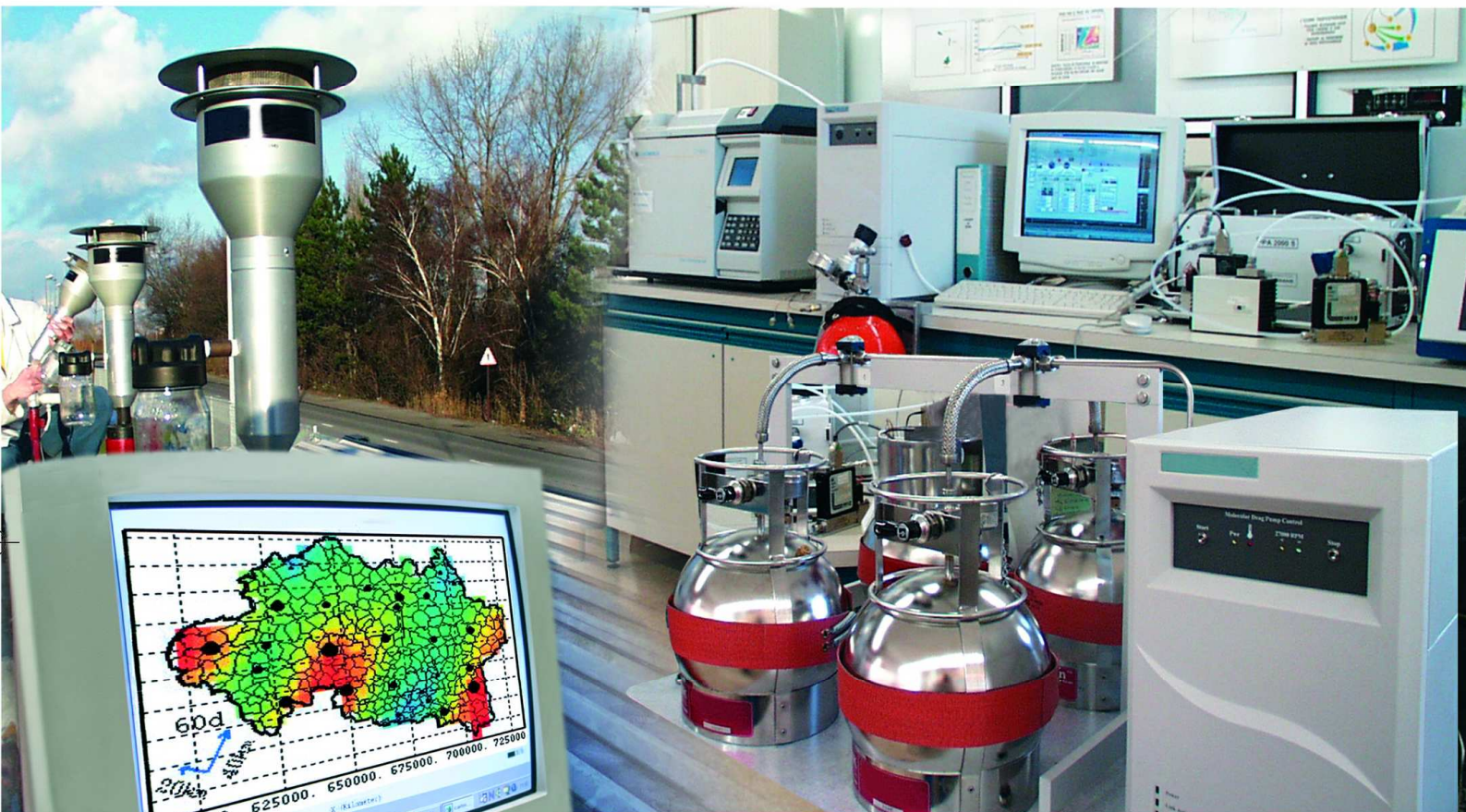




## Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



Modélisation - Traitements numériques

### **Evaluation des zones touchées par les dépassements de valeurs limites**

**Note méthodologique. Version 1.**

Juillet 2009

Programme 2009

L. MALHERBE, G. CARDENAS







## 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 du développement durable, 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 Générale de l'énergie et du climat du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat, 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.**





# Evaluation des zones touchées par les dépassements de valeurs limites

Laboratoire Central de Surveillance  
de la Qualité de l'Air




## Modélisation - Traitements numériques

Programme financé par la  
Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC)

2009

INERIS : L. MALHERBE, G. CARDENAS

Ce document comporte 20 pages (hors couverture et annexes)

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	L. MALHERBE	B. BESSAGNET L. ROUÏL	M. RAMEL
Qualité	Ingénieur Direction des Risques Chroniques	Responsable de l'unité MOCA Responsable du pôle DECI Direction des Risques Chroniques	Responsable LCSQA/INERIS Direction des Risques Chroniques
Visa			



## TABLE DES MATIÈRES

<b>RESUME</b> .....	<b>6</b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>7</b>
<b>2. REMARQUES PRELIMINAIRES</b> .....	<b>8</b>
2.1 Rappel des résultats issus de la BDQA.....	8
2.2 Analyse préliminaire des travaux réalisés au sein des AASQA.....	8
<b>3. FOND REGIONAL / FOND URBAIN</b> .....	<b>9</b>
3.1 Principe .....	9
3.2 Cartographie journalière des PM10 sur la France .....	10
3.2.1 Méthode.....	10
3.2.2 Bilan annuel, prise en compte de l'incertitude d'estimation .....	12
3.2.3 Mise à disposition des données.....	15
<b>4. FOND URBAIN / PROXIMITE AUTOMOBILE</b> .....	<b>16</b>
4.1 Des résultats de modélisation sont disponibles.....	16
4.2 Il n'existe pas de telles données ou celles-ci sont insuffisantes pour répondre au problème pose .....	17
4.2.1 Plusieurs stations de trafic et de fond sont en dépassement dans l'agglomération et les conditions suivantes sont vérifiées :.....	17
4.2.2 Les conditions précédentes ne sont pas vérifiées, le dépassement concerne des stations de trafic isolées .....	17
<b>5. PROXIMITE INDUSTRIELLE</b> .....	<b>18</b>
5.1 La station industrielle a le comportement d'une station de fond en ce qui concerne les PM <sub>10</sub> .....	18
5.2 La station industrielle est soumise à l'influence locale d'émetteurs industriels	18
<b>6. POPULATION EXPOSEE</b> .....	<b>18</b>
<b>7. CONCLUSION</b> .....	<b>19</b>
<b>8. REFERENCES</b> .....	<b>20</b>
<b>9. LISTE DES ANNEXES</b> .....	<b>20</b>

## **RESUME**

L'obligation de déclaration auprès de la Commission Européenne nécessite d'évaluer les zones géographiques touchées par des dépassements de valeurs limites et de quantifier les populations exposées à ces dépassements. La présente note a pour objet de répondre à une demande du Ministère chargé du développement durable à propos des dépassements liés aux PM<sub>10</sub>. Elle décrit une méthodologie permettant aux AASQA de caractériser, en fonction des moyens dont elles disposent, la répartition et l'étendue des zones de dépassement. Compte tenu de l'urgence de la demande, une méthode volontairement simple et pragmatique a été développée. Elle tient compte de l'expérience et de la pratique des AASQA dont le LCSQA a pris préalablement connaissance en rencontrant notamment différents acteurs locaux. Elle comprend trois parties consacrées respectivement à la pollution de fond, à la pollution de proximité routière et à la pollution de proximité industrielle.

En ce qui concerne la pollution de fond, une procédure de cartographie fondée sur un traitement géostatistique des résultats du modèle CHIMERE, des observations et de données de population a été mise au point. Elle permet d'estimer jour par jour les concentrations de PM<sub>10</sub> sur la France selon une résolution kilométrique. Les résultats pour les années 2005, 2006 et 2007 (cartes des concentrations moyennes annuelles et des nombres annuels de dépassements du seuil 50 µg/m<sup>3</sup>) seront mis à la disposition des AASQA sur le site Internet du LCSQA.

En situation de proximité, l'évaluation des zones de dépassement requiert des données locales précises qui ne sont pas toujours disponibles. Une approche adaptée aux données et outils disponibles est proposée, pouvant conduire, selon les cas, à une évaluation relativement précise ou à une approximation plus grossière. Cependant dans tous les cas, l'approximation est jugée pertinente par rapport aux enjeux du rapportage pour les dépassements des valeurs de PM<sub>10</sub>, et elle tend à majorer l'étendue des zones réellement concernées par ces dépassements.

L'ensemble de la méthode sera affiné dans une seconde étape qui se poursuivra jusqu'à la fin de l'année 2010.



## 1. INTRODUCTION

Selon les dispositions de la Directive européenne relative à la qualité de l'air ambiant (2008/50/CE), les Etats Membres doivent communiquer à la Commission Européenne des informations sur les dépassements de valeurs limites constatés sur leur territoire. Il leur est demandé non seulement de qualifier et d'expliquer les dépassements enregistrés ponctuellement par les stations permanentes mais également d'estimer l'étendue spatiale de ces dépassements ainsi que la population exposée.

Dans ce contexte, les AASQA sont régulièrement sollicitées par l'intermédiaire des DRIRE/DREAL, afin d'apporter au Ministère en charge du développement durable les éléments quantitatifs et qualitatifs exigés par la Commission Européenne. A ce jour, aucune méthode n'a été formalisée pour traiter cette question. Les AASQA s'appuient sur les données dont elles disposent localement (résultats de modélisation, données de campagnes, données d'émissions...) et sur leur connaissance du terrain.

