



HAL
open science

Adaptation des plans d'échantillonnage aux objectifs de campagne : Echantillonnage spatial – Guide de recommandations

André Wroblewski, Véronique Riffault, Esperanza Perdrix, Laure Malherbe

► To cite this version:

André Wroblewski, Véronique Riffault, Esperanza Perdrix, Laure Malherbe. Adaptation des plans d'échantillonnage aux objectifs de campagne : Echantillonnage spatial – Guide de recommandations. Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA). 2007. hal-04244444

HAL Id: hal-04244444

<https://hal.science/hal-04244444>

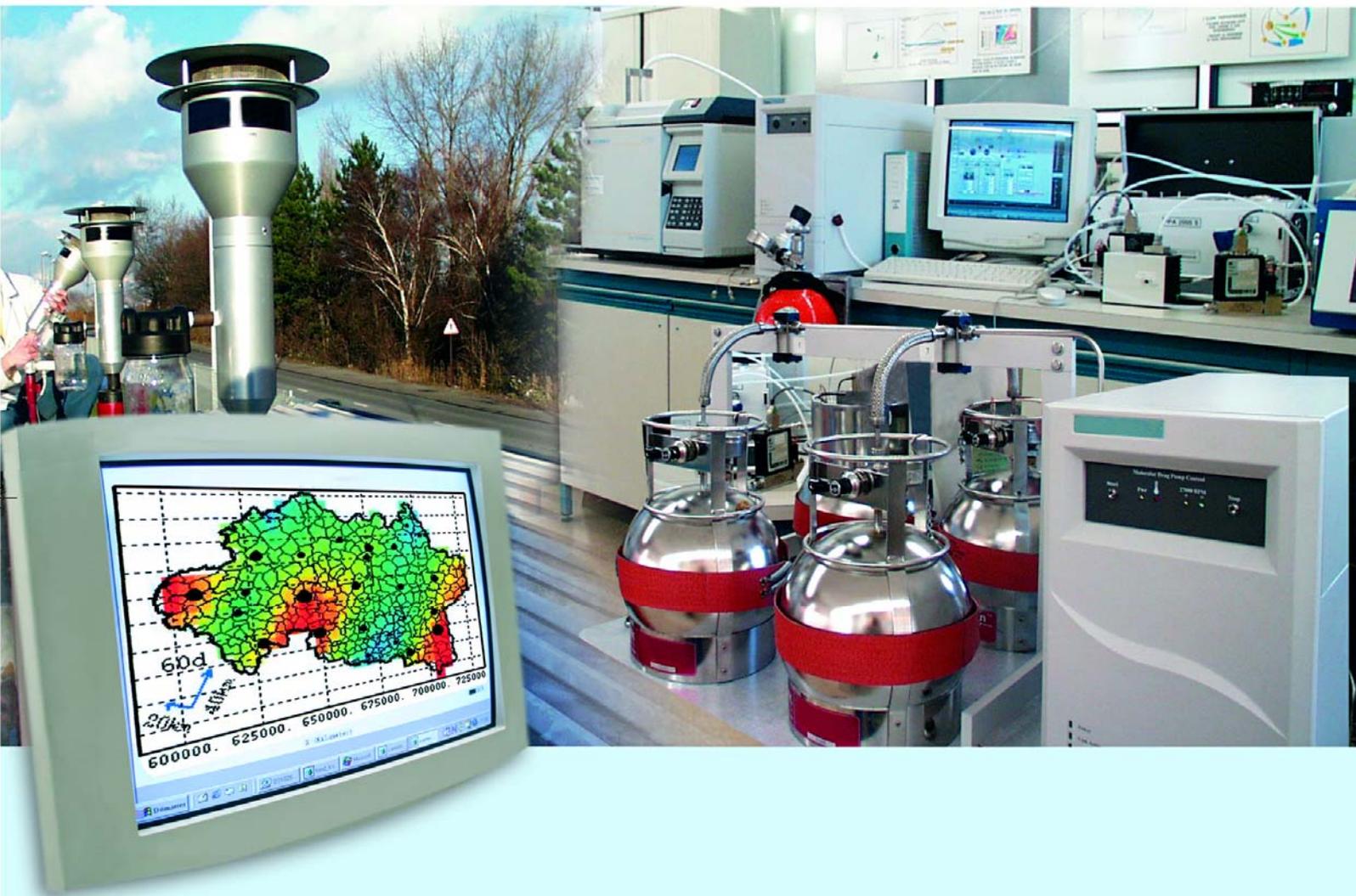
Submitted on 17 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



ADAPTATION DES PLANS D'ÉCHANTILLONNAGE AUX OBJECTIFS DES CAMPAGNES : **Echantillonnage spatial – Guide de recommandations**

Décembre 2007

Programme 2007

A. WROBLEWSKI, V. RIFFAULT, E. PERDRIX
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 et du Développement Durable sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique aux AASQA.

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

ECOLE DES MINES DE DOUAI

DEPARTEMENT CHIMIE ET ENVIRONNEMENT

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

Echantillonnage spatial – Guide de recommandations

Convention 000070

Décembre 2007

André WROBLEWSKI, Véronique RIFFAULT et Esperanza PERDRIX



ADAPTATION DES PLANS D'ÉCHANTILLONNAGE AUX OBJECTIFS DES CAMPAGNES :

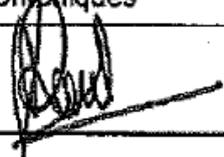
Echantillonnage spatial – Guide de recommandations

Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

Thème : Traitements numériques

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

Décembre 2007

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Laure MALHERBE	Laurence ROUÏL	M.RAMEL
Qualité	Ingénieur d'études Direction des Risques Chroniques	Responsable de l'unité MECO Direction des Risques Chroniques	Responsable LCSQA/INERIS Direction des Risques Chroniques
Visa			pp. 

Résumé de l'étude EMD/INERIS 2007

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

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

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

Ce document traite de la stratégie d'échantillonnage spatial et du dimensionnement des campagnes de mesure du dioxyde d'azote, de l'ozone ou du benzène, par tube à diffusion passive, en fonction des objectifs des campagnes :

- surveillance des zones rurales non couvertes par les stations de mesures (couverture hors zone agglomération) ou de domaines régionaux incluant de telles zones ;
- surveillance des villes ;
- surveillance d'un site ou d'une zone industriels ;
- surveillance d'une zone aéroportuaire ;
- surveillance d'une zone de proximité routière ;
- implantation d'une nouvelle station de mesure ;
- validation ou correction de modèles.

Il résulte de trois années de travaux conduits entre 2005 et 2007.

Les deux premières années ont été principalement consacrées à l'étude des zones rurales ou régionales et des villes de moins de 100000 habitants. Les observations et recommandations correspondantes reposent en grande partie sur l'exploitation géostatistique de données issues de campagnes de mesure ou, à défaut, de simulations déterministes permettant de disposer de « sites virtuels ». Les données sélectionnées auprès des AASQA présentent les caractéristiques suivantes :

- durée d'échantillonnage supérieure ou égale à une semaine ;
- nombre de points de mesure supérieur ou égal à trente.

Ce dernier critère correspond à la condition nécessaire pour qu'une exploitation géostatistique des données soit possible.

La démarche a consisté à tester deux types de maillages : le maillage régulier d'une part, et, pour le dioxyde d'azote, le maillage irrégulier (ou stratifié ou déstructuré) d'autre part.

Un maillage régulier peut être conçu sans rien connaître du territoire à surveiller. En revanche, le maillage irrégulier s'appuie sur la connaissance d'une information additionnelle (ou variable auxiliaire) relative au territoire à surveiller : altitude, densité de population, réseau routier, etc. Etant donné que l'inventaire national des émissions est en cours de réalisation, nous avons pris comme hypothèse, pour cette étude, que toutes les AASQA disposeraient, dans un futur proche, d'un cadastre spatialisé des émissions à l'aide duquel elles pourraient définir des stratégies d'échantillonnage irrégulier.

Pour chaque polluant, différentes tailles de maille (pour un maillage régulier ou irrégulier pour le dioxyde d'azote) et différentes variables auxiliaires ont été testées. Chaque nouveau plan d'échantillonnage a été évalué par rapport à un scénario de référence, correspondant au jeu de données le plus complet possible. La comparaison porte sur les paramètres statistiques des données et sur la qualité des variogrammes expérimentaux et modélisés. La carte de krigeage a été également confrontée à l'estimation de référence. L'objectif était de mettre en évidence des stratégies d'échantillonnage conduisant au plus petit nombre de points de mesure (et donc au moindre coût), sans nuire à la qualité (justesse) de la représentation cartographique du phénomène de pollution.

La question de l'échantillonnage spatial en vue d'implanter une station ou dans l'intention d'évaluer ou de corriger un modèle n'a pas fait l'objet de calculs mais des réponses partielles ont été obtenues grâce à l'expérience des AASQA et du LCSQA.

Les travaux de l'année 2007 ont été consacrés à l'étude des villes de plus de 100000 habitants, des zones industrielles, aéroportuaires et sous influence du trafic automobile. Les préconisations émises découlent d'une analyse bibliographique approfondie des campagnes de mesure réalisées par les AASQA et d'un traitement géostatistique de jeux de données, qui comprenait, lorsque c'était possible, des tests de sensibilité à la maille d'échantillonnage.

Les jeux de données exploités dans les calculs ont été fournis par les associations suivantes :

- pour le dioxyde d'azote : AIRAQ, Air C.O.M., AIRPARIF, ATMO Champagne-Ardenne, ATMO Poitou-Charentes, LIG'AIR, MADININAIR ;
- pour l'ozone : AIRAQ, ATMO Auvergne et le GIERSA (Rhône-Alpes) ;
- pour le benzène : AIRAQ, Air Normand, AIRPARIF, ATMO Champagne-Ardenne, ATMO Nord-Pas-de-Calais, LIG'AIR.

Les résultats de l'étude sont présentés sous forme d'un :

« Guide de recommandations pour l'échantillonnage spatial du dioxyde d'azote, de l'ozone et du benzène, par diffusion passive, en vue de réaliser des cartographies par géostatistique – Version 2 ».

Comme la variabilité spatiale des concentrations dépend des polluants, les recommandations d'échantillonnage sont présentées polluant par polluant.

Le guide comprend donc cinq chapitres : les trois premiers rassemblent, pour chacun des polluants (dioxyde d'azote, ozone et benzène), les préconisations sur les plans d'échantillonnage dans les différentes zones considérées ; les deux derniers fournissent des recommandations d'échantillonnage pour l'implantation d'une station fixe, l'évaluation de modèles ou la réalisation de cartes analysées. Les études détaillées des différents jeux de données et l'analyse bibliographique réalisée en 2007 sont accessibles sur le site Internet du LCSQA (www.lcsqa.org) sous le titre : « Adaptation des plans d'échantillonnage aux objectifs des campagnes : Echantillonnage spatial – Annexes ».

Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l’Air

GUIDE DE RECOMMANDATIONS
POUR L’ECHANTILLONNAGE SPATIAL
DU DIOXYDE D’AZOTE, DE L’OZONE ET DU BENZENE,
PAR DIFFUSION PASSIVE,
EN VUE DE REALISER DES CARTOGRAPHIES
PAR GEOSTATISTIQUE

VERSION 2

Laure MALHERBE, André WROBLEWSKI,
Véronique RIFFAULT, Esperanza PERDRIX

DECEMBRE 2007

SOMMAIRE

PREAMBULE.....	12
1. CARTOGRAPHIE DU NO₂.....	15
1.1 INTRODUCTION	15
- Caractéristiques physico-chimiques du dioxyde d'azote	15
- Réglementation relative au dioxyde d'azote	15
- Echantillonnage passif du dioxyde d'azote	16
- Caractéristiques des sites d'échantillonnage du dioxyde d'azote.....	16
- Caractéristiques géostatistiques du dioxyde d'azote	16
- Recommandations générales	17
1.2 ZONES RURALES OU RÉGIONALES	19
- Liste des jeux de données traités	19
- Recommandations	19
- Limites	20
1.3 ZONES URBAINES	20
1.3.1 <i>Villes de moins de 100000 habitants</i>	20
- Liste des jeux de données traités	20
- Recommandations	20
- Limites	21
1.3.2 <i>Villes de plus de 100000 habitants</i>	21
- Liste des jeux de données traités	21
- Recommandations	21
1.4 ZONES AÉROPORTUAIRES.....	21
1.4.1 <i>Plates-formes aéroportuaires</i>	22
- Liste des jeux de données étudiés.....	22
- Remarques	22
- Recommandations	22
1.4.2 <i>Environnement des plates-formes aéroportuaires</i>	22
- Liste des jeux de données étudiés.....	22
- Remarques	22
- Recommandations	23
1.5 SITES ET ZONES INDUSTRIELS	23
- Remarques générales	23
1.5.1 <i>Sites industriels</i>	23
- Liste des jeux de données étudiés.....	23
- Recommandations	23
1.5.2 <i>Zones industrielles</i>	24
- Liste des jeux de données étudiés.....	24
- Recommandations	24
1.6 ZONES DE PROXIMITÉ ROUTIÈRE	24
- Liste des jeux de données étudiés.....	24
- Remarques	24
- Recommandations	24

