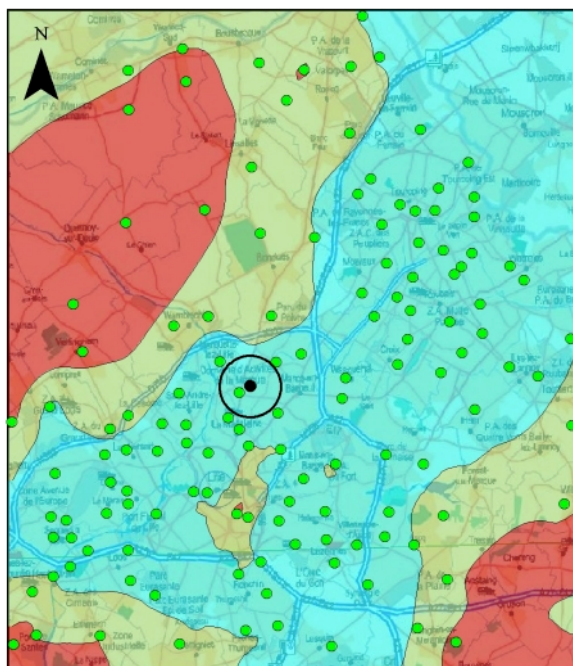


Figure 57 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Marcq - en - Baroeul ($32.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Agglomération de Lille

● Station Fixe: 11029

○ Rayon: 1070m

● Localisation Tubes

Ecart à la SF 11029

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

0 - 5

5.1 - 10

10.1 - 12.7

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

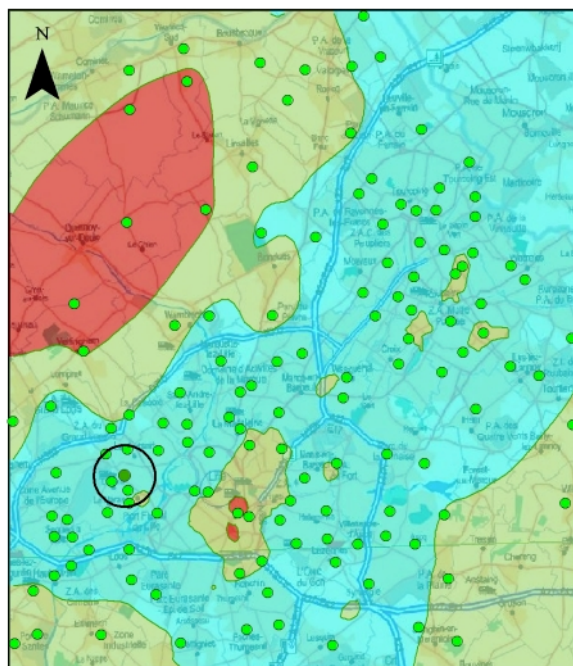


Figure 58 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Lomme ($30.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Agglomération de Lille

● Station Fixe: 11032

○ Rayon: 1070m

● Localisation Tubes

Ecart à la SF 11032

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

0 - 5

5.1 - 10

10.1 - 13.9

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

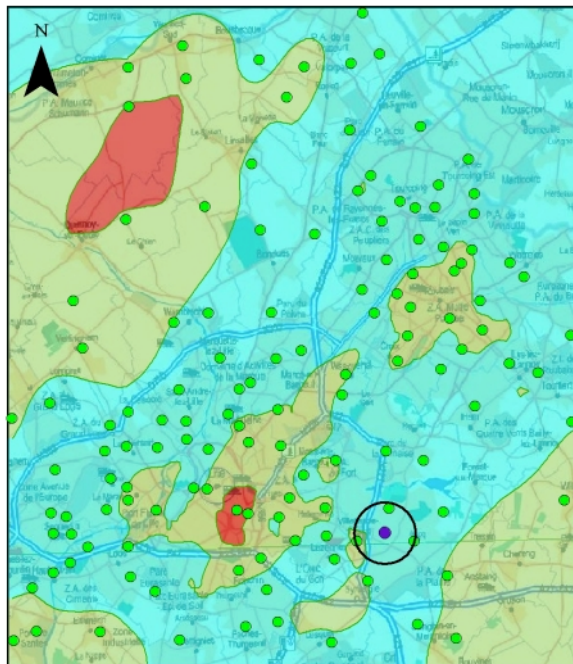


Figure 59 : LILLE - Carte de l'écart entre la concentration estimée et celle de la station fixe Ville d'Ascq Rameau ($28.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Annexe 13 : LILLE - Cartes des probabilités maximales pour un écart $\leq 5\mu\text{g}/\text{m}^3$