Le développement d'une méthodologie adaptée à ces demandes réglementaires est l'objet de ce travail. Dans la suite, nous désignerons par *zone de dépassement* la partie d'un domaine effectivement touchée par un dépassement de valeur limite. L'objectif initial de l'étude concerne la possibilité d'estimer l'étendue et la répartition géographique d'une telle zone pour chacune des stations qui ont enregistré un dépassement. Cependant, si plusieurs stations voisines, appartenant à la même zone, sont dans ce cas – notamment plusieurs stations d'une même agglomération -, une estimation site par site peut se révéler délicate du fait que les surfaces de dépassement se recoupent. La solution choisie en conséquence est une évaluation globale sur l'ensemble des stations concernées dans la zone.

La présente note se borne au problème des dépassements de valeurs limites de PM<sub>10</sub>, qui constitue la priorité actuelle du Ministère ; elle sera ultérieurement étendue au NO<sub>2</sub> et au benzène. Elle porte plus spécialement sur l'évaluation spatiale des dépassements ; la quantification des populations exposées n'est que brièvement évoquée. Compte tenu de l'urgence de la demande, qui cible une demande de report pour la déclaration des dépassements, une approche simple et pragmatique est proposée dans un premier temps. Elle sera affinée dans une seconde phase de l'étude (fin 2009-2010), lors de la mise au point d'une méthodologie plus générique pour l'élaboration des dossiers de rapportage.

La méthode proposée s'organise par échelle d'espace et par typologie (chapitres 2, 4 et 5). Pour les AASQA dont les moyens de surveillance permettent l'obtention d'une information locale précise, et qui, à la faveur de ces moyens (campagnes de mesure, outils de modélisation et de cartographie), ont développé leurs propres techniques d'estimation, elle inclut la possibilité de faire usage de ces techniques.

NB : les résultats graphiques et numériques présentés dans cette note ont été établis à partir des données de la **BDQA disponibles au moment de l'étude** (données en date d'avril 2009). Une mise à jour des résultats relatifs à l'année 2007, qui sera réalisée avec une nouvelle version de la BDQA, est prévue pour le 17 août 2009.

## 2. REMARQUES PRELIMINAIRES

### 2.1 RAPPEL DES RESULTATS ISSUS DE LA BDQA

On rappelle que pour les PM<sub>10</sub>, les valeurs limites sont :

- 40 µg/m<sup>3</sup> en moyenne annuelle
- 50 µg/m<sup>3</sup> en moyenne journalière, à ne pas dépasser plus de 35 fois par an.

Le Tableau 1 indique le nombre de stations pour lesquelles des dépassements de ces valeurs ont été constatés entre 2005 et 2007.

Tableau 1 – Recensement des stations ayant présenté des dépassements de valeurs limites de PM10 entre 2005 et 2007

	2005	2006	2007
<b>VL annuelle</b>	1 station I 1 station T	1 station T	3 stations I 7 stations T 1 station U
<b>VL journalière</b>	3 stations I 10 stations T	3 stations I 9 stations T	15 stations I 27 stations T 43 stations U 10 stations PU

I = de proximité industrielle ; T= de trafic ; U : urbaine ; PU : périurbaine

### 2.2 ANALYSE PRELIMINAIRE DES TRAVAUX REALISES AU SEIN DES AASQA

Les dépassements mentionnés au paragraphe précédent (§2.1) touchent les régions suivantes : Alsace, Aquitaine, Bourgogne, Haute-Normandie, Ile-de-France, Lorraine, Nord-Pas-de-Calais, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Rhône-Alpes, Guadeloupe, Martinique, Guyane.

15 AASQA sont ainsi concernées : ASPA, AIRAQ, ATMOSF'AIR Bourgogne, AIR NORMAND, AIRPARIF, AIRLOR, ATMOLOR, ATMO Nord-Pas-de-Calais, AIRFOBEP, ATMO PACA, L'Air de l'Ain et des Pays de Savoie, ATMO Rhône-Alpes GIE, GWAD'AIR, Madinainair, ORA de Guyane.

Le LCSQA a pris contact par téléphone avec chacune d'entre elles afin de recueillir son appréciation des dépassements observés dans son domaine de surveillance. Il a pu ainsi établir un bilan préliminaire des moyens utilisés pour évaluer les zones et les populations exposées. En complément de ces entretiens

téléphoniques, des réunions ont été organisées avec plusieurs AASQA. Le LCSQA s'est rendu en priorité dans les AASQA concernées par les plus grands nombres de dépassements : ATMO Nord-Pas-de-Calais, ATMO Rhône-Alpes, ASPA, AIRPARIF, ATMO PACA. Il est prévu de poursuivre ces visites dans les autres AASQA au cours de l'année 2009.

On constate une assez grande variabilité dans les approches. Celles-ci dépendent des outils de modélisation et des données d'émissions localement disponibles ainsi que de l'expérience développée sur le long terme en matière de simulation numérique et de cartographie. Ont été mises en évidence les approches suivantes (non nécessairement exclusives) :

- Aucun moyen en particulier n'est mis en œuvre, seules interviennent l'expertise et la connaissance du terrain (estimation objective).
- Expertise à partir de données de trafic (comptages);
- Utilisation ponctuelle d'un modèle urbain (simulation de situations particulières) ;
- Utilisation sur le long terme (selon un pas horaire, pour une année) d'un modèle urbain et éventuellement d'un modèle régional ;
- Application de méthodes géostatistiques pour cartographier simultanément le fond et la proximité (cartes annuelles).

Des précisions par AASQA sont fournies dans le tableau de l'annexe 1.

### **3. FOND REGIONAL / FOND URBAIN**

#### **3.1 PRINCIPE**

L'évaluation des zones géographiques concernées par les dépassements de valeurs limites se fondera sur une estimation spatiale préalable des concentrations moyennes annuelles de  $PM_{10}$  et des nombres annuels de dépassements du seuil  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les zones de dépassement seront constituées par l'ensemble des mailles situées dans le voisinage des stations de mesure concernées et dont la valeur estimée (concentration moyenne annuelle ou nombre annuel de dépassements) est strictement supérieure à la valeur limite ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ou 35 dépassements). Il pourra s'agir :

- d'une estimation obtenue localement
- d'une estimation extraite des cartographies établies par le LCSQA à l'échelle nationale (cf. §3.2)

On vérifiera préalablement la cohérence entre ces données d'estimation et les données de mesure.

Remarque : pour cette comparaison, les cartographies élaborées par le LCSQA, prennent en compte l'incertitude d'estimation ainsi qu'il est précisé au paragraphe 3.2.2.

Si dans une même agglomération, des stations de fond et de trafic présentent des dépassements, on poursuivra l'évaluation selon la méthode proposée au chapitre 4. S'il s'agit de stations de fond et de proximité industrielle, on continuera l'évaluation en se reportant au chapitre 5.

## 3.2 CARTOGRAPHIE JOURNALIERE DES PM10 SUR LA FRANCE

### 3.2.1 METHODE

La méthode de cartographie repose sur un traitement géostatistique des données d'observation issues de la BDQA et de l'information apportée par le modèle CHIMERE sur l'ensemble du territoire.

Elle consiste à effectuer, pour chaque journée étudiée, un **cokrigeage ordinaire entre les observations** (variable principale) **et le modèle CHIMERE** (variable auxiliaire), **avec la densité de population en dérive externe**.

Les données d'entrée sont :

- les concentrations moyennes journalières de PM<sub>10</sub> mesurées par les stations rurales, périurbaines et urbaines de fond (333 sites recensés en 2007). Ces concentrations ont été calculées à partir des données horaires de la BDQA (version de la BDQA en date de la fin avril 2009).
- les concentrations moyennes journalières de PM10 en France simulées par CHIMERE selon une résolution spatiale d'environ 10 km (0,1°x 0,15°).
- la transformée logarithmique de la densité de population (transformation de la forme  $\ln(1+X)$ ). Cette variable a été calculée par l'INERIS sur une grille kilométrique, en répartissant les données de population communales (recensement INSEE 1999) en fonction de l'occupation du sol (CORINE Land Cover) selon la méthodologie de Gallego et Peedell (2001).

La grille d'estimation des concentrations journalières de PM<sub>10</sub> a une **résolution kilométrique**. Elle coïncide avec la grille de densité de population.

Le modèle géostatistique utilisé est un modèle linéaire de corégionalisation. Ce modèle se révèle bien adapté pour décrire la variabilité spatiale des observations (en tenant compte de la dérive) et de CHIMERE ainsi que la corrélation spatiale entre les deux. Il est réajusté chaque jour.

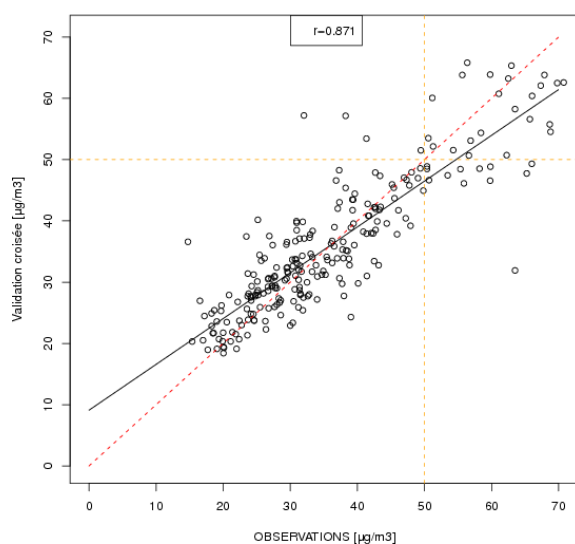
Le voisinage d'estimation détermine le choix des points introduits localement dans le cokrigeage. Il a été défini selon plusieurs critères : la portée spatiale des phénomènes, la nécessité d'inclure un nombre suffisant d'observations et la

limitation du temps de calcul. Il est de 100 points pour la mesure et de 45 points pour CHIMERE.