2. CARTOGRAPHIE DE L'OZONE (O₃)	26
2.1 INTRODUCTION	26
- Caractéristiques physico-chimiques de l'ozone	26
- Réglementation relative à l'ozone	26
- Echantillonnage passif de l'ozone	27
- Caractéristiques des sites d'échantillonnage de l'ozone	27
- Caractéristiques géostatistiques de l'ozone	28
- Recommandations générales	28
2.2 ZONES RURALES OU RÉGIONALES	29
- Liste des jeux de données traités	29
- Recommandations	29
- Limites	30
3. CARTOGRAPHIE DU BENZÈNE (C₆H₆)	31
3.1 INTRODUCTION	31
- Caractéristiques physico-chimiques du benzène	31
- Réglementation.....	31
- Echantillonnage passif du benzène.....	31
- Caractéristiques des sites d'échantillonnage du benzène	32
- Caractéristiques géostatistiques du benzène.....	32
- Recommandations générales	33
3.2 ZONES URBAINES	34
3.2.1 <i>Villes de moins de 100000 habitants</i>	34
- Liste des jeux de données traités	34
- Recommandations	34
- Limites	34
3.2.2 <i>Villes de plus de 100000 habitants</i>	35
- Liste des jeux de données traités	35
- Recommandations	35
3.3 ZONES AÉROPORTUAIRES.....	35
3.3.1 <i>Plates-formes aéroportuaires</i>	36
- Liste des jeux de données étudiés.....	36
- Remarques	36
- Recommandations	36
3.3.2 <i>Environnement des plates-formes aéroportuaires</i>	36
- Liste des jeux de données étudiés.....	36
- Remarques	37
- Recommandations	37
3.4 SITES ET ZONES INDUSTRIELS	37
- Remarques générales	37
3.4.1 <i>Sites industriels</i>	37
- Liste des jeux de données étudiés.....	37
- Recommandations	38
3.4.2 <i>Zones industrielles</i>	38
- Liste des jeux de données étudiés.....	38
- Recommandations	39
3.5 ZONES DE PROXIMITÉ ROUTIÈRE	39
- Liste des jeux de données étudiés.....	39
- Remarques	39
- Recommandations	39

4. IMPLANTATION OU VALIDATION D'UNE STATION FIXE	41
5. VALIDATION DE MODÈLES, ASSIMILATION DE DONNÉES.....	41
5.1 VALIDATION DE MODÈLES	41
5.2 RÉALISATION DE CARTES ANALYSÉES	43
6. CONCLUSION	45
7. BIBLIOGRAPHIE	46
8. LISTE DES ANNEXES	50
GLOSSAIRE.....	Annexe 1

PREAMBULE

Ce guide rassemble des **RECOMMANDATIONS** concernant la **STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE SPATIAL** des polluants :

- **dioxyde d'azote (NO₂)**
- **ozone (O₃)**
- **benzène (C₆H₆)**

PAR ECHANTILLONNAGE PASSIF, EN FONCTION DES OBJECTIFS DES CAMPAGNES :

- **surveillance de zones rurales non couvertes par des stations fixes de mesures** (couverture hors zone agglomération) ou de **domaines régionaux** incluant de telles zones ;
- **surveillance de villes de 10.000 à plus de 100.000 habitants ;**
- **surveillance d'un site ou d'une zone industriels ;**
- **surveillance d'une zone aéroportuaire ;**
- **surveillance en zone de proximité automobile ;**
- **implantation d'une nouvelle station de mesure ;**
- **validation ou correction de modèles.**

L'objectif est de proposer des recommandations sur le **NOMBRE DE POINTS D'ECHANTILLONNAGE** nécessaires et sur leur **REPARTITION SPATIALE EN 2D**, de façon à faciliter le dimensionnement des campagnes.

Pour les cinq premiers points, ce guide se limite au cas de **campagnes réalisées par échantillonnage passif et destinées à être valorisées sous forme de CARTOGRAPHIES PAR GEOSTATISTIQUE**. La géostatistique permet d'estimer la concentration d'un polluant en tout point d'un domaine, à partir d'un ensemble limité de données de concentration mesurées sur ce domaine. Néanmoins, afin qu'une exploitation géostatistique soit possible¹,

il faut que le nombre de points de mesure soit au moins égal à 30.

En ce qui concerne les zones rurales/régionales et urbaines, deux stratégies d'échantillonnage sont considérées et discutées :

- le **MAILLAGE REGULIER**, qui peut être élaboré sans rien connaître du territoire à surveiller ;

¹ Voir notamment Malherbe et Rouil, 2003 ou Cárdenas et Malherbe, 2002 et 2003.

- le **MAILLAGE IRREGULIER** (ou stratifié ou déstructuré), testé à l'échelle régionale et rurale pour le dioxyde d'azote, et qui repose sur une certaine connaissance du territoire à surveiller (connaissance ici apportée par l'inventaire des émissions de NO_x).

L'information additionnelle nécessaire pour concevoir un maillage irrégulier peut être de nature diverse : altitude, densité de population, réseau routier, occupation des sols, etc. Etant donné que l'inventaire national des émissions est en cours de réalisation, il est admis dans ce guide que :

toutes les AASQA disposeront à terme d'un cadastre spatialisé des émissions sur lequel elles pourront baser leurs plans d'échantillonnage irréguliers.

S'agissant des autres types de zones, le maillage régulier est encore considéré. Sont également prises en compte les stratégies suivantes :

- un **échantillonnage circulaire** autour de sources industrielles ;
- un échantillonnage réparti sur des droites perpendiculaires à une route. Celles-ci sont souvent appelées « **transects** », terme conservé dans la suite du guide.

Dans le cadre d'une exploitation géostatistique, les données ainsi recueillies doivent permettre le calcul du variogramme expérimental, outil d'analyse permettant d'apprécier la structure spatiale du phénomène de pollution atmosphérique, notamment son extension et sa variabilité spatiale. L'extension est définie par une dimension caractéristique, la **portée**, généralement exprimée en kilomètres.

Les recommandations d'échantillonnage reposent sur l'expérience acquise par les AASQA et le LCSQA dans ce domaine. L'expérience des AASQA a été recueillie dans les rapports d'étude, disponibles sur les sites Internet des AASQA ou transmis par les AASQA. Celle du LCSQA se fonde sur ses études passées, ainsi que sur des travaux complémentaires réalisés entre 2005 et 2007 et portant sur l'« adaptation des plans d'échantillonnage aux objectifs des campagnes ».

Ces travaux complémentaires utilisent des jeux de données issus de campagnes de mesures conduites par les AASQA ou de simulations numériques. Ils ont permis d'évaluer la variabilité spatiale des polluants dans différentes situations et de tester des plans d'échantillonnage réguliers et irréguliers en faisant varier le nombre de points de mesure (dans un souci de limiter l'investissement humain et financier). Chaque plan d'échantillonnage a été évalué par rapport à un scénario de référence correspondant au jeu de mesures complet. La comparaison a porté sur la conservation des paramètres statistiques des données et des variogrammes, ainsi que sur la qualité de l'estimation par krigeage et de la cartographie associée. Ces travaux ont permis d'affiner les recommandations relatives aux stratégies d'échantillonnage qui conduisent au plus petit nombre de points de mesure (moindre coût) tout en garantissant la qualité (justesse) de la représentation cartographique du phénomène de pollution.

Les jeux de données exploités dans ces calculs ont été fournis par les associations suivantes :

- pour le dioxyde d'azote : AIRAQ, Air C.O.M., AIRPARIF, ATMO Champagne-Ardenne, ATMO Poitou-Charentes, LIG'AIR, MADININAIR ;
- pour l'ozone : AIRAQ, ATMO Auvergne et le GIERSA (Rhône-Alpes) ;
- pour le benzène : AIRAQ, Air Normand, AIRPARIF, ATMO Champagne-Ardenne, ATMO Nord-Pas-de-Calais, LIG'AIR.

Le détail des travaux complémentaires réalisés entre 2005 et 2007 ainsi qu'une base de données bibliographiques sur l'échantillonnage dans les zones aéroportuaires et industrielles, les zones de proximité routière et les grandes villes sont accessibles sur le site Internet du LCSQA (Adaptation des plans d'échantillonnage aux objectifs des campagnes : Echantillonnage spatial – Annexes. www.lcsqa.org).

Comme la répartition spatiale des concentrations est plus ou moins homogène selon les polluants, les recommandations d'échantillonnage sont présentées polluant par polluant. Si elles sont communes à plusieurs composés, notamment au dioxyde d'azote et au benzène, elles sont reproduites dans les chapitres correspondants, de façon que chacun d'eux puisse être lu séparément.

Le présent guide comprend donc cinq chapitres : les trois premiers rassemblent, pour chacun des polluants (dioxyde d'azote, ozone et benzène), les préconisations sur les plans d'échantillonnage dans les différentes zones considérées ; les deux derniers fournissent des recommandations d'échantillonnage pour l'implantation d'une station fixe, la validation de modèles ou la réalisation de cartes analysées. Un glossaire est joint à la fin du document.

1. CARTOGRAPHIE DU NO₂

1.1 Introduction

- *Caractéristiques physico-chimiques du dioxyde d'azote*

Les oxydes d'azote (NO et NO₂) sont produits lors des combustions à hautes températures (chaudières, moteurs,...), notamment par combinaison de l'azote (N₂) et de l'oxygène (O₂) de l'air. Le NO se transforme en présence d'oxygène en NO₂ (de 0,5 à 10 %) dans le foyer. Cette réaction se poursuit dans l'atmosphère et explique l'augmentation des teneurs en NO₂ et la diminution conjointe des teneurs en NO au fur et à mesure que l'on s'éloigne des zones d'émission.

En France, environ 30% des NO_x sont émis par l'industrie et le chauffage domestique, et 70% par les véhicules à moteur. A ce titre, les NO_x sont des indicateurs de la pollution automobile.

Leur concentration est plus élevée en hiver qu'en été, en raison notamment d'un accroissement hivernal des émissions (chauffage urbain), d'une stabilité accrue de l'atmosphère et des faibles teneurs en ozone en hiver.

- *Réglementation relative au dioxyde d'azote*

o Valeurs limites réglementaires

La directive européenne 1999/30/CE du Conseil du 22 avril 1999 impose des valeurs limites horaires ou annuelles, pour la protection de la santé humaine ou des écosystèmes.

Tableau 1. Valeurs limites réglementaires pour le dioxyde d'azote (directive européenne 1999/30/CE).

Polluant	Période de base	Valeur-limite en µg/m ³ (à 293°K et 101,3 kPa)	Objectif	Date d'entrée en vigueur
NO ₂	1 h	200 (< 18 dépass./an)	santé	01/01/2010
NO ₂	1 an	40	santé	01/01/2010
NO + NO ₂	1 an	30	écosystèmes	19/07/2001

o Qualité requise des cartes

La qualité requise pour la cartographie du NO₂ peut se déduire, indirectement, de l'Annexe VIII de la Directive Européenne 1999/30/CE (SO₂, NO₂, NO_x, PM, Pb) qui fixe :

- dans le cas d'une modélisation de la moyenne annuelle, un objectif de 30% pour l'incertitude ;
- dans le cas d'une estimation objective, quel que soit le type de moyenne considéré, un objectif de 75% pour l'incertitude.

Cette incertitude se définit comme l'écart relatif entre le modèle et la mesure.

- *Echantillonnage passif du dioxyde d'azote*

Le dioxyde d'azote peut être mesuré par échantillonnage passif, au moyen de systèmes à diffusion axiale ou radiale. Suivant le type d'échantillonneur utilisé, les durées d'exposition varient de 8 heures à 4 semaines. De nombreuses campagnes de mesure sont effectuées avec une durée d'exposition de 2 semaines.

L'analyse se fait par spectrophotométrie ou chromatographie ionique.

L'incertitude de mesure sur les faibles concentrations a été estimée à 5 à 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

L'incertitude relative de mesure est de l'ordre de 20 à 35%.

Un ouvrage collectif « Echantillonneurs passifs pour le dioxyde d'azote » synthétise l'expérience française dans ce domaine (ADEME/LCSQA/Fédération ATMO, 2004).

- *Caractéristiques des sites d'échantillonnage du dioxyde d'azote*

Du fait de la multiplicité de ses sources (urbaines, industrielles) et de ses effets (sur la santé humaine, les écosystèmes), le dioxyde d'azote est un polluant surveillé dans tous les types de sites : urbains, industriels et ruraux. La cartographie du NO_2 concerne toutes les échelles : rue, ville, campagne, département, région, pays.

- *Caractéristiques géostatistiques du dioxyde d'azote*

Pour le dioxyde d'azote, la portée du phénomène varie suivant la taille du domaine exploré, puisque la variabilité de ce polluant peut concerner toutes les échelles, d'une rue à un pays.

Elle varie aussi suivant les saisons ; elle est généralement plus faible en période estivale et plus importante en période hivernale.

Tableau 2. Portée spatiale du dioxyde d'azote. Exemples de valeurs selon l'échelle du domaine.