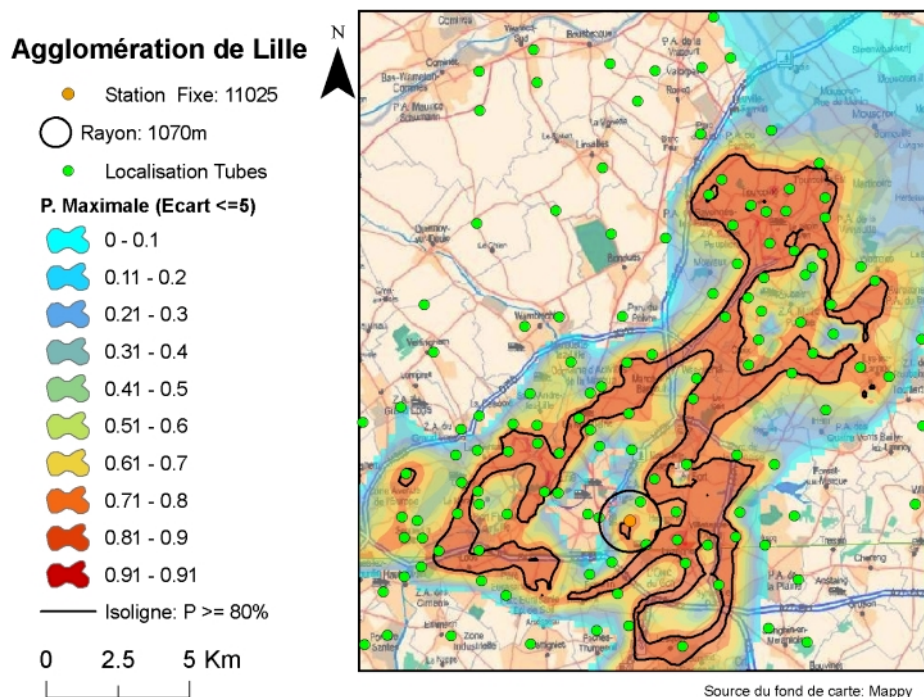


Figure 60 : LILLE – SF Lille Five Lakanal (11025) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 37.47 et 27.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

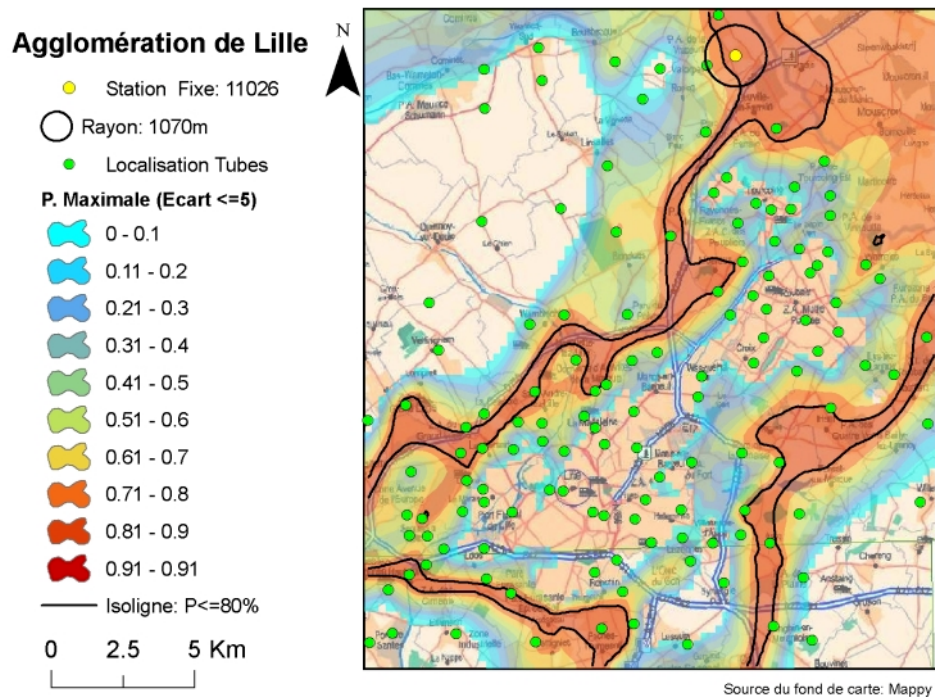


Figure 61 : LILLE – SF Halluin Caillou (11026) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 32.83 et 22.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