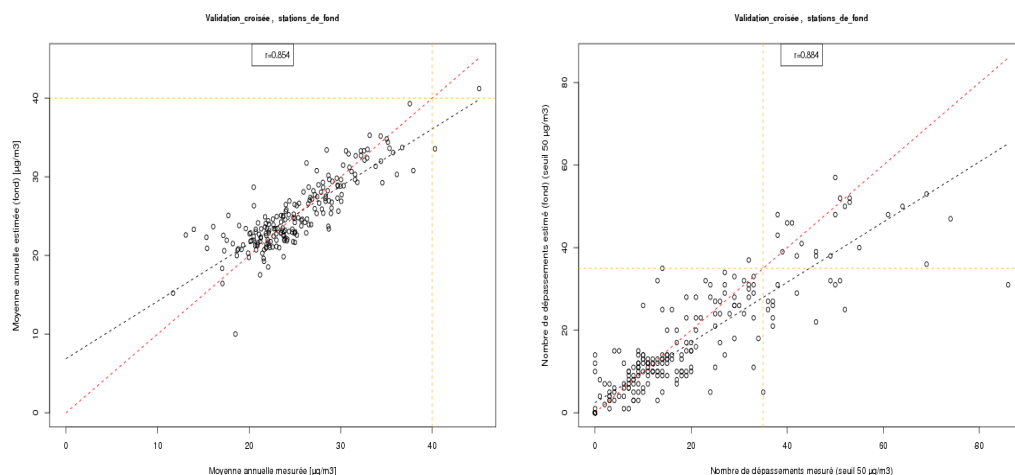
Les choix de modélisation et de voisinage sont commentés dans l'annexe 2.

La qualité des estimations est contrôlée jour par jour puis en moyenne sur l'année par validation croisée (Figure 1, Figure 2). On vérifie en particulier que :

- la moyenne des erreurs d'estimation est proche de 0 ;
- le nuage de corrélation entre les valeurs estimées et mesurées est centré sur la bissectrice ;
- le coefficient de corrélation associé est élevé ( $> 0,7$  à titre indicatif) ;
- la pente de la régression entre les valeurs estimées et mesurées est proche de 1.



*Figure 1 – Validation croisée. Exemple d'une journée particulière (26 avril 2007).  
En rouge : bissectrice. En noir : droite de régression (valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées)*



*Figure 2 – Validation croisée. Graphique de gauche : moyenne sur l'année 2007 des valeurs journalières estimées et mesurées. Graphique de droite : nombres de dépassements estimés et observés. En rouge : bissectrice ; en noir : droite de régression (valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées). Les stations correspondant à des dépassements observés mais non estimés sont indiquées dans l'annexe 2.*

En complément, les concentrations journalières de  $PM_{10}$  sont estimées sur les stations de proximité (stations industrielles d'une part, stations de trafic d'autre part) et comparées aux valeurs mesurées en ces points (cf. annexe 2).

L'ensemble des calculs géostatistiques est réalisé avec le logiciel R. Pour la maille d'estimation et les paramètres de voisinage choisis, le temps de calcul d'une cartographie journalière sur la France – en incluant la validation croisée et l'estimation sur les sites de proximité - est de 20 minutes.

### **3.2.2 BILAN ANNUEL, PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE D'ESTIMATION**

La carte estimée des concentrations moyennes annuelles de  $PM_{10}$  est obtenue en calculant la moyenne arithmétique des 365 estimations journalières.

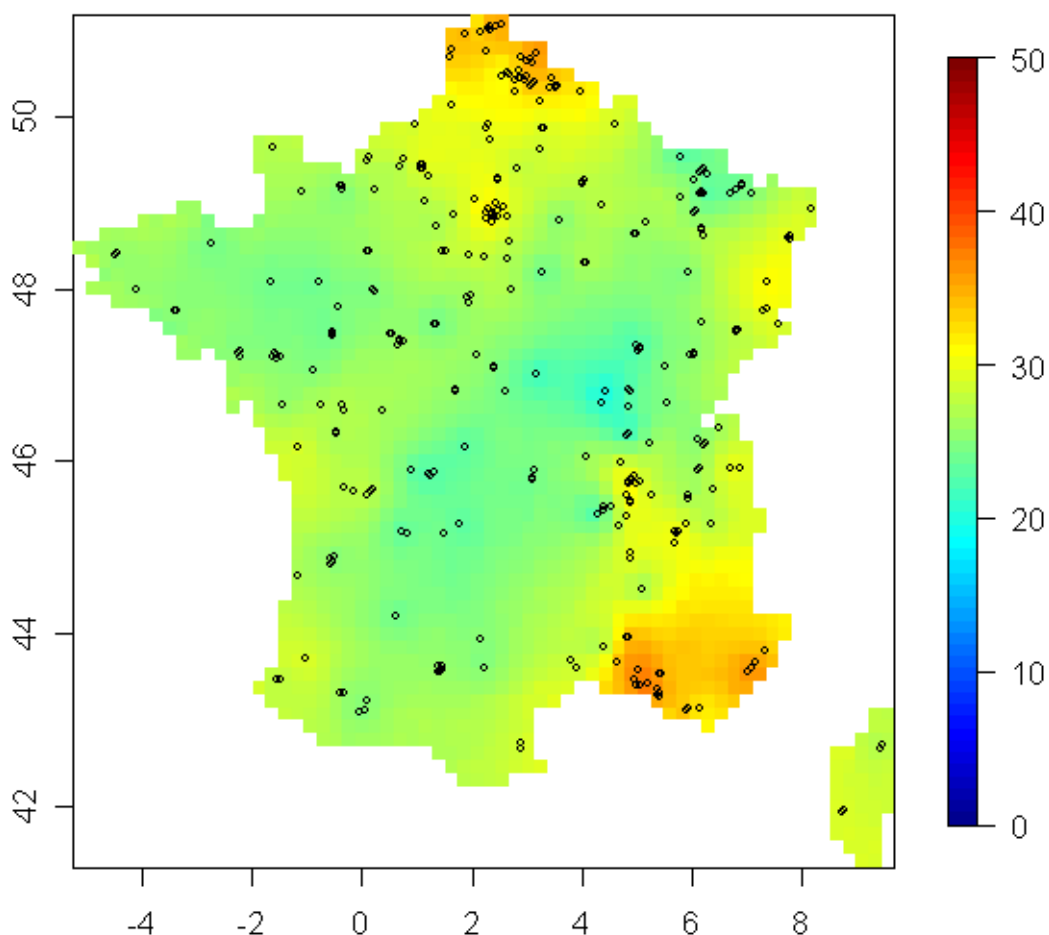
La carte des nombres de dépassements de la valeur  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  est obtenue en deux étapes :

1. chaque estimation journalière est convertie en une grille de 0 (la valeur de la maille est inférieure ou égale à  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et de 1 (la valeur de la maille est strictement supérieure à  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ;
2. on fait la somme de ces cartes transformées.

Dans le contexte réglementaire qui nous occupe et par souci de proposer une méthode aisément compréhensible et applicable, une manière simple de prendre en considération l'incertitude d'estimation a été définie :

- on vérifie sur les résultats de validation croisée que l'écart-type de krigeage est représentatif de l'écart-type de l'erreur d'estimation (annexe 2) ;
- les concentrations journalières estimées en chaque maille sont encadrées par un intervalle de confiance déduit de l'écart-type de krigeage (hypothèse d'erreur gaussienne). Un intervalle de confiance à 50%, soit  $\pm 0,68 \cdot \sigma_K$  sous l'hypothèse de normalité, apparaît comme un compromis satisfaisant entre l'importance de tenir compte de l'incertitude d'estimation et le souci de ne pas maximiser les zones de dépassement.

Les cartes annuelles sont calculées comme il est indiqué précédemment à partir des estimations journalières d'une part, à partir des estimations journalières augmentées de  $+0,68 \cdot \sigma_K$  d'autre part. La comparaison avec les valeurs réglementaires ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 35 dépassements annuels) s'effectue pour les cartes issues de ces estimations hautes (Figure 10, Figure 11, Figure 12).



*Figure 3 – Concentrations moyennes annuelles de PM10 estimées pour l'année 2007. Points : stations utilisées en entrée du cokrigeage. Aucune valeur estimée n'est supérieure à la valeur limite annuelle [ $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ].\**