Echelle	Localisation	Saison	Portée variographique	Référence
Plate-forme aéroportuaire				
Locale <20 km ²	Bordeaux-Mérignac	Printemps 2001 et 2003 Automne 2004	800-1200 m et 2km-2,6km (2 structures)	Cette étude et AIRAQ (2001, 2003, 2005)
Périphérie d'une plate-forme aéroportuaire				
Locale/urbaine <200 km ²	Orly	Hiver 2003	2,8 km et 6 km (2 structures)	Cette étude
Locale/urbaine <200 km ²	Roissy - Le Bourget	Hiver et été 2002	7,5km (hiver) 10 km (été)	Cette étude
Zone urbaine				
Urbaine <200 km ²	Bourg-en-Bresse	Eté 2001 Hiver 2001/2002	2,4 km 2,6 km	Malherbe et Cárdenas, 2004
Urbaine <200 km ²	Cherbourg	Fév. 2000	3-4 km	Ozdowski, 2000 et Wroblewski et Malherbe, 2005

Urbaine <200 km ²	La Rochelle	Eté et hiver 2004	4 km	Wroblewski et Malherbe, 2005
Urbaine <200 km ²	Mulhouse	Hiver et été 2001	5 km + structure linéaire	Aspa, 2002 et de Fouquet et al., 2007
Urbaine <200 km ²	Reims	Hiver 2002-2003 Eté 2003	4-5 km (selon la direction) 2,8-5 km (selon la direction)	Cárdenas et Perdrix, 2006
Urbaine <200 km ²	Rouen	Année 2000 Année 2005	5 km	Cori, 2005. Cardenas et Malherbe, 2007.
Urbaine > 200 km ²	Bordeaux	Eté 2004 Hiver 2005	8 km	AIRAO, 2005 Cette étude
Urbaine 1580 km ²	Arrondissement de Lille	Eté 2003 Hiver 2004	15 km 10 km	Cárdenas et Perdrix, 2006
Urbaine 1100 km ²	Agglomération parisienne (petite couronne)	2000-2001	15-20 km	Cette étude
Zone régionale				
Zone rurale 4.356 km ²	Zone entre Chartres et Orléans	Eté 2002 et printemps 2003	30 km	Olivier, 2006
Zone urbaine 6.750 km ²	Région parisienne	1997-1999	35 km	Bobbia et al., 2000
Région 8.280 km ²	Alsace	2004	50 km	Perron et Jeannée, 2005
Région 25.606 km ²	Champagne- Ardenne	Eté 2005 Hiver 2005	9km et 40 km 13 km et 85 km	Cette étude
Région 39.151 km ²	Centre	Hiver 2005	20,5 km	Malherbe et Cárdenas, 2005
Zone nationale				
Inter-régions 56.000 km ²	Régions du nord de la France	Eté 2000	20 km (zone urbaine)	Air Normand et al., 2002
			200 km (zone rurale)	
Pays 544.000 km ²	France	Eté 2003	80-100 km	Honoré et Malherbe, 2004

- *Recommandations générales*

La cartographie du dioxyde d'azote à partir de mesures par échantillonnage passif convient, en particulier, à la surveillance du respect des valeurs-limites annuelles. Dans ce cas, il est nécessaire de conduire plusieurs campagnes de mesure au cours de l'année civile, notamment en hiver et en été, de façon à obtenir une estimation suffisamment précise de la moyenne. La question du nombre de campagnes à mener relève de l'échantillonnage temporel, thématique non traitée dans ce guide (travaux en cours dans le cadre du GT *Plans d'échantillonnage et reconstitution de données*).

L'espacement entre les points de mesure doit être inférieur à la portée du phénomène. Il existe à ce jour deux façons de réaliser une cartographie moyenne annuelle (Malherbe et Wroblewski, 2006) :

- l'estimation annuelle est établie à partir des données expérimentales moyennes sur l'année. Dans ce cas, il convient de mesurer le NO₂ aux mêmes points en été et en hiver. Or, la portée variant d'une saison à l'autre, il est nécessaire de considérer un espacement entre les points qui soit inférieur à la portée la plus faible, soit généralement la portée estivale ;
- l'estimation annuelle découle des estimations saisonnières. Un plan d'échantillonnage peut être ajusté pour chaque saison mais on veillera à conserver un nombre suffisant de sites communs à l'été et à l'hiver, et cela, sur l'ensemble du domaine.

D'autre part, comme il est indiqué en introduction, la réalisation d'une cartographie par géostatistique nécessite de calculer un variogramme expérimental. La partie du variogramme relative aux distances entre points inférieures à la portée est la plus importante, puisqu'elle renseigne sur la continuité du phénomène. Il est donc impératif de pouvoir la déterminer convenablement, en prévoyant notamment un nombre de couples de points suffisant pour au moins deux distances comprises entre zéro et la portée. On peut raisonnablement proposer de placer des points de mesure séparés de distances égales à :

- zéro (multiplets de points localisés au même emplacement),
- la portée / 3 (soit un tiers de la portée),
- la portée × 2 / 3 (soit les deux tiers de la portée).

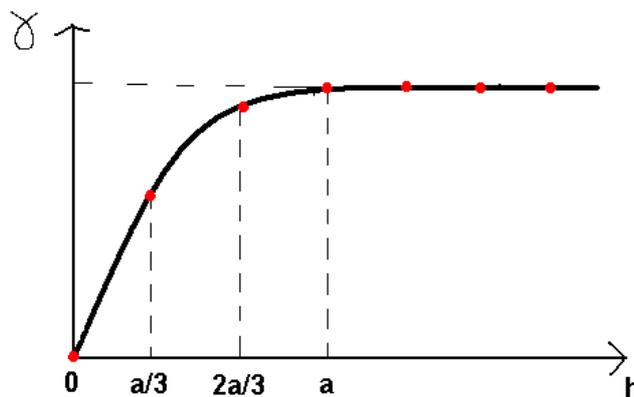


Figure 1 – Schéma d'un variogramme (en rouge, les points expérimentaux ; en noir le variogramme modélisé) renseigné pour au moins deux distances ($a/3$ et $2a/3$) entre zéro et la portée (a).

Pour des points d'échantillonnage répartis exclusivement selon un maillage régulier, il faut donc que la maille soit de taille inférieure ou égale au tiers de la portée. Dans le cas du NO₂, il convient de distinguer l'échelle de la zone surveillée : locale (étude de zones particulières), urbaine, régionale ou nationale (cf. Tableau 2).

Dans un exemple de *plate-forme aéroportuaire*, où la plus courte portée varie entre 800 et 1200 m, cela conduit à considérer une taille de maille de 300 à 400 m.

En *zone urbaine*, où la portée varie entre 2,4 et 8 km (les très grandes agglomérations mises à part) cela conduit à considérer des tailles de maille comprises respectivement entre 800 m et 2,6 km maximum.

En *zone régionale*, où la portée varie entre 20 et 50 km, cela conduit à considérer des tailles de maille comprises respectivement *entre 6,5 km et 16,5 km maximum*.

En *zone nationale* (plusieurs régions ou un pays), où la portée varie entre 80 et 200 km, cela conduit à considérer des tailles de maille comprises respectivement *entre 26 km et 66 km maximum*.

Ces recommandations générales sont complétées, aux paragraphes suivants (§1.2 à 1.6), par des recommandations plus spécifiques fondées sur l'étude approfondie de jeux de données.

1.2 Zones rurales ou régionales

- *Liste des jeux de données traités*

A l'échelle rurale ou régionale, deux jeux de données, suffisamment riches en points de mesure, ont été étudiés :

- une zone rurale en région Centre (données issues de simulations numériques et données de campagnes de mesure) d'une superficie de 4 356 km² ;
- la région Champagne-Ardenne (données issues de campagnes de mesure) d'une superficie de 25 606 km².

- *Recommandations*

- o Sans variables auxiliaires - échantillonnage régulier

En **zone régionale**, la taille de maille recommandée est d'environ **10 à 15 km**, soit 1 point pour 100 à 225 km². Au-delà, la carte s'altère sensiblement même si, en validation croisée comme en validation absolue, l'erreur relative peut respecter l'objectif de 30% sur au moins 90% des points.

Sur un **domaine régional plus restreint, majoritairement rural mais soumis à des influences routières**, une maille de **6 km** de côté semble nécessaire pour vérifier les critères de qualité, soit une densité d'échantillonnage d'environ 1 point pour 45 km².

- o Avec variables auxiliaires - échantillonnage régulier

Si l'existence d'une bonne corrélation avec des variables auxiliaires, par exemple les émissions et la densité de population, est montrée, alors un maillage plus lâche est possible. La taille de maille recommandée est de **25 à 30 km**, soit 1 point pour 625 à 900 km². Il est néanmoins recommandé de resserrer la maille si le nombre de points est inférieur à 50.

En zone rurale sous influence routière, l'apport d'une variable auxiliaire, par exemple les émissions, est important, notamment lorsque la densité d'échantillonnage est assez faible.

- Avec variables auxiliaires - échantillonnage stratifié en fonction des émissions

Dans une étude à l'échelle rurale ou régionale, l'apport de l'échantillonnage stratifié ne paraît pas flagrant, en comparaison d'un échantillonnage régulier. Cette dernière stratégie, plus rapide à définir, peut donc suffire. Néanmoins, si des variables auxiliaires sont utilisées dans l'estimation, on s'assurera qu'aux points de mesure, elles parcourent bien la même gamme de valeurs que sur tout le domaine.

- *Limites*

Même avec un échantillonnage relativement dense (maille de 10 km à 15 km), il se peut qu'à l'échelle régionale, en été, sans variables auxiliaires, la faiblesse des concentrations (proches de la limite de quantification) et le caractère moins structuré du variogramme rendent les résultats de l'estimation assez peu précis. Il convient alors soit de réduire la taille de la maille (~6 km), ce qui conduit à augmenter sensiblement le nombre de points, soit de rechercher des variables explicatives adaptées à l'été.

1.3 Zones urbaines

1.3.1 Villes de moins de 100000 habitants

- *Liste des jeux de données traités*

A l'échelle urbaine, trois jeux de données suffisamment riches en points de mesure et correspondant à des villes dont la population est comprise entre 10000 et 100000 habitants, ont été étudiés :

- Le Robert (21 300 habitants, 47,3 km², Martinique) ;
- Cherbourg-Octeville (44 100 habitants, 14,3 km², Manche) ;
- La Rochelle (78 000 habitants, 28,4 km², Charente-Maritime).

Remarque : Les domaines d'étude, qui englobent les communes périphériques, s'étendent sur des surfaces de 50 à 200 km².

- *Recommandations*

La recommandation est la même selon qu'on dispose ou non d'une variable auxiliaire : 46 à 57 points, disposés selon une maille de **1 à 1,5 km** de côté, soit 1 point pour 1 à 2,25 km², sont nécessaires pour construire un modèle mono- ou multi-variable satisfaisant et restituer convenablement la variabilité spatiale de la concentration.

- *Limites*

L'étude du jeu de données du Robert montre que, dans le cas où les concentrations en polluant sont faibles (proches de la limite de quantification), l'approche géostatistique est inapplicable : la modélisation du variogramme se traduit par un effet pépitique pur.

1.3.2 Villes de plus de 100000 habitants

- *Liste des jeux de données traités*

A l'échelle urbaine, un jeu de données suffisamment riche en points de mesure et correspondant à des villes dont la population est supérieure à 100000 habitants, a été étudié :

- Bordeaux (230600 habitants, 49,4 km², Gironde).

Les recommandations s'appuient également sur l'analyse variographique (effectuée dans cette étude ou dans d'autres travaux du LCSQA) de jeux de données relatifs aux villes suivantes :

- Reims (191325 habitants, 46,9 km², Marne),
- Rouen (114 000 habitants, 21,4 km², Seine-Maritime),
- Lille Métropole (1,1 million d'habitants, 612 km², Nord),
- La petite couronne parisienne (7,5 millions d'habitants, 1100 km²).

Remarque : Les domaines d'étude, qui englobent les communes périphériques, s'étendent sur des surfaces de plus de 100 km².

- *Recommandations*

Les recommandations émises pour les villes de moins de 100000 habitants s'appliquent encore.

On distinguera toutefois le cas des grandes conurbations, caractérisées par un panache très étendu, et pour lesquelles une maille de 3 à 5 km de côté, soit 1 point pour 9 à 25 km², est suffisante.

1.4 Zones aéroportuaires

Cette rubrique regroupe deux catégories de campagnes :

- le domaine ciblé est la plate-forme aéroportuaire elle-même, et son proche voisinage ;
- le domaine ciblé n'est pas la plate-forme aéroportuaire mais son environnement proche et plus lointain.

1.4.1 Plates-formes aéroportuaires

- Liste des jeux de données étudiés

Plusieurs études d'AASQA, qui concernent les aéroports de Lyon, Montpellier, Mulhouse, Strasbourg, et Rochambeau (Guyane), ont été analysées.

Trois jeux de données collectés à des périodes différentes sur la zone aéroportuaire de Bordeaux-Mérignac ont fait l'objet d'un traitement géostatistique.

- Remarques

Les différentes campagnes de mesure montrent qu'au pas de temps considéré pour l'échantillonnage passif, les mouvements d'avions n'ont pas d'effet sensible sur les concentrations de NO₂. Celles-ci sont plutôt influencées par le panache de pollution de l'agglomération voisine et, localement, par le trafic engendré par l'activité aéroportuaire (voies de circulation, zones de stationnement temporaire, etc.)

- Recommandations

Pour une représentation détaillée des variations spatiales de concentration sur la plate-forme, un maillage régulier est préconisé, avec une taille de maille inférieure à 500 m.

Etant donné les considérations précédentes, il n'est pas nécessaire de disposer préférentiellement les points d'échantillonnage le long des pistes de décollage ou d'atterrissage.

1.4.2 Environnement des plates-formes aéroportuaires

- Liste des jeux de données étudiés

Les études d'AASQA citées en 1.4.1, et pour lesquelles l'échantillonnage s'étendait au-delà des plates-formes, ont été prises en compte.

Deux jeux de données issus de campagnes réalisées par AIRPARIF autour des aéroports d'Orly, et de Roissy-Le Bourget ont été exploités.

- Remarques

Un aéroport s'intègre dans un environnement le plus souvent urbanisé et traversé de grands axes routiers. Dans les campagnes de mesure considérées, les données d'échantillonnage passif ne mettent pas en évidence de panache de NO₂ centré sur l'aéroport.

- *Recommandations*

Compte tenu des remarques précédentes, et en particulier, du fait que le domaine d'étude englobe différents émetteurs, un maillage du domaine est recommandé. Selon le milieu, on se réfèrera aux préconisations émises pour les zones rurales ou urbaines.

Si en outre, certains axes de circulation font l'objet d'études spécifiques, on utilisera les recommandations propres aux zones de proximité routière.

1.5 Sites et zones industriels

Cette rubrique regroupe deux catégories de campagnes :

- le domaine ciblé est l'environnement d'un site industriel donné ;
- le domaine ciblé est une zone industrielle incluant diverses sources.

- *Remarques générales*

Les paragraphes suivants proposent des lignes directrices pour l'échantillonnage lorsqu'il s'agit de cartographier le NO₂ dans une zone sous influence industrielle. La particularité de chaque site (caractéristiques des sources, météorologie et conditions de dispersion, ...) ne permet pas de fournir des recommandations précises.