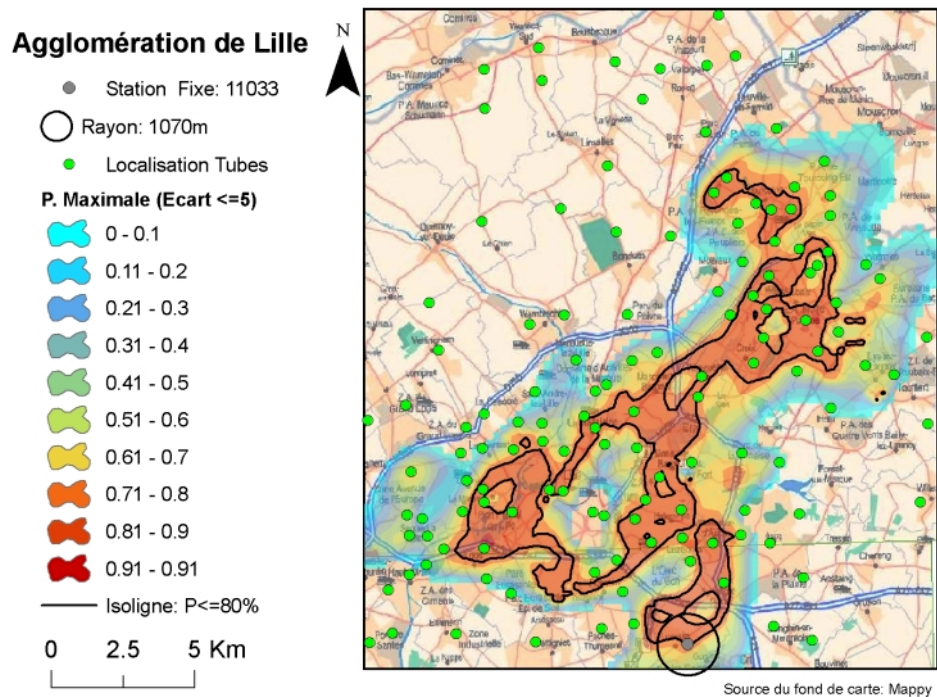


Figure 62 : LILLE – SF Lesquin (11033) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 38.90 et 28.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