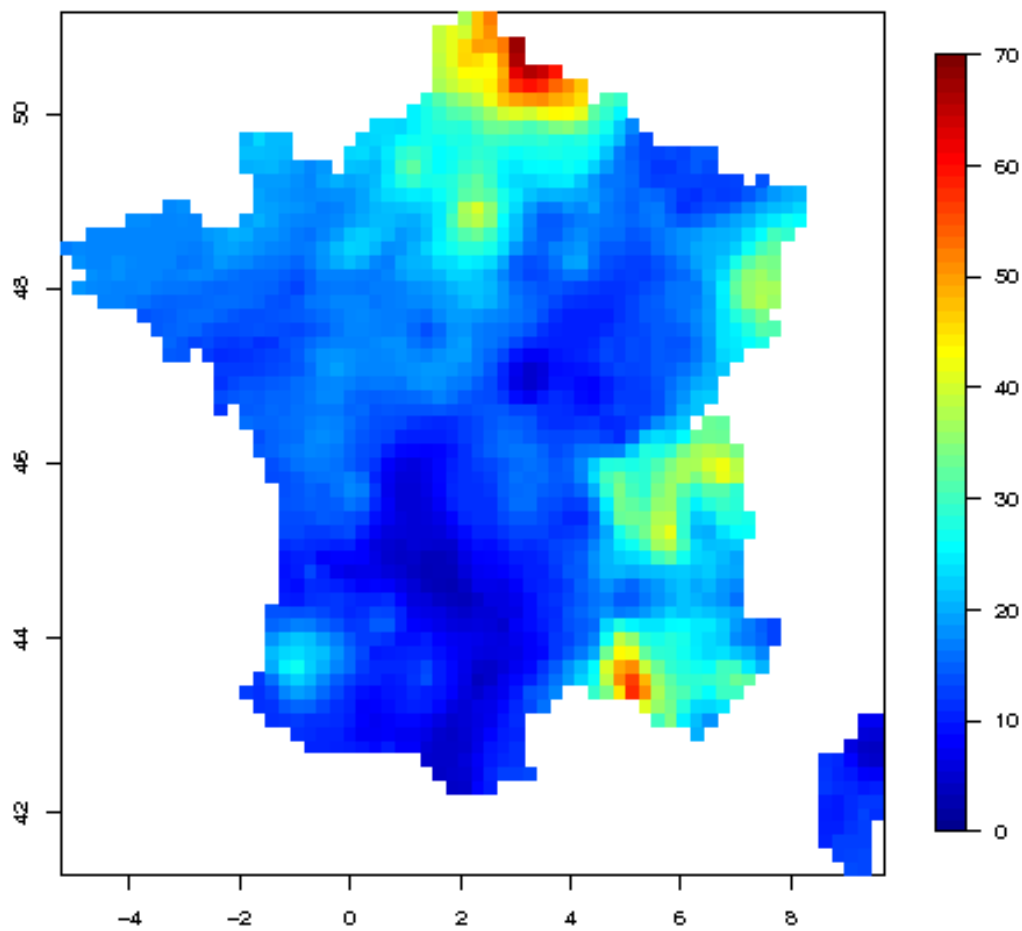


Figure 4 – Nombres de dépassements du seuil 50 µg/m3 estimés pour l'année 2007\*



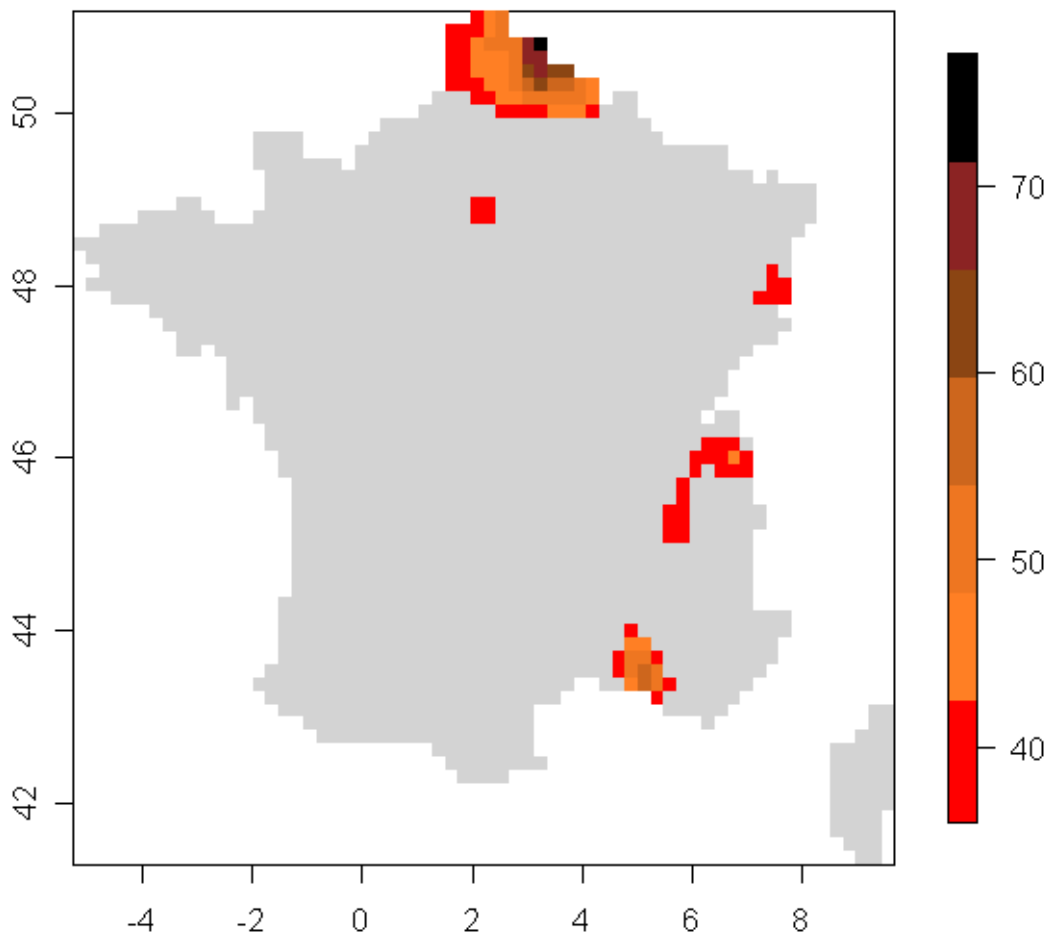


Figure 5 – En couleur : mailles pour lesquelles le nombre de dépassements estimé pour l'année 2007 est supérieur ou égal à 36\*

\* : cartes provisoires, établies avec une version non définitive de la BDQA.

### 3.2.3 MISE A DISPOSITION DES DONNEES

Les résultats numériques associés aux mailles kilométriques (moyennes annuelles, nombres annuels de dépassements de seuil pour les années 2005, 2006 et 2007) seront mis à la disposition des AASQA sur le site Internet du LCSQA.

Soumises *a priori* à l'influence de sources proches, les stations industrielles ne sont pas prises en compte dans les cartographies. Cependant, des AASQA ont constaté que certaines stations industrielles enregistraient des concentrations de

PM<sub>10</sub> comparables aux valeurs mesurées sur les sites de fond voisins. Si elles en font la demande, les cartographies pourront être recalculées localement en incluant ces stations.

#### 4. FOND URBAIN / PROXIMITE AUTOMOBILE

Plusieurs méthodes d'estimation sont proposées selon l'organigramme de la Figure 6, en fonction des données disponibles et des situations rencontrées localement.

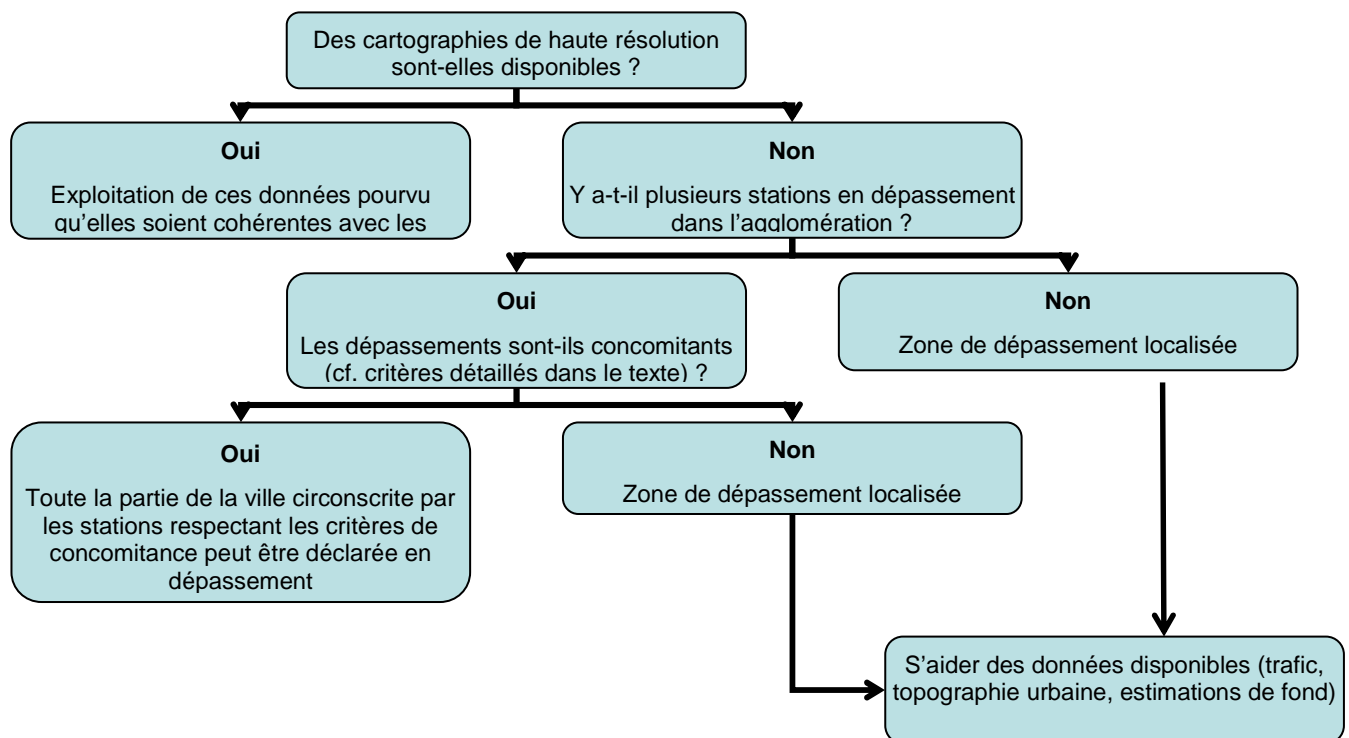


Figure 6 – Méthodologie d'évaluation des zones de dépassement en milieu urbain et situation de proximité automobile

##### 4.1 DES RESULTATS DE MODELISATION SONT DISPONIBLES

Des données de modélisation de haute résolution sont disponibles sur l'agglomération (résultats de simulations déterministes ou de méthodes d'interpolation mises en œuvre à fine échelle).

Aux points d'observation (stations permanentes, sites d'échantillonnage), on vérifiera qu'elles sont cohérentes avec les mesures de PM<sub>10</sub> effectuées sur l'année concernée.

Si tel est le cas, ces données pourront servir à la délimitation des zones de dépassement dans l'agglomération.