1.5.1 Sites industriels

- *Liste des jeux de données étudiés*

Les rapports de deux campagnes de mesure par échantillonnage passif portant l'une sur une verrerie et l'autre, sur une usine d'incinération d'ordures ménagères ont été consultés. Dans les autres études, le NO₂ a été mesuré par analyseur automatique. Les indications ci-dessous sont fondées sur ces études et sur des informations et résultats obtenus pour le benzène (§ 3.4).

- *Recommandations*

Si le site industriel représente la principale source de NO₂ dans la zone d'intérêt, un échantillonnage circulaire, capable de cerner correctement le panache de pollution est approprié. Il pourra s'étendre jusqu'à un rayon de quelques kilomètres autour du site (à titre indicatif : 3 à 5 km), la délimitation du domaine d'étude dépendant également de facteurs locaux : zones d'habitation, hauteur des émissions et distances d'impact supposées, etc. Ce type de plan d'échantillonnage, dont les exemples d'application concernent aussi les composés organiques volatils, est décrit plus en détail pour le benzène (§ 3.4).

Si l'environnement du site contient d'autres sources majeures de NO₂, en particulier de grands axes de circulation, un maillage d'échantillonnage régulier (à titre indicatif : maille de 250 m à 500 m), capable de saisir la variabilité des concentrations due à l'ensemble de ces émetteurs, pourra couvrir le domaine d'étude.

1.5.2 Zones industrielles

- Liste des jeux de données étudiés

Aucune des études examinées ne porte sur le NO₂. Les exemples rencontrés ont trait au benzène.

- Recommandations

Pour cartographier les concentrations résultant de la contribution simultanée de plusieurs sites industriels, un maillage régulier sur la zone est préconisé. La taille de la maille sera ajustée en fonction des dimensions du domaine, de la localisation des émetteurs et des informations disponibles sur la variabilité spatiale du phénomène.

1.6 Zones de proximité routière

- Liste des jeux de données étudiés

Les recommandations suivantes reposent sur la consultation d'un grand nombre d'études d'AASQA, commentées dans le rapport annexe, et d'un document du CERTU (2005).

- Remarques

Les campagnes d'échantillonnage par tubes considérées dans cette partie ont pour objet d'évaluer l'influence **locale immédiate** du ou des axes considérés, **en moyenne** sur une période donnée ou sur l'année.

- Recommandations

Un échantillonnage par « transects » est utile pour caractériser finement la variabilité spatiale des concentrations de NO₂ de chaque côté de la route. En outre, cette stratégie de mesure permet de déterminer le lien entre la concentration de NO₂ et la distance qui la sépare de la route ; or cette dernière variable peut constituer une variable auxiliaire pertinente pour la cartographie (EMD, 2005 ; Séguret, 2003 ; Gilbert et al., 2003 ; Deletraz et Dabos, 2001 ; Briggs, 2000).

- Dimension des transects

L'échantillonnage doit s'étendre jusqu'aux niveaux de fond de façon que la cartographie offre une image complète de l'évolution spatiale des concentrations de part et d'autre de la route.

Pour une portion de route donnée, les paramètres à considérer pour déterminer l'extension latérale minimale de la bande d'étude sont principalement :

- l'intensité du trafic et la vitesse de circulation. D'après un document du CERTU (2005), la distance d'influence de l'axe est d'autant plus grande que le trafic et/ou la vitesse de circulation sont plus intenses. Elle varie de 100 m à 300 m pour le NO₂.
- le type d'environnement (dégagé, urbanisé, très urbanisé). La décroissance des concentrations quand on s'éloigne de la route est plus lente en milieu construit, c'est-à-dire dans des conditions moins favorables à une dispersion rapide du polluant.

Si on se fie aux distances d'influence relevées dans la bibliographie, la largeur minimale préconisée par le CERTU pour la catégorie de trafic la plus importante, à savoir 300 m de chaque côté de l'axe, suffit dans la plupart des cas. Toutefois, pour les axes très fréquentés et situés dans une zone urbanisée, une valeur minimale de 400 à 500 m est suggérée.

- Sur un même transect, il est conseillé de séparer les points d'une distance inférieure ou égale au tiers de la portée supposée du phénomène, soit, à titre indicatif, d'une distance de 35 m à 100 m pour une portée comprise entre 100 m et 300 m.
- Afin d'évaluer la variabilité spatiale du NO₂ dans les différentes directions de l'espace, il convient de disposer plusieurs transects le long de l'axe. Si celui-ci présente des discontinuités (modification de la vitesse, du nombre de véhicules, du nombre de voies, ...), un minimum de deux transects par portion homogène de route est recommandé.
- En complément de cet échantillonnage,
 - des points de mesure pourront être ajoutés le long de la route ;
 - un maillage de fond pourra couvrir de façon homogène le domaine étudié si ce dernier s'étend au-delà de la bande d'influence précédemment définie. On se référera alors aux préconisations émises pour des zones rurales ou urbaines.

2. CARTOGRAPHIE DE L'OZONE (O₃)

2.1 Introduction

- Caractéristiques physico-chimiques de l'ozone

L'ozone (O₃) est le polluant photochimique majeur. Sa formation dans la troposphère résulte de transformations chimiques à partir des molécules de NO_x, CO et COV (les précurseurs d'ozone), sous l'effet du rayonnement solaire ultraviolet. Il se forme surtout en été.

L'ozone est un oxydant, qui réagit avec le monoxyde d'azote pour former du dioxyde d'azote :



Il en résulte que les teneurs en ozone sont généralement faibles dans les agglomérations, là où les teneurs en NO_x (et notamment en NO) sont élevées. En revanche, les teneurs en ozone sont importantes dans les zones péri-urbaines ou rurales, sous le vent des agglomérations (sources de précurseurs).

L'ozone n'est donc pas émis directement par les activités humaines. Il a cependant la particularité d'être aussi un composé naturel de l'atmosphère. La source principale d'ozone à l'échelle globale reste la formation naturelle dans la stratosphère, qui contient environ 90% de la quantité totale d'ozone de l'atmosphère. Cette source naturelle stratosphérique est à l'origine d'environ 20% de l'ozone de la troposphère, les 80% restants étant attribués à la source photochimique. Sa concentration de fond a quadruplé en un siècle pour atteindre aujourd'hui 100 µg/m³ en moyenne annuelle. L'accroissement est de l'ordre de 1 à 2 % par an. Cette augmentation est directement liée à celle des principaux précurseurs (Académie des Sciences, 1993).

- Réglementation relative à l'ozone

- o Valeurs cibles réglementaires

La Directive Européenne 2002/3/CE définit des valeurs cibles en ozone pour la protection de la santé humaine ou de la végétation :

Tableau 3. Valeurs limites réglementaires pour l'ozone (directive européenne 2002/3/CE).

Polluant	Période de base	Valeur-seuil (à 293°K et 101,3 kPa)	Objectif	Date d'entrée en vigueur
O ₃	8 h	120 µg/m ³ (< 25 j/an)	santé	01/01/2010
O ₃	Mai à Juillet	AOT40 ⁽¹⁾ < 18.000 µg/m ³ .h	écosystèmes	01/01/2010

(1) AOT 40 : cumul sur une période donnée des teneurs moyennes horaires en excès d'un seuil de 40 ppb (80 µg/m³)

- Qualité requise des cartes

La qualité requise pour la cartographie de l'O₃ peut se déduire indirectement de l'Annexe VII de la Directive Européenne 2002/3/CE qui fixe, en ce qui concerne l'incertitude :

- dans le cas d'une modélisation de la moyenne annuelle, un objectif de qualité de 50% ;
- dans le cas d'une estimation objective, quel que soit le type de moyenne considéré, un objectif de qualité de 75%.

- *Echantillonnage passif de l'ozone*

L'ozone peut être mesuré par échantillonnage passif, par tube de Palmes (diffusion axiale, exposition longue d'au moins 1 semaine) ou plus généralement par tube Radiello (diffusion radiale, exposition courte). Les analyses peuvent être menées par colorimétrie (très répétable) ou HPLC (plus sensible, moins répétable).

Afin de pouvoir satisfaire à la surveillance réglementaire pour la protection de la santé humaine (valeur moyenne calculée sur 8 heures), le tube Radiello a été évalué par le LCSQA pour une durée d'exposition de 8 heures (Piechocki et al. ; 2003). En ce qui concerne la justesse, les résultats des expositions sur 8 heures montrent un très bon accord ($R^2 = 0,90$) entre les valeurs des échantillonneurs munis de cartouches Radiello et les concentrations en ozone relevées par les analyseurs automatiques. La répétabilité est de l'ordre de 5%. La limite de détection de la méthode est d'environ 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (soit 12% de la valeur-seuil réglementaire sur 8 heures pour la protection de la santé humaine). Les incertitudes élargies associées aux mesures réalisées par les échantillonneurs munis de cartouches Radiello se situent à 23% pour une concentration en ozone de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pour des raisons pratiques, notamment logistiques, de nombreuses AASQA exposent les échantillonneurs passifs sur des durées de 7 jours. Dans ce cas, les réponses des tubes munis de cartouches Radiello sont toujours en bonne adéquation avec les mesures des analyseurs. Cependant, le coefficient de corrélation ($R^2=0,87$) est légèrement inférieur à celui obtenu pour les expositions de 8 heures ; la justesse est donc un peu moins bonne. La répétabilité reste cependant excellente (4%).

- *Caractéristiques des sites d'échantillonnage de l'ozone*

L'ozone se formant principalement à la périphérie des villes ou en zone rurale, les sites de surveillance sont essentiellement de typologie périurbaine ou rurale.

A noter que le comportement de l'ozone sur un sommet ou dans une plaine est différent. Sur un sommet d'altitude supérieure à celle de la couche de mélange atmosphérique, la concentration en ozone restera constante au cours de la

journée et présentera une valeur élevée (valeur de fond dans l'atmosphère libre). En revanche, dans une plaine, la concentration en ozone variera au cours de la journée, suivant la dynamique de la couche de mélange atmosphérique. Des valeurs très élevées peuvent être également obtenues en plaine.

D'autre part, en zone littorale, des phénomènes de brise de mer / brise de terre peuvent engendrer des concentrations en ozone élevées, au-dessus des mers ou des terres alternativement.

Les panaches d'ozone se formant et se dispersant sur de grandes étendues (50-100 km), l'échelle spatiale appropriée est celle d'une zone rurale, d'une région ou d'un pays.

- *Caractéristiques géostatistiques de l'ozone*

Comme dans le cas d'une pollution photochimique, l'échelle du phénomène est importante, il en va de même pour la portée qui peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres.

Tableau 4. Portée spatiale de l'ozone. Exemples de valeurs selon l'échelle du domaine.

Echelle	Localisation	Saison	Portée variographique (uniquement variogrammes omnidirectionnels)	Référence
Département 7340 km ²	Allier	Eté 2001	20 km	Cárdenas et Malherbe, 2002
Département 7431 km ²	Isère	Eté 2001	10 km	Chaxel, 2001
Région 8.280 km ²	Alsace	Eté 2004	50 km	Perron et Jeannée, 2005
Région 41300 km ²	Aquitaine	Eté 2002	20km et 120 km	Cette étude
Région 14652 km ²	Bouches-du-Rhône, Var et Vaucluse	Eté 2003	10 km et 40-60 km	Mary, Fayet et Jeannée, 2004
Région 43700 km ²	Rhône-Alpes	Eté 2002	75-100 km	Cette étude et Atmo-Rhône-Alpes (2003)
Inter-régions 62400 km ²	Auvergne et départements limitrophes	Eté 2005	32 km et 100 km (U+PU+R) 70 km (PU+R)	Cette étude
Inter-régions 56.000 km ²	Régions du nord de la France	Eté 2000	30 km et 150 km	Cárdenas et Malherbe, 2003

U : urbain ; PU : péri-urbain ; R : rural

- *Recommandations générales*

La cartographie de l'ozone à partir de mesures par échantillonnage passif n'est généralement pas utilisée pour exercer une surveillance réglementaire, au sens strict, puisque les durées d'exposition des tubes (1 semaine) sont couramment plus longues que les périodes de base des valeurs-seuils réglementaires (1h ou 8h). Cependant, ces cartographies d'ozone présentent un réel intérêt pour discriminer les zones de fortes concentrations (périphérie des villes, zones rurales, forêts, montagnes, littoraux...) des zones de faibles concentrations (puits d'ozone).

Les campagnes sont conduites en été (entre avril et septembre), période où les concentrations d'ozone sont les plus élevées.

Afin d'établir une cartographie par géostatistique, l'espacement entre les points de mesure doit être inférieur à la portée du phénomène, qui est d'environ 10-50 km à l'échelle d'un département et 70-150 km à l'échelle d'une région. De plus, pour que le début du variogramme expérimental soit calculé avec suffisamment de points, il est souhaitable que la taille de maille d'un échantillonnage régulier ne dépasse pas le tiers de la portée, soit *une taille de maille d'environ 3 à 15 km maximum à l'échelle d'un département et d'environ 25 à 50 km maximum à l'échelle d'une région.*

On peut noter toutefois que pour des territoires de taille importante, comprenant plusieurs noyaux urbains et plusieurs zones rurales, *les deux gammes de portée (10-50 km et 70-150 km) sont observées simultanément. Un maillage irrégulier peut alors se révéler nécessaire.*

Ces recommandations générales sont complétées, au paragraphe suivant (§2.2), par des recommandations plus spécifiques fondées sur l'étude approfondie de plusieurs jeux de données.

2.2 Zones rurales ou régionales

- Liste des jeux de données traités

Trois jeux de données ont été étudiés, relatifs aux régions suivantes :

- Aquitaine (41 300 km² ; peu de relief sauf une partie montagneuse au sud du domaine - Pyrénées - ; zone côtière à l'ouest ; 108 points de mesure par échantillonnage passif) ;
- Rhône-Alpes (43700 km² ; relief contrasté ; 470 points de mesure par échantillonnage passif) ;
- Auvergne et départements limitrophes (62400 km² ; relief contrasté ; 48 points de mesure par analyseur en station fixe ou moyen mobile).