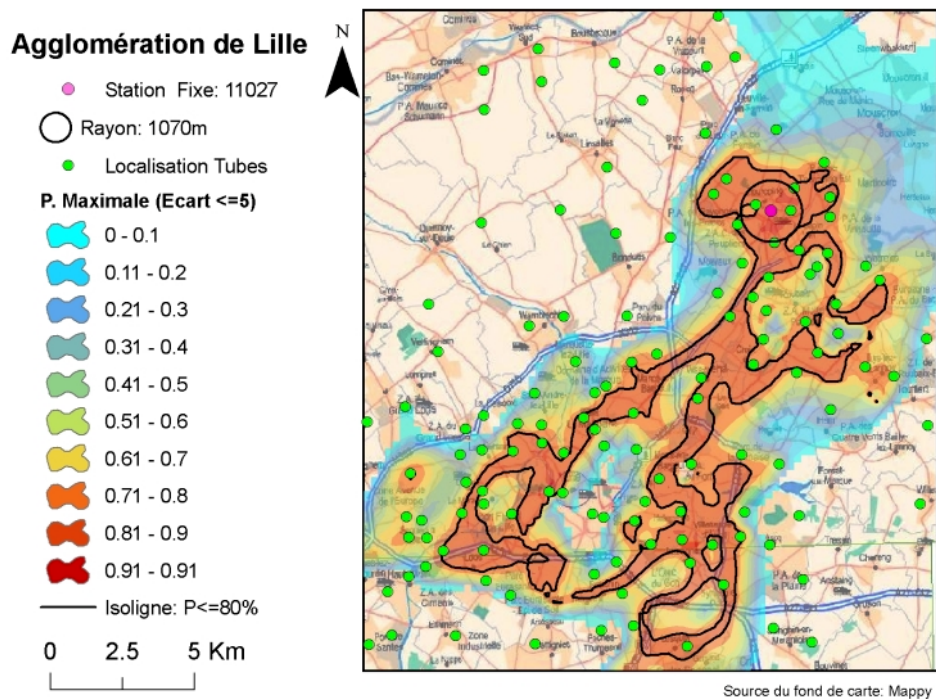


Figure 63 : LILLE – SF Tourcoing – Bienfaisance (11027) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 37.78 et 27.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

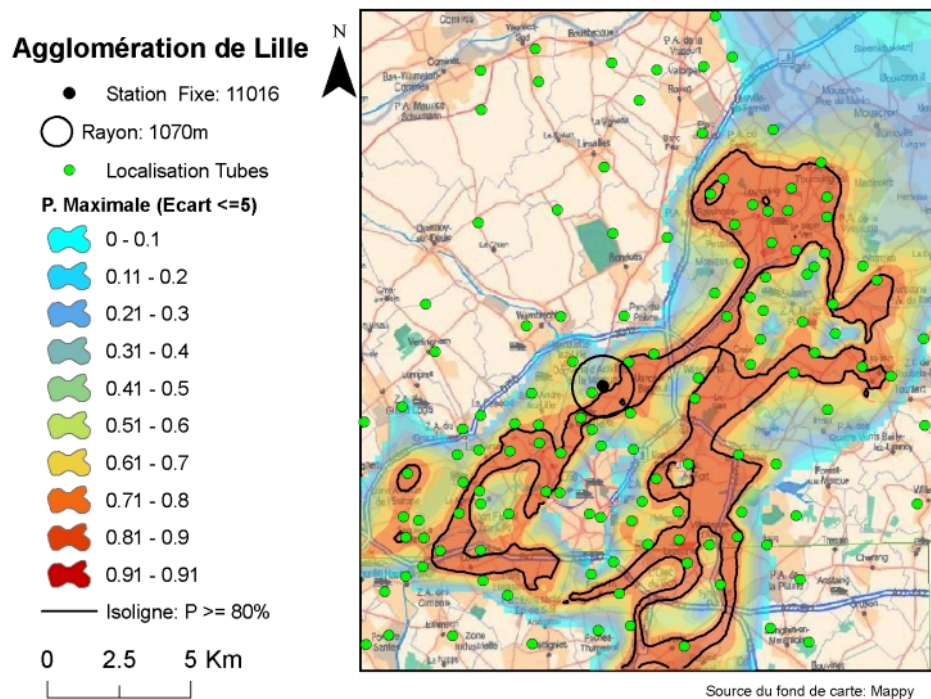


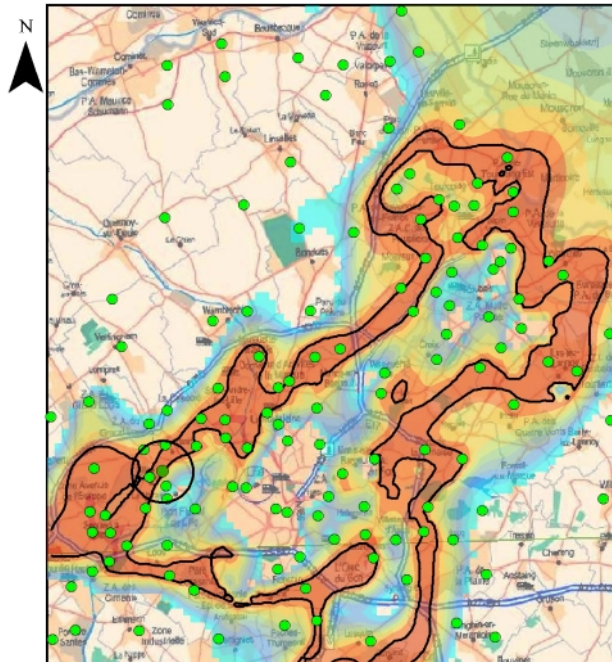
Figure 64 : LILLE – SF Marcq - en - Baroeul (11016) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 37.18 et 27.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Agglomération de Lille