## **4.2 IL N'EXISTE PAS DE TELLES DONNEES OU CELLES-CI SONT INSUFFISANTES POUR REpondre AU PROBLEME POSE**

### **4.2.1 PLUSIEURS STATIONS DE TRAFIC ET DE FOND SONT EN DEPASSEMENT DANS L'AGGLOMERATION ET LES CONDITIONS SUIVANTES SONT VERIFIEES :**

- Cas de la VL annuelle : pour la majorité (au moins 3/4) des stations de trafic et de fond situées dans l'agglomération la moyenne annuelle dépasse la VL ou en est proche (supérieure à 30 µg/m<sup>3</sup> pour tenir compte de l'objectif de qualité de 25% sur la mesure).
- Cas de la VL journalière : sur la majorité (au moins 3/4) des stations de trafic et de fond situées dans l'agglomération, on observe au minimum 30 dépassements concomitants de la valeur 50 µg/m<sup>3</sup>.

La zone de dépassement englobera toute la partie de l'agglomération circonscrite par ces stations.

La cartographie de fond servira à affiner les contours de cette zone.

### **4.2.2 LES CONDITIONS PRECEDENTES NE SONT PAS VERIFIEES, LE DEPASSEMENT CONCERNE DES STATIONS DE TRAFIC ISOLEES**

#### ***Cas 1 : des données de trafic et/ou d'émissions ainsi que des informations sur la topographie urbaine sont disponibles.***

On caractérisera la configuration de l'axe près duquel la station considérée est implantée : rapport hauteur/largeur, espacement entre les bâtiments.

La zone de dépassement sera délimitée :

- longitudinalement, par l'ensemble des tronçons routiers de même orientation, de configuration et de trafic/d'émissions similaires ;
- latéralement, par une bande de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de large.

Si des données de campagnes de mesure permettent d'évaluer l'influence latérale de l'axe, la largeur de la bande sera ajustée d'après ces données.

Dans le cas contraire, une largeur de 300 m de part et d'autre de l'axe est proposée. Cette valeur résulte d'une analyse bibliographique (annexe 2).

### **Cas 2 : les données disponibles sont insuffisantes.**

On examinera les cartographies de fond (concentrations moyennes annuelles, nombres de dépassements) afin d'identifier, si la connaissance du terrain le permet, d'autres axes potentiellement concernés. On s'intéressera aux parties du domaine dans lesquelles les valeurs de fond estimées sont élevées (supérieures aux valeurs de fond estimées près de la station de trafic) et aux axes qui les traversent. Si les estimations de fond sont relativement homogènes sur l'agglomération, cette analyse n'est pas pertinente et la zone de dépassement sera restreinte à l'axe ou au tronçon d'axe situé près de la station.

Latéralement, la zone de dépassement sera délimitée comme dans le cas précédent.

## **5. PROXIMITE INDUSTRIELLE**

### **5.1 LA STATION INDUSTRIELLE A LE COMPORTEMENT D'UNE STATION DE FOND EN CE QUI CONCERNE LES PM<sub>10</sub>**

On se reportera à la méthode d'évaluation proposée pour le fond.

### **5.2 LA STATION INDUSTRIELLE EST SOUMISE A L'INFLUENCE LOCALE D'EMETTEURS INDUSTRIELS**

On délimitera grossièrement une zone autour de la station. Si des dépassements ont été constatés sur des sites voisins, on considèrera le domaine circonscrit par l'ensemble des stations touchées.

La délimitation sera affinée à l'aide des données disponibles : données relatives aux émissions ponctuelles et surfaciques, informations sur la distance d'impact des émetteurs industriels (campagnes de mesure, modélisation de panache), données de fond.

## **6. POPULATION EXPOSEE**

Avant d'être croisées avec les surfaces de dépassement, les données de population pourront être réparties spatialement en fonction de l'occupation du sol ou du bâti.

Notons qu'une base de densité de population est disponible sur le site Internet de l'Agence européenne de l'Environnement (<http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/metadetails.asp?id=830>). Ces données ont été calculées selon une maille de 100 m de côté à partir de données de population communales (2001) et de la base CORINE Land Cover (2001). La méthodologie employée est celle de Gallego et Peedell (2001).

## **7. CONCLUSION**

L'évaluation des zones géographiques touchées par des dépassements de valeurs limites de PM<sub>10</sub> fait l'objet d'une demande urgente de la part du Ministère en charge du développement durable. Afin que toute AASQA concernée puisse répondre dans un bref délai, une méthode simple et pragmatique a été développée. Elle s'organise par échelle d'espace et par typologie. Dans chaque cas, elle décrit la marche à suivre en fonction des moyens disponibles.

En ce qui concerne la pollution de fond, le LCSQA a mis au point une procédure automatique de cartographie journalière, fondée sur un traitement géostatistique des simulations issues de CHIMERE, des observations et de données de population. Les estimations résultantes (cartographies des concentrations moyennes annuelles et des nombres annuels de dépassements du seuil 50 µg/m<sup>3</sup>), obtenues sur la France selon une résolution kilométrique, seront mises à la disposition des AASQA sur le site Internet du LCSQA.

S'agissant de la pollution de proximité, il n'a pas été possible d'élaborer une méthode générale pour la France, travail qui nécessiterait des bases de données très détaillées sur les axes et le trafic routier. Une approche dépendant des données et outils disponibles est donc proposée.

Il est prévu d'affiner l'ensemble de la méthodologie dans une seconde phase de l'étude (2009-2010) et de l'adapter à d'autres polluants, NO<sub>2</sub> et benzène en particulier. Pour ces deux composés, la disponibilité de campagnes de mesure par tubes à échantillonnage passif bien documentées permettra de développer une méthode plus précise. De plus, les données de l'inventaire national spatialisé des émissions (INS), qui seront mises à terme à disposition de l'ensemble des AASQA, seront exploitées.

La démarche proposée à l'issue de cette phase préliminaire s'est heurtée au manque de données d'observation disponibles pour les PM<sub>10</sub>. En effet, les données de campagnes mobiles sont peu nombreuses, l'usage d'appareils portatifs n'est pas encore opérationnel et la méthode proposée se limite donc à l'exploitation de données du réseau d'analyseurs automatiques. **Il est évident, à l'instar de ce qui sera étudié pour la cartographie des dépassements de NO<sub>2</sub> et de benzène, qu'une campagne de mesure peut apporter de précieuses informations sur la variabilité spatiale et temporelle des concentrations autour d'un site. La conception et la conduite d'une campagne destinée à caractériser la représentativité d'une station de mesure de PM<sub>10</sub> seront ainsi proposées par le LCSQA pour l'année 2010.**

## **8. REFERENCES**

Gallego J., Peedell S., 2001, Using CORINE Land Cover to map population density. Towards Agri-environmental indicators, Topic report 6/2001 European Environment Agency, Copenhagen, pp. 92-103.  
[http://reports.eea.eu.int/topic\\_report\\_2001\\_06/en](http://reports.eea.eu.int/topic_report_2001_06/en).

## **9. LISTE DES ANNEXES**

<b>Repère</b>	<b>• Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
Annexe 1	Bilan des pratiques dans les AASQA	5
Annexe 2	Compléments sur la cartographie de fond	8
Annexe 3	Bibliographie sur la décroissance des concentrations autour des routes	3

# **ANNEXE 1**

## **Bilan des pratiques dans les AASQA**

**Bilan préliminaire** (tableau limité aux AASQA pour lesquelles des dépassements liés aux PM10 ont été observés. Le nombre de stations recensées englobe les années 2005, 2006 et 2007)

AASQA	PM10 – VL journalière	PM10 – VL annuelle	NO2 – VL horaire	NO2 – VL annuelle
ATMO NPDC	<p><b>7 stations périurbaines + 18 stations urbaines + 6 stations industrielles + 4 stations de trafic</b></p> <p>Nombreux dépassements. Evaluation fondée sur l'expertise.</p>	Pas de dépassement	Pas de dépassement	Pas de dépassement
ATMO RA AIR APS	<p><b>2 stations périurbaines + 6 stations urbaines + 1 station industrielle + 12 stations de trafic</b></p> <p>Fond rural : Système de modélisation régionale PREV'ALP (avec descente d'échelle : 6 km → 1km) à un pas journalier + adaptation statistique (krigeage des observations avec CHIMERE en dérive externe)</p> <p>Echelle urbaine : Modèle SIRANE (10 m)</p> <p>Avant mise en œuvre opérationnelle de SIRANE : Fond urbain : ville-centre + communes de la première couronne si la majorité des stations ont dépassé + éventuellement zone complémentaire donnée par PREV'ALP</p>	<p><b>3 stations de trafic</b></p> <p>idem</p>	<p><b>1 station de trafic</b></p> <p>SIRANE</p>	<p><b>12 stations de trafic</b></p> <p>SIRANE</p>