- Recommandations

- Sans variables auxiliaires - échantillonnage régulier

Les recommandations suivantes s'appliquent à la cartographie des principales tendances de l'ozone dans une région.

Dans des **domaines de relief contrasté**, **une maille de 20 km maximum de côté**, soit une densité d'échantillonnage de 1 point pour au plus 400 km², semble nécessaire pour apprécier la structure spatiale du phénomène et élaborer une cartographie conforme aux critères de qualité. En Rhône-Alpes, un tel échantillonnage représente environ 115 points de mesure. Dans des **domaines relativement homogènes**, comme la région Aquitaine (hors Pyrénées), **une maille plus lâche, de 30 km de côté**, soit 1 point pour au plus 900 km², paraît suffisante. En Aquitaine (superficie proche de celle de Rhône-Alpes), un tel échantillonnage représente environ 66 points de mesure.

Au voisinage d'hétérogénéités locales dues à l'urbanisation, au relief, à la mer, etc., une représentation plus détaillée de la pollution d'ozone nécessite un échantillonnage plus dense.

- Avec variables auxiliaires - échantillonnage régulier

Si l'on dispose d'une variable explicative, **une maille de 30 km maximum de côté**, soit 1 point pour environ 900 km², permet d'atteindre une précision d'estimation satisfaisante. En Rhône-Alpes, un tel échantillonnage représente environ 60 points de mesure.

- *Limites*

L'altitude n'apparaît pas comme une variable auxiliaire suffisamment pertinente pour estimer correctement les concentrations d'ozone dans tous les cas (en région Rhône-Alpes, par exemple). En particulier les concentrations d'ozone à faible altitude peuvent varier dans une large gamme, en raison du mode de formation de ce polluant. Ainsi, en plaine, on mesure à la fois de faibles concentrations en zone urbaine et de plus fortes concentrations en zone rurale ou côtière, similaires à celles que l'on observe en montagne.

Il paraîtrait judicieux d'explorer d'autres variables auxiliaires potentielles dans des travaux futurs, notamment les données issues de la base Corine Land Cover gérée par l'IFEN et les données de population de la base INSEE, variables qui devraient toutes deux refléter de manière plus significative le comportement spatial de l'ozone. Il serait alors possible d'étudier la dégradation d'un maillage stratifié en fonction de ces nouvelles variables.

3. CARTOGRAPHIE DU BENZENE (C₆H₆)

3.1 Introduction

- *Caractéristiques physico-chimiques du benzène*

Le benzène est un COV (composé organique volatil) de la famille des Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques. C'est un produit de base de la chimie organique. La consommation française est de 700000 t par an.

Le benzène est un composé majeur de la pollution atmosphérique urbaine. Les installations de combustion, notamment pour le réseau de chauffage urbain au gaz naturel, émettent du benzène. En 2002, plus de 57% des émissions de benzène avaient pour origine le chauffage résidentiel/tertiaire (CITEPA). Les émissions du trafic automobile représentent plus d'un quart (26%) des émissions totales de benzène en 2002 (CITEPA), dues notamment aux gaz d'échappement des véhicules à essence catalysés. Néanmoins la teneur en benzène des carburants est réglementée. Enfin l'industrie, où le benzène est utilisé comme solvant, représente 9% des émissions de benzène en 2002 (CITEPA).

Les teneurs en benzène dépendent plus ou moins de sources saisonnières : chauffage urbain en hiver, mais aussi évaporation des carburants (stations-services, réservoirs) en été.

- *Réglementation*

- o Valeurs limites réglementaires

La Directive Européenne 2000/69/CE impose une valeur limite annuelle pour la protection de la santé humaine de 5 µg/m³ en benzène (à 293°K et 101,3 kPa) qui entrera en vigueur le 01/01/2010. En France l'objectif de qualité de l'air est fixé à 2 µg/m³ par le décret 2002-213 du 15 février 2002.

- o Qualité requise des cartes

La qualité requise pour la cartographie du benzène peut se déduire indirectement de l'Annexe VI de la Directive Européenne 2000/69/CE qui fixe :

- dans le cas d'une modélisation de la moyenne annuelle, un objectif de qualité de 50% ;
- dans le cas d'une estimation objective, quel que soit le type de moyenne considéré, un objectif de qualité de 100%.

- *Echantillonnage passif du benzène*

L'échantillonnage passif est utilisé pour la mesure du benzène par la quasi-totalité des AASQA. L'échantillonneur le plus utilisé est le tube Radiello (à diffusion radiale) code 145 (analyse par désorption thermique), suivi du tube Radiello code 130 (analyse par désorption chimique).

La durée d'exposition recommandée par le LCSQA pour le tube Radiello code 145 est d'au maximum 7 jours. Néanmoins, certaines AASQA exposent ces tubes sur des durées de 14 jours.

Des essais de répétabilité (plusieurs tubes sur un même site) montrent que, pour les tubes Radiello code 130 et code 145, les coefficients de variation sont en moyenne de 4 à 8 % avec des maxima allant de 30 à 43 % pour de faibles teneurs.

Les valeurs des blancs de terrain (tubes fermés placés dans les mêmes conditions que les tubes ouverts exposés) sont 0,1 à 0,3 µg/m³ en benzène.

La pratique française de la mesure du benzène par échantillonnage passif est décrite notamment dans les rapports de synthèse du Groupe de Travail « benzène » (Locoge et al., 2005).

- *Caractéristiques des sites d'échantillonnage du benzène*

Le benzène est un polluant essentiellement urbain, lié au secteur résidentiel/tertiaire et au trafic. Les campagnes de mesure sont donc généralement menées en zone urbaine.

Elles peuvent avoir lieu tout au long de l'année : en hiver mais aussi en été, saison où une partie du benzène de l'air ambiant peut provenir de l'évaporation des carburants.

- *Caractéristiques géostatistiques du benzène*

La portée du benzène dépend de l'échelle d'étude.

Tableau 5. Portée spatiale du benzène. Exemples de valeurs selon l'échelle du domaine.

Echelle	Localisation	Saison	Portée variographique	Référence
Plate-forme aéroportuaire				
Locale <20 km ²	Bordeaux- Mérignac	Printemps 2001 et 2003 Automne 2004	1,5 km	Cette étude et AIRAQ (2001, 2003, 2005)
Périphérie d'une plate-forme aéroportuaire				
Locale/urbaine <200 km ²	Orly	Hiver 2003	2 km et 5,4 km (2 structures)	Cette étude
Locale/urbaine <200 km ²	Roissy - Le Bourget	Hiver et été 2002	12,5 km	Cette étude
Site industriel /zone industrielle				
Locale/urbaine <50 km ²	Le Havre	Hiver 2006	4,8 km	Cette étude
Locale/urbaine <100 km ²	Drocourt	Hiver et été 2004	2,5 km	Cette étude
Locale/urbaine <200 km ²	Lacq	Mai 2007	5,5 km	Cette étude
Zone urbaine				
Urbaine <200 km ²	Agen	Été. 2002	1 km et 3,2 km	Cette étude
Urbaine <200 km ²	Bourges	Avril 2001	1,5-2 km	Cette étude
Urbaine <200 km ²	Le Havre	Automne 1999	3 km	Roth, 1999

Echelle	Localisation	Saison	Portée variographique	Référence
Urbaine <200 km ²	Mulhouse	Hiver et été 2001	3,5-4,5 km	Aspa, 2002
Urbaine < 200 km ²	Orléans	Automne 2001	4,3 km	Cette étude
Urbaine <200 km ²	Rouen	Année 1998	3 km	Bobbia et al., 2000
Urbaine <200 km ²	Troyes	Eté 1998	1,9 km	Cette étude
Urbaine > 200 km ²	Bordeaux	Eté 2004 Hiver 2005	8 km	AIRAQ, 2005 Cette étude
Urbaine 1580 km ²	Arrondissement de Lille	Eté 2003 Hiver 2004	9-15 km 7-10 km	Sagnier et al., 2003 et cette étude
Urbaine 1100 km ²	Agglomération parisienne (petite couronne)	2000-2001	15-20 km	Cette étude
Zone régionale				
Régionale 8.280 km ²	Alsace	2004	35 km	Perron et Jeannée, 2005
Régionale 21.450 km ²	Ile-de-France	Hiver 1999	Anisotropie : Direction 1 : 10 km Direction 2 : 40 km	Bobbia et al., 2001

- *Recommandations générales*

En vue d'une surveillance de la moyenne annuelle de benzène par rapport aux objectifs de valeurs limites de 2010, la cartographie du benzène à partir de mesures par échantillonnage passif est appropriée. Il convient de mener des campagnes en saisons estivale et hivernale pour obtenir une estimation suffisamment précise de la valeur moyenne annuelle. Le nombre de campagnes à mener relève de l'échantillonnage temporel, thématique non traitée dans le cadre de ce guide (travaux en cours dans le cadre du GT *Plans d'échantillonnage et reconstitution de données*).

Dans le but d'établir une cartographie par géostatistique, l'espacement entre les points de mesure doit être inférieur à la portée du phénomène, qui vaut approximativement 2 à 5 km à l'échelle d'une zone d'activité industrielle ou d'une agglomération (10 km à 20 km à l'échelle d'une conurbation) et 35-40 km à l'échelle d'une région. De plus, afin que dans chaque classe de distance, le variogramme expérimental soit calculé avec assez de points, il est souhaitable que la taille de maille d'un échantillonnage régulier ne dépasse pas le tiers de la portée, ce qui représente une taille de maille d'environ 0,5 à 1,5 km maximum à l'échelle d'une agglomération et d'environ 12-14 km maximum à l'échelle d'une région.

Ces recommandations générales sont complétées, au paragraphe suivant (§3.2), par des recommandations plus spécifiques fondées sur l'étude approfondie de plusieurs jeux de données.

3.2 Zones urbaines

3.2.1 Villes de moins de 100000 habitants

- Liste des jeux de données traités

A l'échelle urbaine, un jeu de données suffisamment riche en points de mesure et issu d'une ville dont la population est comprise entre 10.000 et 100.000 habitants, a été étudié : Agen (30.170 habitants, 11,5 km², Lot-et-Garonne).

Remarque : Le domaine d'étude, qui englobe les communes périphériques, s'étend sur une surface d'environ 64 km².

Les recommandations s'appuient également sur l'étude variographique de jeux de données relatifs aux villes de Troyes et Bourges.

- Recommandations

- o Sans variables auxiliaires - échantillonnage régulier

Une maille d'échantillonnage de 1 à 1,5 km de côté permet une estimation satisfaisante des niveaux de concentration.

- o Avec variables auxiliaires - échantillonnage régulier

La préconisation ci-dessus est maintenue. Nous observons pour Agen qu'un cokrigage homotopique avec le NO₂ (benzène et dioxyde d'azote mesurés aux mêmes sites) n'agit pas sur la qualité de l'estimation. En revanche, le résultat est autre si l'on dispose de données de NO₂ en des points n'ayant pas fait l'objet de mesures de benzène. L'introduction de ces données dans le cokrigage accroît la précision de l'estimation, notamment aux points de plus forte concentration en benzène. Dans le jeu de données étudié, les mesures de NO₂ et de benzène sont concomitantes ; cependant l'utilisation de données antérieures ou postérieures de NO₂ est envisageable si les concentrations des deux polluants sont bien corrélées.

- Limites

Dans le cas d'Agen, comme l'indiquent les tests de validation croisée, la précision d'estimation en centre-ville est limitée par la variabilité locale des concentrations (cette moindre précision n'apparaît pas sur les cartes d'écart-type de krigeage puisque celui-ci dépend du modèle de variogramme et de la configuration géographique des données mais non pas de la variabilité locale des concentrations).

3.2.2 Villes de plus de 100000 habitants

- Liste des jeux de données traités

A l'échelle urbaine, deux jeux de données suffisamment riches en points de mesure et correspondant à des villes de plus de 100.000 habitants, ont été étudiés :

- Bordeaux (230600 habitants, 49,4 km², Gironde) ;
- Lille Métropole (1,1 million d'habitants, 612 km², Nord),

Les recommandations s'appuient également sur l'étude variographique de jeux de données relatifs aux villes suivantes :

- Orléans (113126 habitants, 27,5 km², Loiret) ;
- La petite couronne parisienne (7,5 millions d'habitants, 1100 km²).

Remarque : Les domaines d'étude, qui englobent les communes périphériques, s'étendent sur des surfaces de plus de 100 km².

- Recommandations

- Sans variables auxiliaires - échantillonnage régulier

Les recommandations émises pour les villes de moins de 100000 habitants s'appliquent encore.

Comme pour le NO₂, on distinguera le cas des grandes conurbations, caractérisées par un panache très étendu. et pour lesquelles une maille de 3 à 5 km de côté, soit 1 point pour 9 à 25 km², est suffisante.

- Avec variables auxiliaires - échantillonnage régulier

Dans le cas de Lille, les estimations effectuées à partir des mêmes maillages réguliers en tenant compte des variables auxiliaires (émissions de NO_x, benzène, COV) ne nous ont pas permis d'améliorer les estimations des concentrations de benzène. Les variogrammes sont au contraire plus sensibles au plan d'échantillonnage et nous avons observé une dégradation de la qualité de l'estimation.

3.3 Zones aéroportuaires

Cette rubrique regroupe deux catégories de campagnes :

- le domaine ciblé est la plate-forme aéroportuaire elle-même, et son proche voisinage ;
- le domaine ciblé n'est pas la plate-forme aéroportuaire mais son environnement proche et plus lointain.

Les recommandations ci-après sont similaires aux préconisations émises pour le NO₂.

3.3.1 Plates-formes aéroportuaires

- Liste des jeux de données étudiés

Plusieurs études d'AASQA, qui concernent les aéroports de Lyon, Montpellier, Mulhouse, Nice, Strasbourg ont été analysées.