- Station Fixe: 11029
- Rayon: 1070m
- Localisation Tubes
- P. Maximale (Ecart <=5)**
- 0 - 0.1
- 0.11 - 0.2
- 0.21 - 0.3
- 0.31 - 0.4
- 0.41 - 0.5
- 0.51 - 0.6
- 0.61 - 0.7
- 0.71 - 0.8
- 0.81 - 0.9
- 0.91 - 0.91

— Isoligne: P<=80%

0 2.5 5 Km



Source du fond de carte: Mappy

Figure 65 : LILLE – SF Lomme (11029) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 35.59 et 25.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

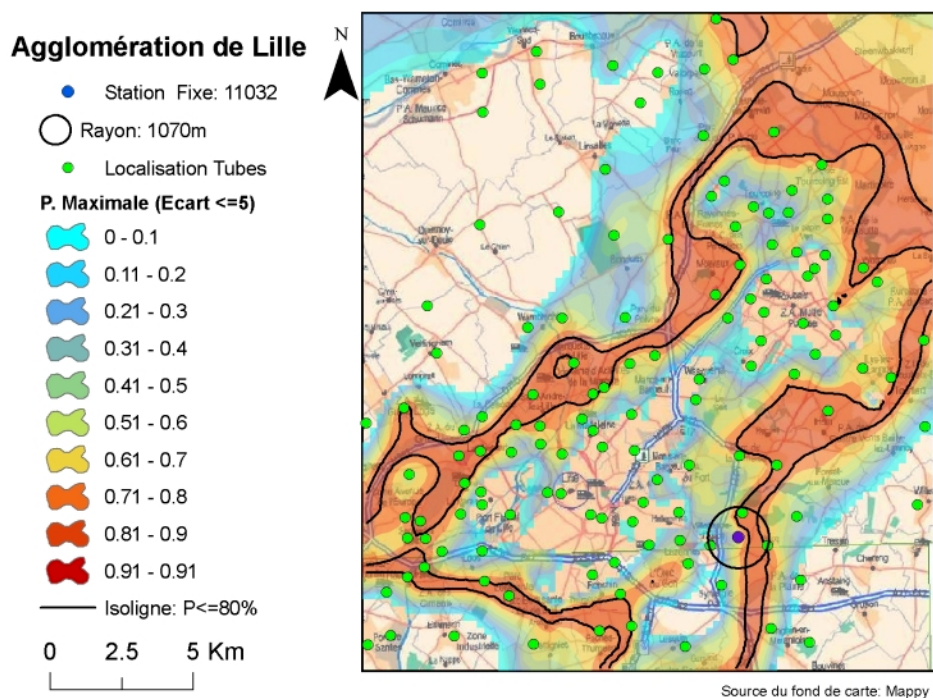


Figure 66 : LILLE – SF Ville d'Ascq Rameau(11032) : Carte de la probabilité maximale pour que les concentrations réelles se trouvent dans un intervalle entre 33.80 et 23.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Annexe 14 : LILLE - Cartes des écarts maximaux pour une probabilité de 90%