AASQA	PM10 – VL journalière	PM10 – VL annuelle	NO2 – VL horaire	NO2 – VL annuelle
	<p>Proximité automobile (échelle régionale) : zone supposée en dépassement (sur une certaine largeur de bande) si plus de 15000 équivalents véhicules NOx</p> <p>Croisement avec la population spatialisée en fonction du bâti</p>			
ASPA	<p><b>3 stations urbaines + 1 station de trafic</b></p> <p>Fond rural : Système de modélisation régionale PREVEST (4 km) à un pas journalier + adaptation statistique (krigeage des innovations)</p> <p>Fond urbain + proximité : ADMS-Urban (200 m) à un pas journalier + STREET (pour le calcul de la longueur d'axes)</p> <p>Croisement avec la population spatialisée en fonction de l'occupation du sol</p>	Pas de dépassement	Pas de dépassement	<p><b>1 station de trafic</b></p> <p>Même approche que pour les PM10</p>
AIRPARIF	<p><b>1 station urbaine + 4 stations de trafic</b></p> <p>Fond (rural + urbain) : cokrigeage entre nombre de dépassements aux stations et carte moyenne annuelle de PM10 (cf. PM10 VL annuelle)</p> <p>Proximité : Surcroît de concentration (<math>\Delta_{\text{STREET}}</math>) estimé par STREET puis spatialisé dans</p>	<p><b>4 stations de trafic</b></p> <p>Fond (rural + urbain) : cokrigeage entre concentration de PM10 aux stations et émissions de particules</p> <p>Proximité : <math>\Delta_{\text{STREET}}</math> spatialisé dans une bande selon un profil de décroissance linéaire (ajusté à partir de données de campagnes)</p>	<p><b>2 stations de trafic</b></p> <p>Pas de méthode spécifique</p> <p>Dépassements locaux</p>	<p><b>1 station urbaine + 6 stations de trafic</b></p> <p>Même approche que pour les PM10</p> <p>Fond (rural + urbain) : cokrigeage entre concentration de NO2 aux stations et émissions de NOx</p> <p>Proximité : <math>\Delta_{\text{STREET}}</math> spatialisé dans une bande selon un profil de décroissance linéaire</p>

AASQA	PM10 – VL journalière	PM10 – VL annuelle	NO2 – VL horaire	NO2 – VL annuelle
	<p>une bande selon un profil de décroissance linéaire (profil ajusté à partir de données de campagnes)</p> <p>Prise en compte d'une erreur (gaussienne) autour du nombre estimé → carte de risque de dépassement.</p> <p>Dépassement si risque &gt;50%</p> <p>3 domaines :</p> <p>Ile de France, résolution 50 m</p> <p>Paris + couronne, résolution 25 m</p> <p>Paris, résolution 10 m</p> <p>(résolution augmentée uniquement pour des questions de lisibilité de la carte)</p> <p>Croisement avec la population spatialisée sur une maille de 50 m</p>	<p>Carte jugée imprécise → surface touchée et population exposée données sous forme d'intervalles</p> <p>3 domaines :</p> <p>Ile de France, résolution 50 m</p> <p>Paris + couronne, résolution 25 m</p> <p>Paris, résolution 10 m</p> <p>(résolution augmentée uniquement pour des questions de lisibilité de la carte)</p> <p>Croisement avec population spatialisée sur une maille de 50 m</p>		<p>(ajusté à partir de données de campagnes)</p>
ATMO PACA	<p><b>1 station périurbaine + 3 stations urbaines + 3 stations industrielles + 7 stations de trafic</b></p> <p>Délimitation des zones par analogie avec le NO<sub>2</sub> :</p> <p>[NO<sub>2</sub>]moy_an &gt; 35 µg/m<sup>3</sup> ⇒ dépassement de la VL journalière</p> <p>Croisement avec la population spatialisée en fonction du bâti (en fonction du volume des bâtiments)</p>	<p><b>3 stations industrielles + 1 station de trafic</b></p> <p>Même surface de dépassement que pour la VL journalière (jugée la plus pénalisante)</p>	<p><b>1 station de trafic</b></p>	<p><b>7 stations de trafic</b></p> <p>Modélisation du NO<sub>2</sub> en moyenne annuelle :</p> <p>ADMS-Urban pour Toulon, Nice, Aix (en cours)</p> <p>ou krigeage avec les émissions de NO<sub>x</sub> en dérive +Δ_STREET spatialisé par krigeage simple</p>

AASQA	PM10 – VL journalière	PM10 – VL annuelle	NO2 – VL horaire	NO2 – VL annuelle
AIRFOBEP	<b>7 stations urbaines + 4 stations industrielles</b> ADMS-Urban, résolution kilométrique : a tourné sur l'année 2008. 2007 : estimation des zones de dépassement à partir des résultats de 2008 et de la comparaison entre les mesures de 2007 et de 2008.			
AIRAQ	<b>1 station urbaine + 3 stations de trafic</b> Evaluation fondée sur l'expertise	Pas de dépassement	Pas de dépassement	Pas de dépassement
ATMOLOR	<b>1 station industrielle</b> Modélisation de panache (ADMS4) Analyse de l'inventaire des émissions	Pas de dépassement	Pas de dépassement	Pas de dépassement
AIRLOR	<b>1 station industrielle en 2007</b> Situation complexe (site industriel imbriqué dans un tissu urbain)	Pas de dépassement	Pas de dépassement	Pas de dépassement
AIR NORMAND	<b>2 stations de trafic</b> SIRANE (pour l'instant mis en œuvre dans des situations pénalisantes)	Pas de dépassement	Pas de dépassement	<b>1 station de trafic</b>
ATMOSF'Air Bourgogne	<b>1 station de trafic</b> Etude de données de trafic et de bâti	Pas de dépassement	<b>1 station OS</b>	<b>1 station de trafic + 1 station OS</b>
GWAD'AIR	<b>1 station urbaine</b> Toute la zone touchée (brumes de sable + autres contributions ponctuelles)	Pas de dépassement	Pas de dépassement	Pas de dépassement
MADININAIR	<b>4 stations urbaines + 1 station de trafic</b> Toute la zone touchée (brumes de sable + autres contributions : trafic, brûlage,...)	Pas de dépassement	Pas de dépassement	Pas de dépassement
ORA de Guyane	<b>1 station urbaine</b>	Pas de dépassement	Pas de dépassement	Pas de dépassement

## **ANNEXE 2**

### **Compléments sur la cartographie de fond**

## Modélisation géostatistique

Les variogrammes simples expérimentaux et le variogramme croisé expérimental de la mesure et de CHIMERE sont calculés chaque jour (Figure 7).

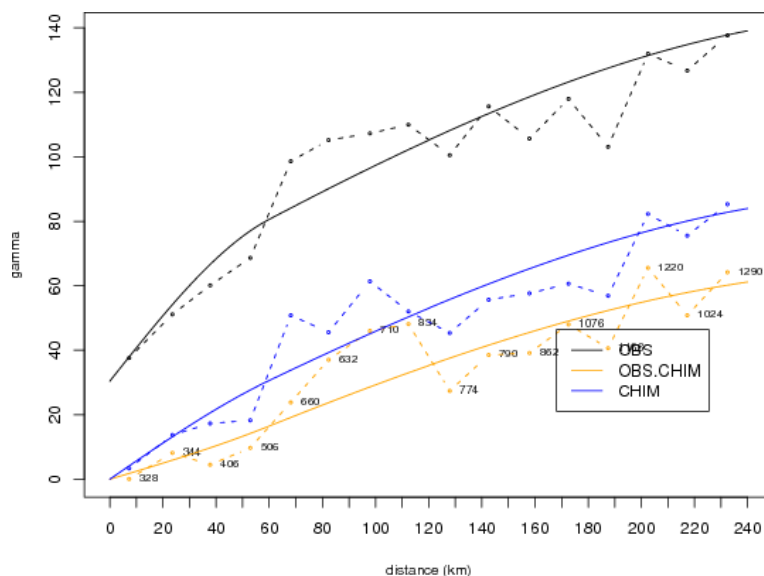


Figure 7 – Exemple de la journée du 26 avril 2007. Représentation des variogrammes expérimentaux (points) et des variogrammes modélisés (lignes). Noir : variogramme simple de la mesure. Bleu : variogramme simple de CHIMERE. Orange : variogramme croisé.

La dérive est prise en compte dans le variogramme de la mesure : ce dernier correspond au variogramme des résidus de la régression linéaire entre les observations et la variable de population.

Les variogrammes sont modélisés comme la combinaison linéaire de deux structures sphériques. Le variogramme de la mesure inclut également un effet de pépité.

Les portées des deux structures sphériques sont respectivement de 60 km et 300 km. Elles ont été définies dans une analyse exploratoire préliminaire des concentrations moyennes annuelles.

Les paliers des variogrammes sont réajustés chaque jour.

Le voisinage d'estimation résulte d'un compromis entre plusieurs critères : distance cohérente avec la portée spatiale des phénomènes et le domaine de validité des variogrammes, nécessité d'inclure un nombre suffisant d'observations, limitation du temps de calcul. Des tests ont montré que si le voisinage était exprimé en unité de distance, le nombre d'observations disponibles dans un rayon fixé pouvait être localement insuffisant, à cause de la densité inégale de stations et des données manquantes. Une augmentation de ce rayon a pour contrepartie une augmentation trop importante du temps de calcul. Un voisinage exprimé en nombre de données (valides) se révèle préférable.

## Remarques :

- La densité de population, variable auxiliaire disponible au moment de l'étude, a été choisie comme indicateur des émissions anthropiques afin d'améliorer la résolution des cartographies. A l'échelle de la France, les observations ne montrent toutefois qu'une assez faible corrélation avec cette variable ; celle-ci a une influence limitée sur la cartographie.

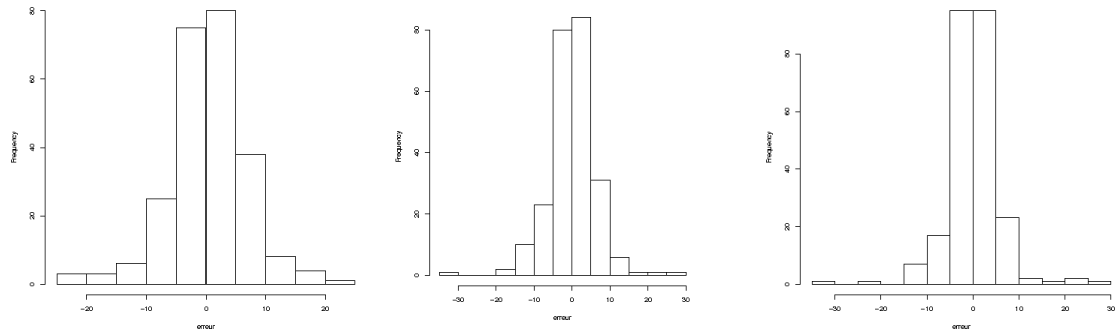
Lorsque la corrélation entre les observations et la densité de population est négative ou nulle, ce qui se produit parfois, le programme de krigeage ne prend pas en compte la dérive.