Trois jeux de données collectés à des périodes différentes sur la zone aéroportuaire de Bordeaux-Mérignac ont fait l'objet d'un traitement géostatistique.

- Remarques

Les différentes campagnes de mesure montrent qu'au pas de temps considéré pour l'échantillonnage passif, les mouvements d'avions n'ont pas d'effet sensible sur les concentrations de benzène. Celles-ci sont plutôt influencées par le panache de pollution de l'agglomération voisine et, localement, par le trafic engendré par l'activité aéroportuaire (voies de circulation, zones de stationnement temporaire, etc.)

- Recommandations

Pour une représentation détaillée des variations spatiales de concentration sur la plate-forme, un maillage régulier est préconisé, avec une taille de maille inférieure à 500 m.

Compte tenu des considérations précédentes, il n'est pas nécessaire de disposer préférentiellement les points d'échantillonnage le long des pistes de décollage ou d'atterrissage.

3.3.2 Environnement des plates-formes aéroportuaires

- Liste des jeux de données étudiés

Les études d'AASQA citées en 1.4.1, et pour lesquelles l'échantillonnage s'étendait au-delà des plates-formes, ont été prises en compte.

Deux jeux de données issus de campagnes réalisées par AIRPARIF autour des aéroports d'Orly, et de Roissy-Le Bourget ont été exploités.

- *Remarques*

Un aéroport s'intègre dans un environnement le plus souvent urbanisé et traversé de grands axes routiers. Dans les campagnes de mesure considérées, les données d'échantillonnage passif ne mettent pas en évidence de panache de NO₂ centré sur l'aéroport.

- *Recommandations*

Etant donné les remarques précédentes, et en particulier le fait que le domaine d'étude englobe différents émetteurs, un maillage du domaine est recommandé. Selon le milieu, on se référera aux préconisations émises pour les zones rurales ou urbaines.

Si en outre, certains axes de circulation font l'objet d'études spécifiques, on utilisera les recommandations propres aux zones de proximité routière.

3.4 Sites et zones industriels

Cette rubrique regroupe deux catégories de campagnes :

- le domaine ciblé est l'environnement d'un site industriel donné ;
- le domaine ciblé est une zone industrielle incluant diverses sources.

- *Remarques générales*

Les paragraphes suivants proposent des lignes directrices pour l'échantillonnage lorsqu'il s'agit de cartographier le benzène dans une zone sous influence industrielle. La particularité de chaque site (caractéristiques des sources, météorologie et conditions de dispersion, ...) ne permet pas de fournir des recommandations précises.

3.4.1 Sites industriels

- *Liste des jeux de données étudiés*

Un jeu de données relatif au site industriel de Drocourt (Nord Pas-de-Calais) a été étudié.

Les rapports de trois campagnes de mesure des COV, conduites chacune autour d'un centre de production automobile (activité de peinture), ont été consultés. Bien que le benzène n'y soit pas retenu comme traceur, ces études contiennent des informations utiles pour l'échantillonnage.

- *Recommandations*

Si le site industriel représente la principale source de benzène dans la zone d'intérêt, un échantillonnage circulaire, capable de cerner correctement le panache de pollution, est approprié. Il pourra s'étendre jusqu'à un rayon de quelques kilomètres autour du site (à titre indicatif : 3 à 5 km), la délimitation du domaine d'étude dépendant également de facteurs locaux : zones d'habitation, hauteur des émissions et distances d'impact supposées, etc.

Dans ce type de plan d'échantillonnage, les points de mesure sont situés à l'intersection de cercles concentriques et de radiales. Afin de couvrir indistinctement l'ensemble des directions, un échantillonnage circulaire décalé est conseillé.

Il pourra par exemple se composer (Figure 2) :

- de trois à quatre cercles resserrés, séparés entre eux d' $1/3$ de la portée au maximum si elle est déjà connue (valeur indicative : quelques centaines de mètres), puis de cercles plus espacés afin d'atteindre les niveaux de fond ;
- de 24 radiales au total, soit 12 points de mesure par cercle.

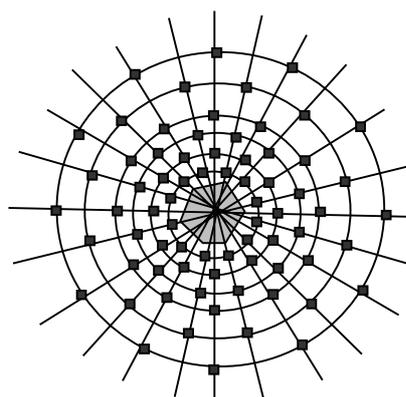


Figure 2 – Représentation schématique d'un échantillonnage circulaire.

(Les carrés noirs correspondent aux points de mesure).

Si l'environnement du site contient d'autres sources majeures et diffuses de benzène, susceptibles de contribuer significativement aux concentrations mesurées dans l'air ambiant, un maillage d'échantillonnage régulier (à titre indicatif : maille de 250 m à 500 m), capable de saisir la variabilité des concentrations due à l'ensemble de ces émetteurs, pourra être adopté.

3.4.2 Zones industrielles

- *Liste des jeux de données étudiés*

Deux jeux de données relatifs à des campagnes de mesure de benzène réalisées dans les zones industrielles du Havre (Haute-Normandie) et de Lacq (Aquitaine) ont été étudiés.

- *Recommandations*

Pour cartographier les concentrations résultant de la contribution simultanée de plusieurs sites industriels, un maillage régulier sur la zone est préconisé. La taille de la maille sera ajustée en fonction des dimensions du domaine, de la localisation des émetteurs et des informations disponibles sur la variabilité spatiale du phénomène. Dans les exemples étudiés, cela conduit à choisir une maille d'environ 0,8 km à 1,8 km de côté selon les cas. [d'accord avec ce §]

3.5 Zones de proximité routière

- *Liste des jeux de données étudiés*

Les recommandations suivantes reposent sur la consultation d'un grand nombre d'études d'AASQA, commentées dans le rapport annexe, et d'un document du CERTU (2005).

- *Remarques*

Les campagnes d'échantillonnage par tubes considérées dans cette partie ont pour objet d'évaluer l'influence locale immédiate du ou des axes considérés, en moyenne sur une période donnée ou sur l'année.

- *Recommandations*

Un échantillonnage par « transects » est utile pour caractériser finement la variabilité spatiale du benzène de chaque côté de la route. En outre, cette stratégie de mesure permet de déterminer le lien entre la concentration de benzène et la distance par rapport à la route, variable qui, comme pour le NO₂, pourrait être une variable auxiliaire pertinente pour la cartographie (cf. §1.6).

▪ Dimension des transects

L'échantillonnage doit s'étendre jusqu'aux niveaux de fond de façon que la cartographie offre une image complète de l'évolution spatiale des concentrations de part et d'autre de la route.

Pour une portion de route donnée, les paramètres à considérer pour déterminer l'extension latérale minimale de la bande d'étude sont principalement :

- l'intensité du trafic et la vitesse de circulation. A la différence du NO₂, les émissions de benzène sont plus importantes en bas régime (Figure 3).

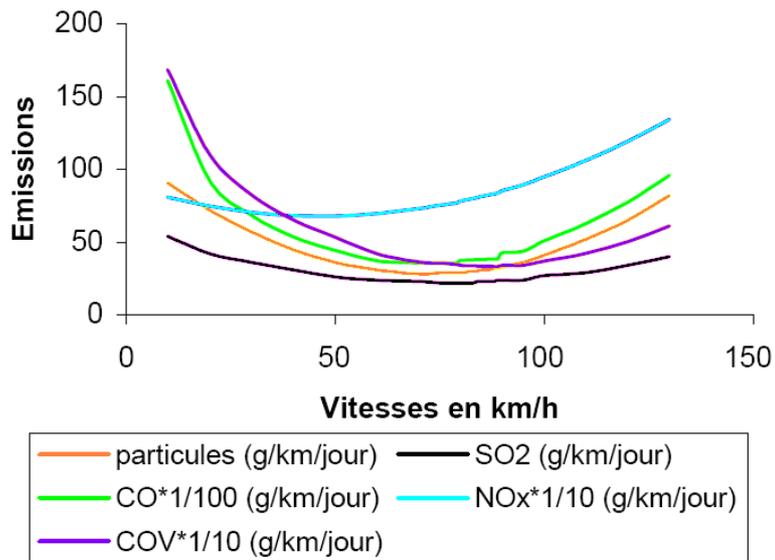


Figure 3 - Emissions en fonction de la vitesse de circulation (pour 1000 VP représentatifs du parc routier 2000) – source COPERT II (d'après ASPA, 2001)

- le type d'environnement (dégagé, urbanisé, très urbanisé). La décroissance des concentrations quand on s'éloigne de la route se révèle plus lente en milieu construit, c'est-à-dire dans des conditions moins favorables à une dispersion rapide du polluant.

Ainsi, la cartographie du benzène près des routes concerne principalement les zones urbaines, là où sont réunies les conditions les plus propices à des concentrations élevées de benzène (congestion du trafic, vitesses de circulation réduites, milieu construit).

- Sur un même transect, il est conseillé de séparer les points d'une distance inférieure ou égale au tiers de la portée supposée du phénomène, soit, à titre indicatif, d'une distance de 35 m à 100 m pour une portée comprise entre 100 m et 300 m.
- Afin d'évaluer la variabilité spatiale du benzène dans les différentes directions de l'espace, il convient de disposer plusieurs transects le long de l'axe. Si celui-ci présente des discontinuités (modification de la vitesse, du nombre de véhicules, du nombre de voies, ...), un minimum de deux transects par portion homogène de route est recommandé.
- En complément de cet échantillonnage,
 - des points de mesure pourront être ajoutés le long de la route ;
 - un maillage de fond pourra couvrir de façon homogène le domaine étudié si ce dernier s'étend au-delà de la bande d'influence précédemment définie. On se référera alors aux préconisations émises pour des zones rurales ou urbaines.

4. IMPLANTATION OU VALIDATION D'UNE STATION FIXE

L'implantation d'une station fixe requiert, entre autres, une bonne connaissance des teneurs en polluant dans la zone considérée. Il est donc important de déterminer la variabilité spatiale et temporelle du polluant.

La stratégie adoptée par les AASQA comporte généralement deux étapes² :

1. élaboration de cartographies du polluant sur la zone considérée, à partir de campagnes par échantillonnage passif. Ces cartographies doivent permettre de refléter la variabilité spatiale du polluant et sa variabilité saisonnière (variabilité temporelle longue).
2. étude des variations horaires des concentrations en polluant pendant plusieurs jours (variabilité temporelle courte), si nécessaire pour des saisons contrastées, à partir des mesures effectuées par un analyseur généralement placé dans un laboratoire-mobile.

Cette stratégie donne en général satisfaction et peut donc être recommandée. Pour l'élaboration des cartographies par échantillonnage passif, on se reportera aux chapitres 1 à 3 du présent Guide de Recommandations. Pour l'étude de la variabilité temporelle du polluant, on se référera aux travaux en cours du GT Echantillonnage temporel.

5. VALIDATION DE MODELES, ASSIMILATION DE DONNEES

Cette partie aborde la question de l'échantillonnage spatial dans le cadre de la modélisation déterministe de l'ozone et du dioxyde d'azote. L'enjeu de la mesure est d'obtenir des données adaptées à la validation d'un modèle ou à la correction des valeurs simulées. Les indications fournies reposent exclusivement sur une étude bibliographique et sur des retours d'expérience (LCSQA, AASQA). Avec le développement des modèles régionaux/urbains/de rue dans les AASQA, et les travaux sur la pollution de proximité prévus par le LCSQA³, elles pourront être ultérieurement complétées et étendues à d'autres polluants (le benzène par exemple).

5.1 Validation de modèles

De façon générale, l'implantation des données de mesure doit satisfaire le plus possible aux contraintes suivantes :

² Voir par exemple LIGAIR, 2004, 2005 ; ATMO Champagne-Ardenne, 2002, 2005

³ Etude LCSQA EMD-INERIS, 2007. Evaluation des modèles de qualité de l'air à proximité des axes routiers.

- Les points de mesure sont représentatifs vis-à-vis du modèle, c'est-à-dire que la valeur de concentration mesurée et la valeur modélisée dans la maille correspondante quantifient la même échelle de pollution ;
- La répartition spatiale des points de mesure permet de bien cerner le phénomène que le modèle est censé décrire : pollution de fond régionale ou urbaine, impact d'une source d'émissions (industrie, axe routier).

En outre, la technique de mesure doit correspondre à l'échelle de temps considérée, par exemple, selon qu'on éprouve la capacité du modèle de prévoir les variations temporelles de concentration ou qu'on teste son aptitude à estimer une moyenne annuelle. Du choix de la technique dépend aussi la stratégie d'échantillonnage spatial.

Le tableau 6 fournit des indications générales qui pourront s'enrichir avec l'expérience.

Tableau 6. Recommandations d'échantillonnage pour la validation de modèle.