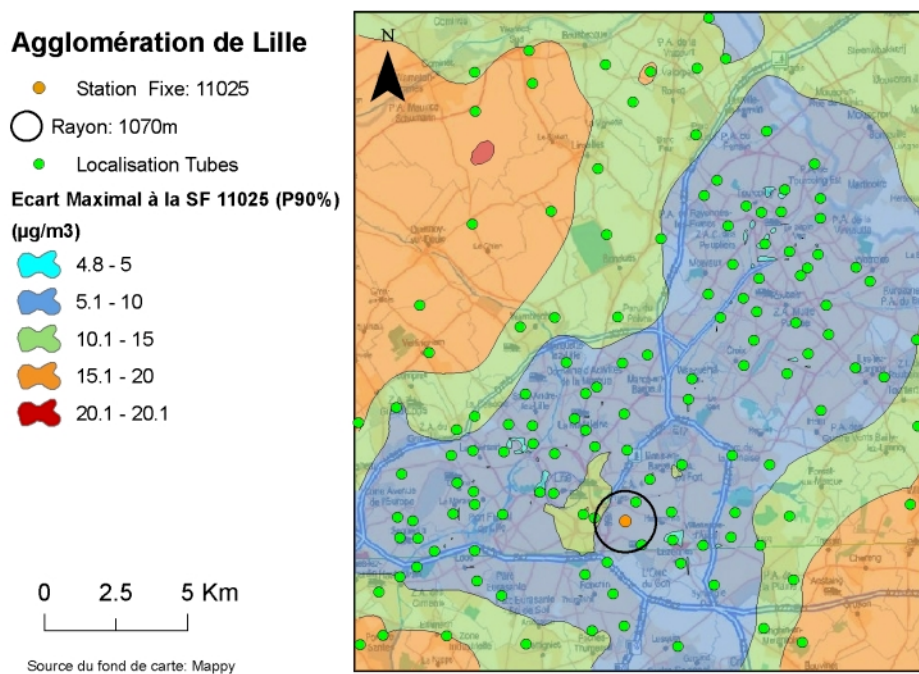


Figure 67 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Lille Five Lakanal ($32.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%

Agglomération de Lille

- Station Fixe: 11026
- Rayon: 1070m
- Localisation Tubes
- Ecart Maximal à la SF 11026 (P90%)**
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- 4.8 - 5
- 5.1 - 10
- 10.1 - 15
- 15.1 - 19.9

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

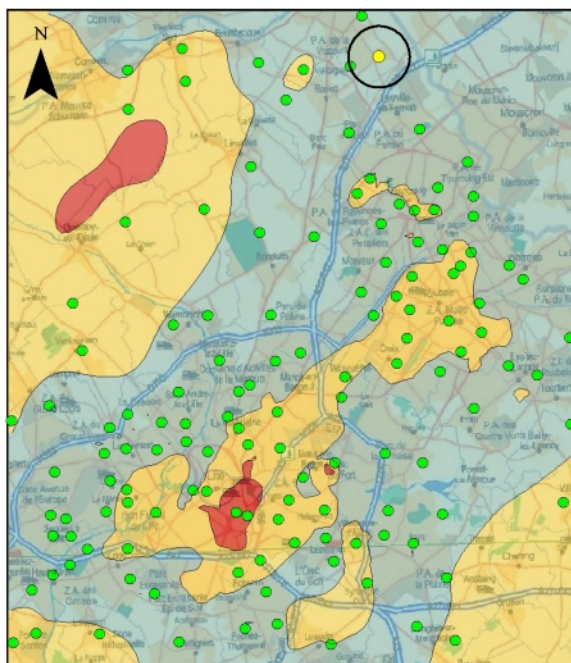


Figure 68 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Halluin Caillaux ($27.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%

Agglomération de Lille

● Station Fixe: 11033

○ Rayon: 1070m

● Localisation Tubes

Ecart Maximal à la SF 11033 (P90%)
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

4.7 - 5

5.1 - 10

10.1 - 15

15.1 - 20

20.1 - 21.5

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

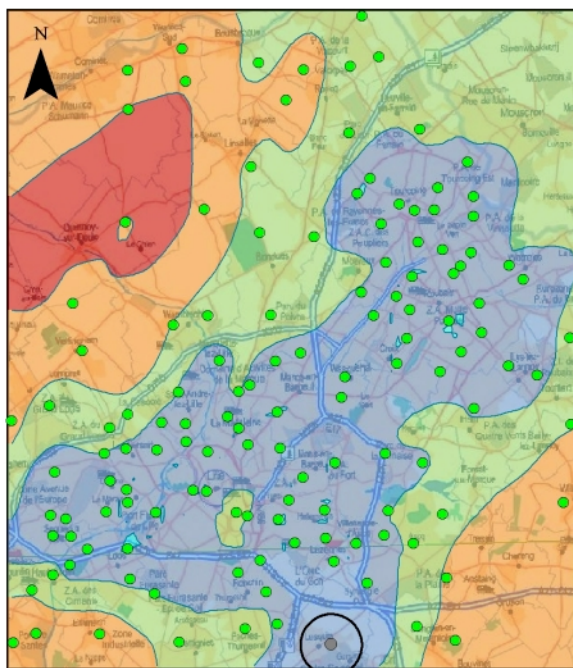


Figure 69 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Lesquin ($33.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%