Le choix des variables auxiliaires pour la dérive sera approfondi dans la seconde phase de l'étude.

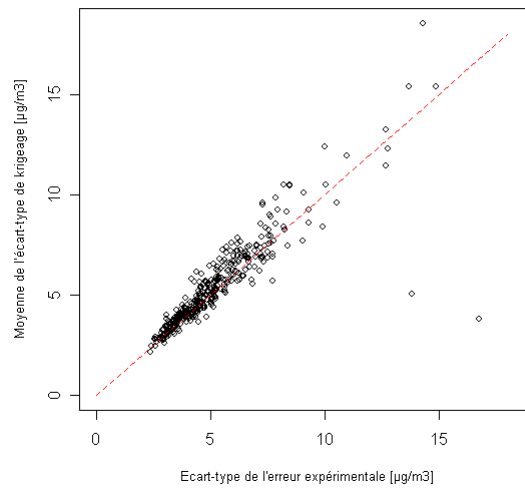
- Selon que la mesure (variable principale) et le modèle CHIMERE sont plus ou moins corrélés dans l'espace, ce dernier a plus ou moins de poids dans l'estimation. Si le variogramme croisé est proche de zéro, le cokrigeage équivaut approximativement à un krigeage des observations avec la population en dérive externe.

Lorsque le variogramme croisé prend des valeurs négatives, ce qui peut arriver ponctuellement, le programme de krigeage ne tient pas compte de CHIMERE : l'estimation du jour correspondant s'effectue par krigeage avec dérive externe.

- Les paramètres du modèle linéaire de corégionalisation et du cokrigeage ont été ajustés à la suite d'une analyse exploratoire et de tests préliminaires. On s'est notamment fondé sur les résultats de la validation croisée journalière. En plus des indicateurs cités au paragraphe 3.2.1, la variance de l'erreur d'estimation et la variance de krigeage ont été considérées. Une étude de sensibilité plus approfondie pourra être réalisée à l'occasion des améliorations envisagées sur le long terme ; s'il est besoin, la définition de ces paramètres sera affinée.
- Comme il est indiqué dans le corps du document, l'incertitude d'estimation est prise en compte sous la forme d'un intervalle de confiance autour des valeurs journalières estimées. Cet intervalle de confiance est défini conventionnellement à partir de l'écart-type de krigeage. A l'aide des résultats de la validation croisée, on s'est assuré préalablement que l'écart-type de krigeage était représentatif de l'écart-type de l'erreur d'estimation et que cette dernière suivait une distribution approximativement symétrique. C'est le cas pour une majorité de jours (Figure 8, Figure 9).



*Figure 8 – Validation croisée. Exemple de trois journées de l'année 2007. Histogramme de l'erreur d'estimation [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ].*



*Figure 9 – Année 2007. Validation croisée. Un point du nuage correspond à une journée. Il a pour abscisse l'écart-type de l'erreur d'estimation calculée sur les différentes stations et pour ordonnée la moyenne sur les stations des écarts-type de krigeage.*

En complément de la Figure 2 (cf. §3.2.1), le tableau ci-après (Tableau 2) indique à titre indicatif (dans l'état actuel des données utilisées) les stations pour lesquelles des dépassements de valeurs limites ont été mesurés en 2007 mais n'ont pas été correctement estimés par validation croisée.

*Tableau 2 – Dépassements observés mais non estimés pour l'année 2007.*

Numéro de site	Nom du site	Typologie	Moyenne annuelle mesurée [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Moyenne annuelle estimée [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Nb de dépassements du seuil $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mesuré	Nb de dépassements du seuil $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ estimé
02022	Arles	U	34.6	29.2	<b>46</b>	<b>22</b>
02031	Marignane-Ville	U	<b>40.3</b>	<b>33.6</b>	<b>86</b>	<b>31</b>
03014	MARSEILLE_SAINTELOUIS	U	35.3	33.6	<b>49</b>	<b>32</b>
03036	AIX_OUEST-BOUFFAN	U	32.5	33.3	<b>42</b>	<b>29</b>
03084	LE-PONTET	PU	35.2	29.1	<b>36</b>	<b>13</b>
04150	LA-DEFENSE	U	30.0	28.8	<b>37</b>	<b>26</b>
10025	Sangatte	PU	34.7	30.2	<b>41</b>	<b>35</b>
10032	Outreau	PU	31.5	29.5	<b>38</b>	<b>33</b>
10041	St-Omer-Ribot	U	31.6	29.6	<b>51</b>	<b>32</b>
15038	St-Martin-d'Herès	U	29.7	27.3	<b>50</b>	<b>31</b>
16038	STG-Est	U	29.0	26.0	<b>37</b>	<b>21</b>
16054	Colmar-Centre	U	30.1	27.7	<b>37</b>	<b>27</b>
16057	Mulhouse-Nord	U	30.1	26.9	<b>36</b>	<b>27</b>
20046	VAULX-EN-VELIN	PU	29.7	28.1	<b>42</b>	<b>28</b>
20062	LYON-Centre	PU	29.7	28.6	<b>38</b>	<b>33</b>
28020	Noeux-S.-Sports	PU	28.3	27.5	<b>40</b>	<b>33</b>
33120	CHAMONIX	U	28.7	26.9	<b>38</b>	<b>31</b>
33201	LOVERCHY	U	24.3	23.0	<b>37</b>	<b>23</b>
33212	GAILLARD	U	23.8	23.0	<b>36</b>	<b>25</b>
33220	PASSY	U	29.7	25.6	<b>52</b>	<b>25</b>

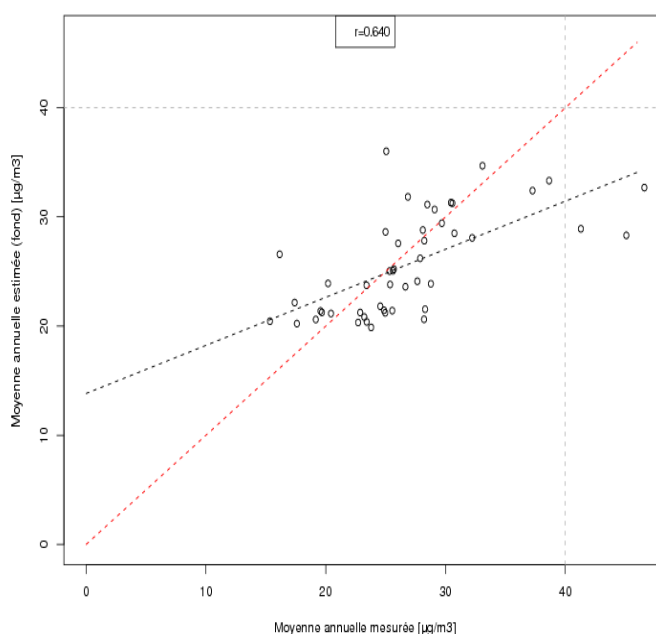
Ces résultats correspondent à la validation croisée (on élimine tour à tour une station de mesure des données d'entrée et on y estime la valeur par cokrigage à l'aide des observations restantes). Dans les estimations sur la grille kilométrique, les mesures de toutes ces stations, comme celles des autres sites de fond, sont bien prises en compte.



## **Relation entre les concentrations de proximité et les concentrations de fond**

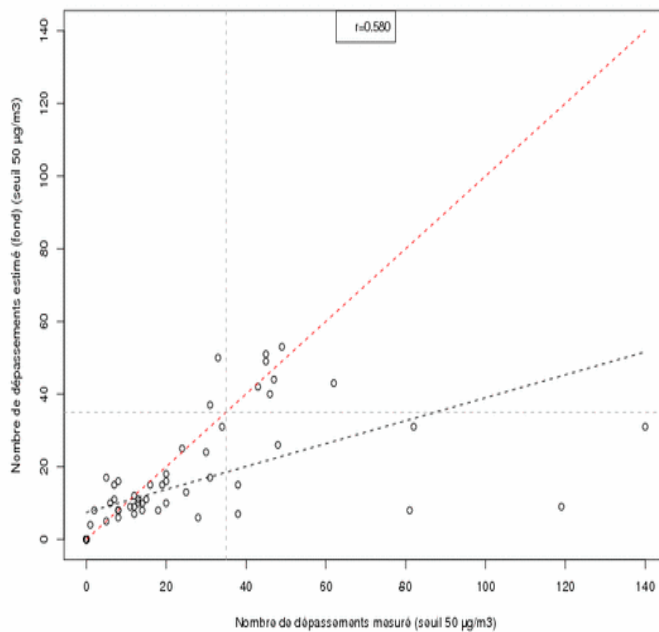
Les concentrations journalières de PM10 mesurées par les stations industrielles d'une part et par les stations de trafic d'autre part ont été comparées aux concentrations journalières de fond estimées en ces mêmes points.

Nous présentons les résultats de cette comparaison en moyenne annuelle (Figure 10, Figure 12).