Type de phénomène pour lequel le modèle est validé	Echelle de temps pour laquelle le modèle est validé	Recommandations sur la répartition des sites d'échantillonnage	Echantillonnage proposé
Pollution de fond régionale – répartition des concentrations	Heure	Choix de sites ruraux et périurbains, éventuellement de sites urbains considérés comme représentatifs de phénomènes de panache. Répartition régulière des points de mesure.	Sites temporaires (moyens mobiles avec analyseurs embarqués), en complément des stations de mesure fixe. cf. exemple a) ci-après
Pollution de fond régionale – pic journalier dans le domaine	Heure	Répartition prédéfinie des sites de mesure complémentaires (répartition régulière sur le domaine). Lieu du ou des points d'échantillonnage supplémentaires décidé ensuite au jour le jour	Un ou plusieurs moyens mobiles se déplaçant dans le domaine (analyseurs embarqués), en complément des stations de mesure fixe. cf. exemple b) ci-après
Pollution de fond à l'échelle d'une agglomération	Heure	Choix de sites urbains et périurbains de fond. La localisation du ou des moyens mobiles doit permettre d'étendre la couverture spatiale du réseau de mesure.	Moyens mobiles (analyseurs embarqués), en complément des stations de mesure fixe.
Pollution de fond à l'échelle d'une agglomération	Long terme (saison, année,...)	Répartition régulière des points de mesure. Choix de sites urbains et périurbains de fond.	Echantillonneurs passifs. Si l'on ne cherche pas à réaliser d'interpolation géostatistique, les contraintes sur le nombre de points sont moins fortes que pour le krigeage. Toutefois, la population de données doit permettre de

Type de phénomène pour lequel le modèle est validé	Echelle de temps pour laquelle le modèle est validé	Recommandations sur la répartition des sites d'échantillonnage	Echantillonnage proposé
			calculer des statistiques d'erreur fiables. Une trentaine de points est ainsi suggérée.
Pollution de proximité routière	Heure	Choix de sites de proximité. Si possible, localisation des mesures à différentes distances de la route.	Moyens mobiles, (analyseurs embarqués), en complément des stations de mesure fixe
Pollution de proximité routière	Long terme (saison, année,...)	Echantillonneurs répartis sur des droites perpendiculaires à la route.	Echantillonneurs passifs

a) La campagne de mesure réalisée sur la région Auvergne et les départements limitrophes (LIMAIR, 2006) offre un exemple d'échantillonnage régional à un pas de temps horaire. Durant l'été 2005, ATMO Auvergne, AMPASEL, ATMOSF'AIR, ASQUADRA, LIG'AIR et LIMAIR ont mis en commun leurs dispositifs mobiles pour enrichir le réseau fixe existant et couvrir de façon homogène l'ensemble du domaine (~13 km × 12 km). Ce regroupement de moyens a permis de mesurer l'ozone en continu en 20 sites urbains, 8 sites périurbains et 19 sites ruraux (stations fixes incluses) pendant toute la saison estivale. Cette expérience a été renouvelée en 2006, sur un domaine plus restreint. La comparaison à la modélisation déterministe et l'affinement des simulations sont notamment visés par ces campagnes.

b) Pour un échantillonnage ciblé sur la détection des pics d'ozone, on peut se reporter à l'étude conduite par l'ORAMIP pendant l'été 2003 (ORAMIP, 2003). D'une part, 17 stations de mesure fixe ont permis de comparer sur toute la saison le modèle et la mesure. D'autre part, l'ORAMIP a mobilisé un véhicule équipé d'un analyseur automatique. 18 communes réparties dans toute la région ont été préalablement sélectionnées comme sites possibles d'échantillonnage. La décision de conduire dans l'une ou l'autre le véhicule s'est faite au fil du temps, en fonction des pics de concentration prévus par le modèle CHIMERE.

5.2 Réalisation de cartes analysées

Actuellement, l'analyse des sorties de modélisation, telle qu'elle est pratiquée dans le système national PREV'Air (www.prevair.org) ou dans les systèmes régionaux de modélisation, est effectuée par krigeage au moins quotidiennement. Elle concerne principalement la cartographie de l'ozone et éventuellement, celle de l'indice de qualité de l'air (dans la plate-forme ESMERALDA, www.esmeralda-web.fr).

Cette production régulière de cartes, qui nécessite de disposer d'observations au jour le jour, conduit naturellement à utiliser les données des stations de mesure automatique. Néanmoins, l'échantillonnage par moyen mobile (camion laboratoire, remorque) peut trouver sa place en complément des stations fixes :

- lorsque l'adaptation statistique n'est effectuée qu'une partie seulement de l'année, notamment la saison estivale pour l'ozone. Dans ce cas, des campagnes comparables à celles qui ont été menées en Auvergne et dans les départements limitrophes peuvent être envisagées ;
- lorsque la durée d'échantillonnage est suffisante pour envisager, hors des périodes de mesure, une reconstitution relativement précise des concentrations horaires. Une telle approche a été adoptée pour l'ozone par ATMO Poitou-Charentes au sein du système SYRSO.

Comme pour la validation, les sites de mesure doivent être représentatifs de la maille du modèle. De plus, ils doivent être en nombre assez important (une cinquantaine si possible) afin de pouvoir construire un modèle de corrélation spatiale et appliquer les méthodes de krigeage (krigeage des innovations, krigeage avec dérive externe, cokrigeage) dans des conditions favorables.

A titre d'exemple,

- dans le domaine centré sur l'Auvergne, l'utilisation complémentaire de moyens mobiles a permis d'atteindre un effectif de 47 sites. Ceux-ci se répartissent en 38 points, si l'on tient compte de paires ou triplets de stations rapprochées (implantées dans la même agglomération), soit 1 point pour environ 1650 km².
- dans la région Poitou-Charentes, la reconstitution de données à partir de campagnes d'échantillonnage par moyen mobile permet de compléter le réseau existant (32 stations de fond dont 18 des régions périphériques) par 18 « pseudo-stations » (Jeannée, 2004). Un effectif de 50 points de mesure est ainsi atteint.

6. CONCLUSION

Une stratégie (ou plan) d'échantillonnage spatial doit répondre aux questions suivantes :

- combien de points de mesure sont nécessaires ?
- où doivent-ils être placés ?

Ce guide donne quelques recommandations, spécifiques à chaque polluant (NO_2 , O_3 ou C_6H_6), afin d'aider à la mise en place d'un plan d'échantillonnage permettant de répondre à un certain objectif :

- surveillance et cartographie,
- implantation ou validation d'une station fixe,
- validation ou calage d'un modèle.

Il est clair que ce guide n'offre que des lignes directrices, qui doivent être affinées, au cas par cas, en fonction des contraintes (par exemple, financières) ou en tenant compte des expériences passées.

7. BIBLIOGRAPHIE

Académie des Sciences, Oct. 1993. Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère, Technique & Documentation – Lavoisier, Paris, 262 pages.

ADEME et MEDD - Guide en matière d'équipements pour la surveillance de la qualité de l'air ambiant dans les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air, Décembre 2004, 34 pages.

ADEME/LCSQA/Fédération ATMO, Sept. 2002. Echantillonneurs passifs pour le dioxyde d'azote, 143 pages, www.ademe.fr

Air Normand, Airparif, Atmo Nord-Pas-de-Calais et Atmo Picardie, Mars 2002. Campagne inter-régionale d'étude de l'ozone et du dioxyde d'azote sur le nord de la France par tubes à diffusion passive. Rapport, 37 pages.

AIRAQ, 2002. Campagnes de mesure par échantillonnage passif. Agglomération d'Agen. Rapport n° ET/CA/02/05, www.airaq.asso.fr.

AIRAQ, 2003. Ozone. Cartographie et bilan estival. Rapport n° ET/CA/CA/03, www.airaq.asso.fr .

AIRAQ (Bunales R., Deffois A.), 2005. Cartographie de l'agglomération de Bordeaux - 2004/2005. Tomes 1 et 2. Rapport d'études ET/TP/05/05, 64 et 54 pages, www.airaq.asso.fr

AIRAQ (B. Wastine, O. Pétrique), 2001. « Aéroport de Bordeaux Mérignac – 14 mai-15 juin 2001 », Rapport d'étude AIRAQ, 15 pages. www.airaq.asso.fr

AIRAQ (F. Peron, D. Declerck), 2003. « Aéroport de Bordeaux Mérignac – été 2003 », Rapport d'étude AIRAQ ET/MM/03/08, 105 pages. www.airaq.asso.fr

AIRAQ (F. Peron), 2005. « Qualité de l'air sur l'aéroport de Bordeaux – 2004 ». Rapport d'étude AIRAQ ET/TP/05/04, 70 pages. www.airaq.asso.fr

ASPA, 2001. « Estimation de la qualité de l'air en proximité des routes nationales et des autoroutes en Alsace - comparaison avec les axes de transit des vallées vosgiennes », Rapport d'étude ASPA 01101601-ID, 35 pages, www.atmo-alsace.net

ASPA, Mars 2002. Annexe au rapport final sur la répartition spatiale de la pollution atmosphérique - Méthodes d'interpolation spatiale. Rapport ASPA 02031901-I-D, 14 pages, www.atmo-alsace.net

ATMO Champagne-Ardenne, 2002. Etude des teneurs en dioxyde d'azote dans l'agglomération de Charleville-Mézières. Hiver et été 2002. Rapport disponible sur le site www.atmo-ca.asso.fr.

ATMO Champagne-Ardenne, 2005. Rapport d'activité, disponible sur le site www.atmo-ca.asso.fr.

ATMO-Rhône-Alpes, 2003, Cartographie de l'ozone estival sur la région Rhône-Alpes – Eté 2002.

BOBBIA Michel, MIETLICKI Fanny et ROTH Chris, 2000. Surveillance de la qualité de l'air par cartographie : l'approche géostatistique. Poster présenté à INRETS 2000, 5-8 juin à Avignon (France), 4 pages, www.geovariances.com

BOBBIA Michel, PERNELET Valérie et ROTH Chris, 2001. L'intégration des informations indirectes à la cartographie géostatistique des polluants. Pollution Atmosphérique N°170, 251-254

BRIGGS, D.J., HOUGH (de), C., GULLIVER, J., WILLS, J., ELLIOTT, P., KINGHAM, S., SMALLBONE, K., 2000. A regression-based method for mapping traffic-related air pollution: application and testing in four contrasting urban environments. The Science of the Total Environment, 253, 151-167.

CARDENAS Giovanni et MALHERBE Laure, Déc. 2002. Représentation de la qualité de l'air dans les zones peu/pas couvertes par les stations de mesure fixes : partie II, application à la problématique d'une association. Rapport LCSQA, 59 pages, www.lcsqa.org

CARDENAS Giovanni et MALHERBE Laure, Déc. 2003. Evaluation des incertitudes associées aux méthodes géostatistiques: ANNEXE B Analyse d'un jeu des données d'ozone fourni par AIRNORMAND. Rapport LCSQA, 67 pages, www.lcsqa.org

CARDENAS G., PERDRIX E., 2005. Adaptation de méthodes géostatistiques à la cartographie automatique de NO₂. Rapport LCSQA, 89 pages, 2005. www.lcsqa.org

CARDENAS G., PERDRIX E., 2006. Méthode de surveillance des concentrations de NO₂ : cartographie à partir des stations fixes et prise en compte de la proximité », Rapport LCSQA, 144 pages, 2006. www.lcsqa.org

CARDENAS G., MALHERBE L., 2007. « Représentativité des stations de mesure du réseau national de surveillance de la qualité de l'air. Application des méthodes géostatistiques à l'évaluation de la représentativité spatiale des stations NO₂ et O₃ ». Rapport LCSQA, 2007. www.lcsqa.org

CERTU / Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer, 2005. « Note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières », Guide technique, 52 pages.

CHAXEL E., Oct. 2001. Mise en place d'une méthodologie pour la cartographie de l'ozone à l'échelle du département de l'Isère. Rapport Ascoparg, 139 pages, www.atmo-rhonealpes.org

CITEPA, 2002. Emissions dans l'air, données nationales de 2002 consultables à l'adresse <http://www.citepa.org/emissions/index.htm>.

CORI A., 2005. « Utilisation de données environnementales pour la cartographie du NO₂ en agglomération rouennaise », Rapport ENSMP - AIR NORMAND, 60 pages, 2005.

De FOUQUET C., GALLOIS D., PERRON G., « Geostatistical characterization of the nitrogen dioxide concentration in an urban area. Part I: Spatial variability and cartography of the annual concentration. Part II: Time component of the estimation error », Atmospheric Environment, 41 (32), 6691-6714, 2007.

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.

Ecole des Mines de Douai (F. Mathé), 2005. « PREDIT3 – Groupe de travail n°7 – Surveillance et suivi des pollutions atmosphériques en proximité des voies de circulation », Rapport final PREDIT, 106 pages.

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.

HONORE Cécile et MALHERBE Laure, Nov. 2004. Application de modèles grande échelle à la problématique régionale : cartographie de l'ozone et du dioxyde d'azote. Rapport LCSQA, 84 pages, www.lcsqa.org.

JEANNEE, 2004. Assistance technique à la mise en place d'une procédure de cartographie automatique en temps réel pour l'ozone. Annexe au rapport LCSQA d'assistance en modélisation, Rouïl L. et Malherbe L., www.lcsqa.org.

LIGAIR, 2004. Qualité de l'air, agglomération de Montargis, campagne de mesure. Rapport final disponible sur le site www.ligair.fr.

LIGAIR, 2005. Qualité de l'air, agglomération de Vierzon, campagne de mesure. Rapport final disponible sur le site www.ligair.fr.

LIMAIR, 2006. Etude ozone – été 2005. Région Limousin. Rapport référencé ETD/2005/13, disponible sur le site www.limair.asso.fr.

LOCOGE Nadine, PLAISANCE Hervé et GALLOO Jean Claude, Nov. 2005. Surveillance du benzène et des COV. Rapport LCSQA, 126 pages, www.lcsqa.org.

MALHERBE Laure et WROBLEWSKI André, 2006. Synthèse des techniques de cartographie du NO₂ : valorisation des travaux 2003 – 2005. Rapport LCSQA.

MALHERBE Laure et CARDENAS Giovanni, Nov. 2005. Application des méthodes géostatistiques pour l'exploitation conjointe des mesures de fond et de proximité. Rapport LCSQA, 55 pages, www.lcsqa.org.

MALHERBE Laure et CARDENAS Giovanni, Nov. 2004. Géostatistiques et prise en compte de l'aspect temporel. Rapport LCSQA, 76 pages, www.lcsqa.org.