Agglomération de Lille

● Station Fixe: 11027

○ Rayon: 1070m

● Localisation Tubes

Ecart Maximal à la SF 11027 (P90%)
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

4.8 - 5

5.1 - 10

10.1 - 15

15.1 - 20

20.1 - 20.4

0 2.5 5 Km

Source du fond de carte: Mappy

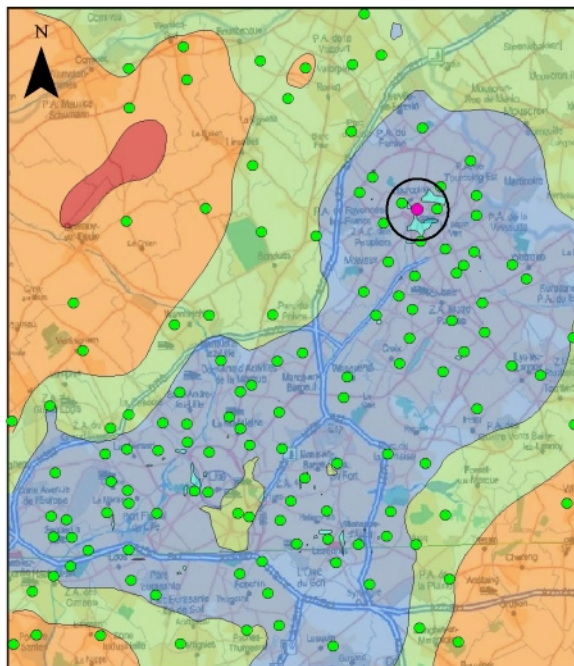


Figure 70 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Tourcoing – Bienfaisance ($32.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%

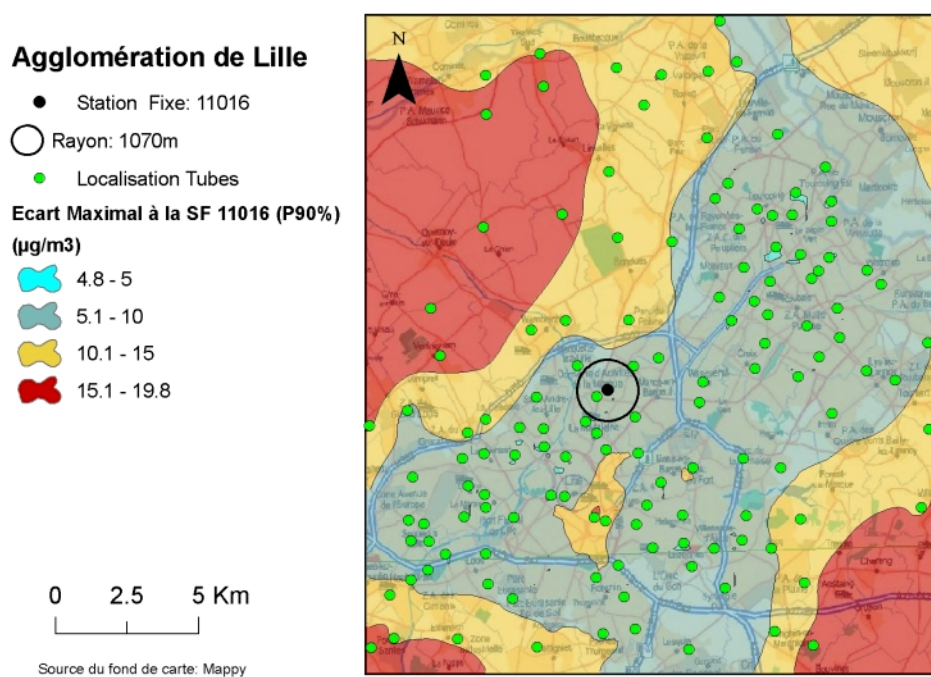


Figure 71 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Marcq - en - Baroeul ($32.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%