*Figure 10 – Estimation des concentrations de fond sur les stations industrielles. Moyenne sur l'année 2007 des valeurs journalières estimées (en ordonnée) et mesurées (en abscisse) (corrélation=0,64). A droite, nombres de dépassements estimés (en ordonnée) et mesurés (en abscisse) (corrélation=0,58).*

*En rouge : bissectrice. En noir : droite de régression (valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées)*



*Figure 11 – Estimation des concentrations de fond sur les stations industrielles. Nombres de dépassements estimés (en ordonnée) et mesurés (en abscisse) (corrélation=0,58).*

*En rouge : bissectrice. En noir : droite de régression (valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées)*

Les stations pour lesquelles les nombres de dépassements mesurés et estimés en 2007 sont respectivement supérieurs (strictement) et inférieurs à 35 sont les suivantes :

01005 (Hayange) ; 02029 (Châteauneuf-La-Mède) ; 03030 (Gardanne) ; 20029 (FEYZIN-STADE) ; 24021 (Peillon) ; 24023 (Contes2) ; 30030 (Neuves-Maisons)

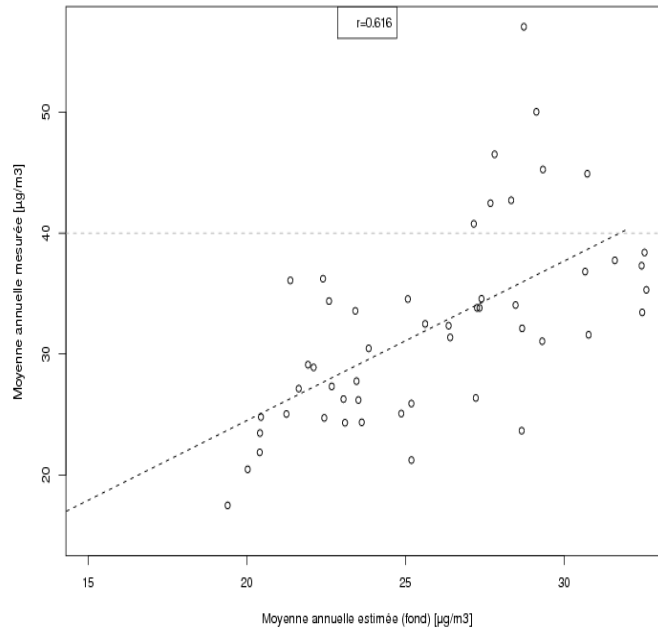


Figure 12 – Estimation des concentrations de fond sur les stations de trafic. Moyenne sur l'année 2007 des valeurs journalières estimées (en ordonnée) et mesurées (en abscisse) (corrélation=0,62). En noir : droite de régression

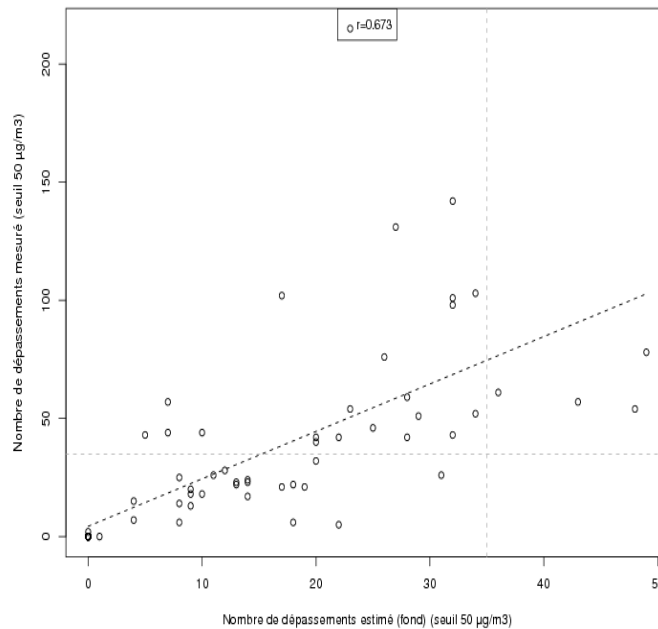


Figure 13 – Estimation des concentrations de fond sur les stations de trafic. Nombres de dépassements de estimés (en ordonnée) et mesurés (en abscisse) (corrélation=0,67). En noir : droite de régression

## **ANNEXE 3**

### **Brève analyse bibliographique sur la décroissance des concentrations de part et d'autre des routes**

Plusieurs auteurs et AASQA ont étudié la décroissance des concentrations à proximité des routes. La majorité des travaux est consacrée aux oxydes d'azote. Quel que soit le type de route ou de rue, la concentration de NO<sub>2</sub> décroît selon un gradient marqué et rejoint le niveau de fond à une distance de la route de quelques dizaines à quelques centaines de mètres (voir par exemple Wroblewski et al., 2007, Séguret et al., 2006, Deletraz et Dabos, 2001)

Le surcroît de concentration lié aux émissions routières diminue généralement d'un facteur 2 sur les cent premiers mètres, pour une distance d'impact rarement supérieure à 300-400 mètres (voir par exemple Gilbert, 2003). Des modèles analytiques – qui requièrent un calibrage local - ont été développés pour modéliser cette décroissance (Fau-Kessler et al., 2008) : modèle exponentiel, modèle linéaire en fonction du logarithme de la distance (Pleijel et al., 2004), fonction puissance (Zou et al., 2006). Des décroissances du même type ont été mises en évidence pour les particules ultrafines (Morawska et al., 2008, Hagler et al., 2009).

Pour les PM<sub>10</sub> et les PM<sub>2.5</sub> en revanche, les résultats sont moins nets. Le gradient latéral de concentration est faible (Naser et al., 2009) voire nul (Roorda-Knappe et al., 1999). Dans une étude conduite à proximité du périphérique à Gentilly (AIRPARIF, 2008, AIRPARIF constate cependant que les émissions routières ont une influence sur les PM<sub>10</sub> de moindre portée (~100m) que sur le NO<sub>2</sub> (~200m).

D'autre part, la dépendance de la décroissance vis-à-vis du milieu est peu aisée à établir. Certaines AASQA consultées (ATMO PACA, ATMO Rhône-Alpes) observent des distances d'impact plus courtes dans les zones de bâti dense (l'impact du trafic reste concentré dans la rue) que dans les zones de bâti discontinu. Dans d'autres cas, la décroissance se révèle plus lente en milieu urbain dense (niveau de fond plus élevé) qu'en milieu urbain lâche (AIRPARIF, 2005, 2004).

## Références :

AIRPARIF, 2008. Caractérisation de la qualité de l'air à proximité des voies à grande circulation. Premier volet. Campagne de mesure portant sur le boulevard périphérique au niveau de la porte de Gentilly. [www.airparif.asso.fr](http://www.airparif.asso.fr).

AIRPARIF, « Caractérisation de la qualité de l'air à proximité de l'autoroute A4 sur la commune de Charenton-le-Pont (94) », Rapport d'étude, 43 pages, août 2005. [www.airparif.asso.fr](http://www.airparif.asso.fr)

AIRPARIF, « Caractérisation de la qualité de l'air au voisinage d'un échangeur autoroutier urbain. L'échangeur entre le boulevard périphérique et l'autoroute A3 au niveau de la Porte de Bagnolet », Rapport d'étude, 83 pages, décembre 2004. [www.airparif.asso.fr](http://www.airparif.asso.fr)

Deletraz, G., Dabos, P. 2001. Modélisation statistique de la pollution azotée à proximité d'un axe routier et évaluation des incidences sur l'environnement. Colloque Risques – octobre 2001, Besançon.

Fau-Kessler T., Kirchner M., Jakobi G., 2008. Modelling the decay of concentrations of nitrogenous compounds with distance from roads. *Atmospheric Environment*, 42, 4589-4600.

Gilbert, N.L., Woodhouse, S., Stieb, D.M., Brook, J.R., 2003. Ambient nitrogen dioxide and distance from a major highway. *The Science of the Total Environment*, 312, 43-46.

Hagler G.S.W., Baldauf R.W., Thoma E.D., Long T.R., Snow R.F., Kinsey J.S., Oudejans L., Gullett B.K., 2009. Ultrafine particles near a major roadway in Raleigh, North Carolina: Downwind attenuation and correlation with traffic-related pollutants. *Atmospheric Environment*, 43, 1229-1234.

Kodama, Y., Arashidani, K., Tokui, N., Kawamoto, T., Matsuno, K., Kunugita, N., Minakawa, N., 2002. Environmental NO<sub>2</sub> concentration and exposure in daily life along main roads in Tokyo. *Environmental Research, Section A*, 89, 236-244.

Morawska L., Ristovski Z., Jayaratne E.R., Keogh D.U., Ling X., 2008. Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmospheric Environment*, 42, 8113-8138.

Naser T.M., Kanda I., Ohara T., Sakamoto K., Kobayashi S., Nitta H., Nataami T., 2009. Analysis of traffic-related NO<sub>x</sub> and EC concentrations at various distances from major roads in Japan, *Atmospheric Environment*, 43, 2379-2390.

Pleijel H., Karlsson G.P., Gerdin E.E., 2004. On the logarithmic relationship between NO<sub>2</sub> concentration and the distance from a highroad. *Science of the Total Environment*, 332, 261-264.

Roorda-Knape, M., Janssen, N.A.H., Hartog (de), J., Van Vliet, P.H.N., Harssema, H., Brunekreef, B., 1999. Traffic related air pollution in city districts near motorways, *The Science of the Total Environment*, 235, 339-341.

Séguret S., Malherbe L., Perron G., 2006. Mapping roadside nitrogen dioxide concentrations using non-stationary kriging. [http://www.lcsqa.org/system/files/TN\\_art\\_paper\\_Thur\\_Nov06\\_colour.pdf](http://www.lcsqa.org/system/files/TN_art_paper_Thur_Nov06_colour.pdf).

Wroblewski A., Riffault V., Malherbe L., Perdrix E., 2007. Adaptation des plans d'échantillonnage aux objectifs des campagnes : Echantillonnage spatial – Guide de recommandations. Rapport LCSQA, [www.lcsqa.org](http://www.lcsqa.org).

Zou X., Shen Z., Yuan T., Yin S., Cai J., Chen L., Wang W., 2006. Shifted power-law relationship between NO<sub>2</sub> concentration and the distance from a highway: a new dispersion model based on the wind profile. *Atmospheric Environment*, 40, 8068-8073.