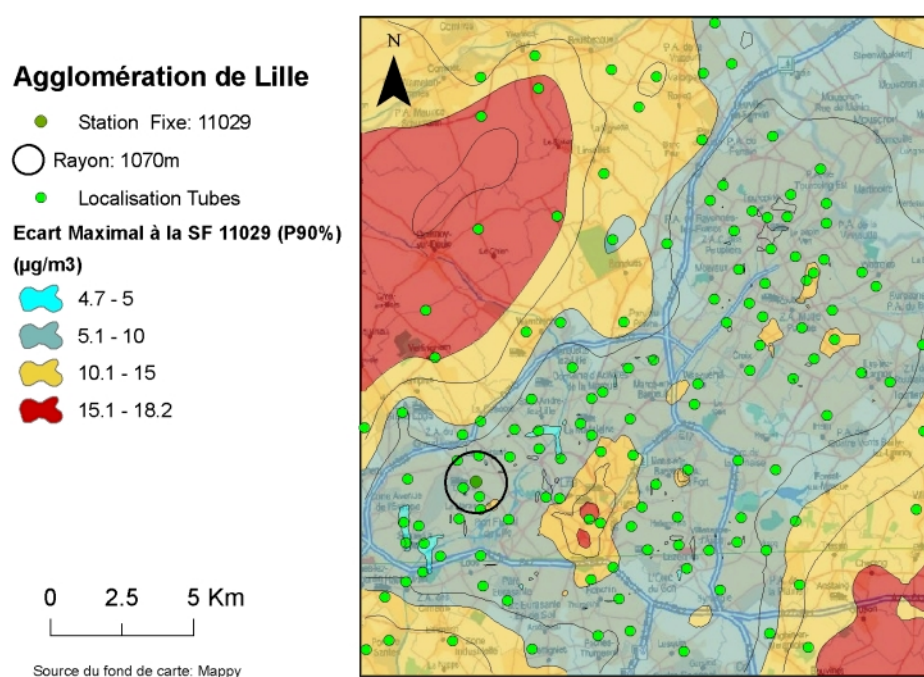


Figure 72 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Lomme ($30.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%

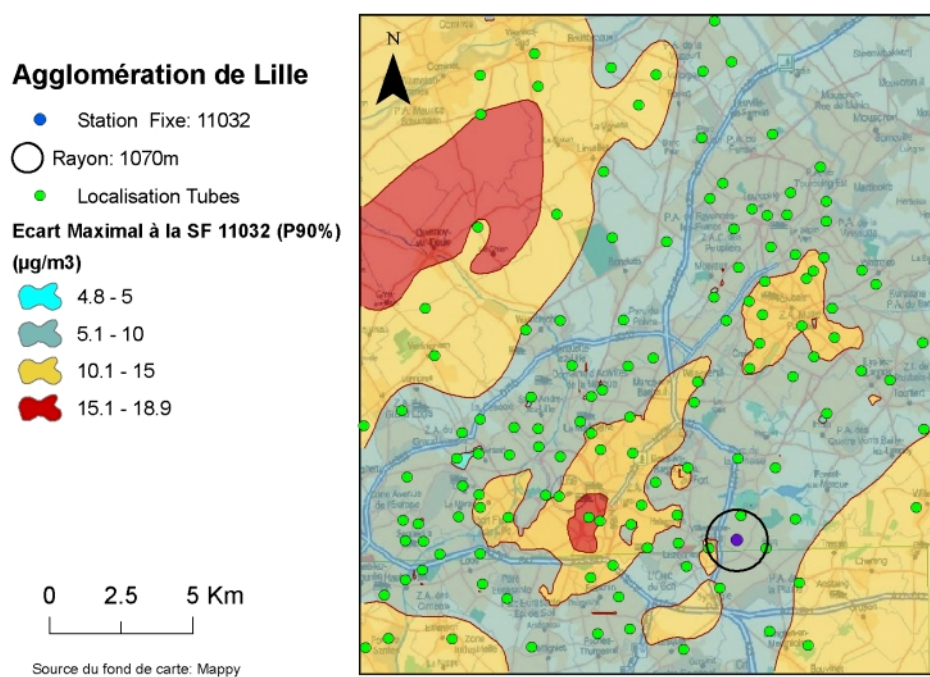


Figure 73 : LILLE - Carte de l'écart maximal entre la concentration réelle et celle de la station fixe Ville d'Ascq Rameau ($28.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour une probabilité de 90%