MALHERBE Laure et ROUIL Laurence, Déc. 2003. Méthodes de représentation de la qualité de l'air. Guide d'utilisation des méthodes de la géostatistique linéaire. Rapport LCSQA, 71 pages, www.lcsqa.org

MARY L., FAYET S. et JEANNEE N., 2004. Evaluation des outils de cartographie de la pollution par l'ozone dans les Bouches-du-Rhône, le Var et le Vaucluse. Rapport disponible sur le site www.airmaraix.com.

OLIVIER P., WROBLEWSKI A., 2001. Application d'un modèle de dispersion de polluants atmosphériques en zone rurale influencée. Rapport LCSQA-EMD, www.lcsqa.org

OLIVIER Philippe, 2006. Modélisation de la pollution atmosphérique en zone rurale influencée, application aux cartographies mensuelles et annuelles des oxydes d'azote. Thèse INSA de Rouen, 310 pages.

ORAMIP, 2003. Evaluation des concentrations en ozone en région Midi-Pyrénées. Eté 2003. Synthèse de l'étude disponible sur www.oramip.org.

OZDOWSKI J., 2000. Etude préalable à l'implantation d'une station fixe de mesure de la pollution atmosphérique dans l'agglomération cherbourgeoise. Rapport Air C.O.M., 35 pages.

PERRON Gille et JEANNEE Nicolas, janv. 2005. Cartographie régionale NO₂, C₆H₆, O₃ en Alsace. Rapport Aspa, 47 pages, www.atmo-alsace.net.

PIECHOCKI Audrey et PLAISANCE Hervé, Déc. 2003. Étude de la préparation et de l'analyse des tubes Radiello O₃ et intercomparaison des méthodes sur site. Rapport LCSQA, 59 pages, www.lcsqa.org.

ROTH Chris, Déc. 1999. Etude géostatistique des données de pollution des agglomérations du Havre et de Rouen. Rapport Géovariances, 58 pages, www.geovariances.com.

SAGNIER I., DUSART A., DEGUINE J., Août 2003. Cartographie de la répartition de la pollution urbaine par la méthode des échantillonneurs passifs sur l'arrondissement de Lille : campagne été. Rapport AREMA-LM, 92 pages.

SEGURET S., 2003. « Estimation du dioxyde d'azote routier dans la vallée de la Thur », Rapport N-1/03/G, 61 pages, février 2003. www.lcsqa.org.

WROBLEWSKI A., PERDRIX E., OLIVIER P., 2003. Cartographie de la pollution atmosphérique en zone rurale influencée au moyen d'un modèle déterministe de dispersion des polluants. Rapport LCSQA-EMD, www.lcsqa.org.

WROBLEWSKI André et MALHERBE Laure, Nov. 2005. Adaptation des plans d'échantillonnage spatial aux objectifs de campagne. Rapport LCSQA, 124 pages, www.lcsqa.org.

8. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
1	Glossaire	2

GLOSSAIRE

Nous rappelons ci-dessous la définition de certains termes ou de certains principes utilisés dans les études :

Analyse en composantes principales :

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode d'analyse statistique multidimensionnelle permettant de représenter synthétiquement un ensemble de données. Elle sert à mettre en évidence des similarités ou des oppositions entre variables et à repérer les variables les plus corrélées entre elles. Ces variables sont par exemple des concentrations hebdomadaires ou bihebdomadaires mesurées pendant plusieurs périodes successives sur un ensemble de tubes et des variables auxiliaires connues ou estimées en ces mêmes points.

L'ACP consiste à remplacer une famille de variables par de nouvelles variables de variance maximale, non corrélées deux à deux et qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine. Ces nouvelles variables, appelées *composantes principales*, définissent des plans factoriels sur lesquels sont projetées les variables initiales. L'interprétation des résultats se restreint généralement aux deux premiers plans, sous réserve que ceux-ci expliquent la majeure partie de la variance du nuage des variables initiales.

En ACP normée, les variables projetées sur chaque plan factoriel se trouvent à l'intérieur d'un cercle de rayon unitaire. Plus une variable est projetée vers le bord du cercle, mieux elle est représentée. Par ailleurs, deux variables bien représentées et proches l'une de l'autre sont corrélées positivement tandis que deux variables qui s'opposent sont corrélées négativement. Une orthogonalité entre deux variables traduit l'absence de corrélation linéaire.

Notons que l'ACP ne mesure que des liens linéaires entre variables. Avant de conclure sur l'existence ou l'absence de relations entre variables, il est donc utile d'examiner l'allure de leurs nuages de corrélation.

Dans le texte, sont désignés par *validation croisée* et *validation absolue* les tests suivants :

Validation croisée :

Elle a pour objet de contrôler l'adéquation entre le variogramme modélisé et les données expérimentales qui ont servi à construire ce modèle. Elle permet aussi d'évaluer relativement différents modèles.

La validation croisée consiste à éliminer temporairement un site de mesure et à y estimer la concentration par krigeage, à l'aide des données restantes et du modèle de variogramme. On dispose ainsi d'une concentration estimée Z_i^* et d'une concentration mesurée Z_i . Cette opération est répétée pour chacun des points d'échantillonnage, ce qui permet de calculer des statistiques sur l'erreur Z^*-Z .

Validation absolue (appelée parfois aussi « vérification » dans le texte) :

Elle permet de contrôler la précision de l'estimation sur un jeu de données indépendant.

Elle consiste à estimer les concentrations aux points de mesure qui n'ont pas été utilisés dans le calcul du variogramme et à comparer ces valeurs estimées aux expérimentales.

Echantillonnage stratifié :

Dans un échantillonnage stratifié, le domaine d'étude est divisé en sous-parties, les strates, à l'intérieur desquelles les concentrations de polluants sont supposées plus homogènes que dans le domaine initial. Ce découpage peut se faire selon différents critères qualitatifs ou quantitatifs et correspond ou non à des zones géographiques continues.

Dans cette étude, l'échantillonnage est stratifié en fonction des émissions de NO_x par maille kilométrique.

On commence par définir des classes d'émissions, dont les limites sont les centiles d'ordre 0, 10, 20, 30..., 100 ou 0, 5, 10, 15, ...95, 100 par exemple ; les classes extrêmes peuvent être éventuellement subdivisées. Chaque strate est constituée par l'ensemble des mailles dont les données d'émissions appartiennent à une même classe. La procédure testée consiste alors :

- à quadriller le domaine par une cinquantaine de points - ce qui, d'après l'expérience, correspond au minimum requis pour modéliser la structure spatiale de façon satisfaisante ;
- puis à ajuster ce maillage (ajout ou retrait de points) de façon que les sites d'échantillonnage se distribuent équitablement entre les strates (on cherchera à obtenir un nombre à peu près égal de sites par strate) tout en se répartissant au mieux dans l'espace.

Document de référence de l'étude

TRAITEMENTS NUMERIQUES (Année 2006)

ETUDE N°23 : ADAPTATION DES PLANS D'ECHANTILLONNAGE AUX OBJECTIFS DES CAMPAGNES

INERIS/EMD

CONTEXTE ET OBJECTIF

Les techniques d'échantillonnage passif sont employées depuis maintenant de nombreuses années au sein des AASQA ; cependant la déclinaison en objectifs réglementaires de la demande de Surveillance de la Qualité de l'Air ainsi que les nouvelles requêtes provenant de l'élaboration des PSQA offrent l'opportunité de repenser les plans d'échantillonnage en fonction de ces différents objectifs. De plus le contexte budgétaire impose également la mise en place de méthodologies de dimensionnement des campagnes de mesure.

Les campagnes de mesure par moyens mobiles permettent d'accéder à une information sur les concentrations de polluants ou les nombres de dépassements de seuils dans des zones géographiques dépourvues de stations fixes. Considérés au sens large, ces moyens mobiles désignent aussi bien des camions laboratoires ou des remorques équipées d'analyseurs que des capteurs passifs. Le caractère partiel de ces campagnes, dans le temps comme dans l'espace, a conduit logiquement à des réflexions sur l'échantillonnage et la reconstitution d'indicateurs annuels, en particulier dans le cadre du GT Moyens Mobiles (2000-2004).

Prolongeant ces travaux, un nouveau groupe de travail intitulé « Plans d'échantillonnage et reconstitution de données » a été mis en place en décembre 2005. Dans un souci d'harmonisation des pratiques, son but est d'offrir aux AASQA les outils nécessaires pour définir des stratégies d'échantillonnage et exploiter les données en adéquation avec les contraintes de la surveillance et les exigences réglementaires.

TRAVAUX ANTERIEURS ET EN COURS

Les travaux relatifs aux plans d'échantillonnage spatial pour les campagnes de mesure par échantillonneurs passifs ont porté en 2005 sur la :

- surveillance des zones rurales peu ou pas couvertes par les stations de mesures,
- surveillance des villes de 10 000 à 100 000 habitants.

La première année d'étude, sur les oxydes d'azote, nous a permis de tester des plans d'échantillonnage réguliers à partir de données simulées sur des pas d'espace très fins, mais aussi à partir de données mesurées. Ces travaux nous ont permis de dégager des premières recommandations sur les stratégies à adopter.

Le nouveau groupe de travail pourra s'appuyer sur les travaux des GT « Echantillonneurs passifs » (1998- 2002) et « Moyens mobiles » (2000-2004) et sur l'étude LCSQA 2005 *Méthodes de reconstitution temporelle de moyennes et de nombres de dépassements de seuils prédéfinis à partir de données de campagne*. Cette dernière étude, conduite conjointement par l'EMD et l'INERIS grâce aux données fournies par AIRMARAIX, ORAMIP, ASPA, OPALAIR, AIR NORMAND et AIR APS porte sur l'utilisation et la comparaison de deux approches : la première,

développée par l'EMD⁴, est fondée sur l'application de la norme « ISO 9359 – Qualité de l'air – Echantillonnage aléatoire stratifié pour l'évaluation de la qualité de l'air ambiant » ; la seconde, développée par ATMO Poitou Charentes⁵ et évaluée par l'INERIS, repose sur la théorie des sondages. Elle concerne spécifiquement l'échantillonnage dans le temps et l'estimation de paramètres saisonniers annuels.

TRAVAUX PROPOSES POUR 2006

- **Echantillonnage spatial :**

La phase initiale comportera la constitution d'une base de données permettant une évaluation complète des schémas d'échantillonnages réguliers et déstructurés concernant les zones d'étude pour les polluants NO₂, ozone et benzène. Ce recueil de données se fera en étroite liaison avec des AASQA volontaires. L'ozone et le benzène seront plus particulièrement étudiés en 2006, sachant que des travaux ont été engagés sur le dioxyde d'azote dès 2005.

Dans le prolongement des travaux 2005, les techniques appliquées pour le prélèvement de l'ozone et du benzène, seront expérimentées sur des maillages réguliers.

De plus, à partir des travaux réalisés sur les oxydes d'azote et sur des maillages réguliers en 2005, une analyse des échantillonnages déstructurés (stratification et resserrement de la maille autour d'un point singulier) sera menée. Une exploitation plus approfondie des données, notamment de simulation, mais aussi issues des mesures devrait nous permettre de mesurer l'apport de ces techniques et d'établir des recommandations spécifiques à l'utilisation de ce type d'échantillonnage.

Ces travaux devraient permettre d'établir un ensemble de recommandations portant sur l'utilisation de maillages réguliers et irréguliers de capteurs passifs, pour l'échantillonnage des oxydes d'azote, de l'ozone et du benzène dans le cadre de campagnes de mesure répondant aux objectifs de surveillance de Qualité de l'Air, dès 2005, à savoir :

- la surveillance des zones rurales peu ou pas couvertes par des stations fixes,
- la surveillance des villes de 10 000 à 100 000 habitants,
- l'implantation et/ou la validation de nouveaux sites de mesures
- l'alimentation de modèles (assimilation de données) et la validation de simulations.

Un guide à destination des AASQA sera rédigé en 2006 à l'issue de cette étude.

- **Echantillonnage temporel :**

Membres permanents du nouveau groupe de travail, l'EMD et l'INERIS participeront à la diffusion des méthodes d'échantillonnage aléatoire stratifié et de plans de sondage et assureront une assistance technique pour un usage approprié de ces méthodes. A l'aide de ces outils ou d'autres techniques définies par le groupe de travail, ils contribueront à l'élaboration de dimensionnements de campagne et à la

⁴ Houdret J.-L., 2004. Influence des paramètres météorologiques sur la stratégie de mesure à l'aide de moyens mobiles. Rapport LCSQA.

⁵ Lavancier F., Caïni F., Gazeau A., 2003. Plan de sondage pour mesures mobiles de la pollution atmosphérique. Pollution Atmosphérique, N°180, 551-567.

rédaction du guide qui conclura les réflexions et travaux du GT. Ils veilleront à la cohérence entre les objectifs et décisions du GT et les études conduites au sein du LCSQA.

L'INERIS prendra également en charge le secrétariat du GT.

COLLABORATIONS

AASQA, ADEME

DUREE DES TRAVAUX

1 an

UNITES D'ŒUVRE IMPLIQUEES

- EMD : 750 heures : André Wroblewski, Jean-Luc Houdret
- INERIS : 950 heures ingénieur : Laure Malherbe

Etude : Adaptation des plans d'échantillonnage aux objectifs des campagnes

Objectif

L'utilisation des techniques d'échantillonnage pour la Surveillance de la Qualité de l'Air, avec notamment les requêtes provenant de l'élaboration des PSQA, offre l'opportunité de repenser les plans d'échantillonnage en fonction des objectifs. De plus le contexte budgétaire impose également la mise en place de méthodologies de dimensionnement des campagnes de mesure.

Contexte et travaux antérieurs

Depuis plusieurs années, les AASQA effectuent des campagnes de mesure par échantillonnage passif.

Sur le plan spatial, les travaux du LCSQA menés en 2005 et 2006 ont porté sur la stratégie d'échantillonnage à mettre en place pour les objectifs de surveillance déterminés dans le guide "des aides de l'ADEME en matière d'équipements pour la surveillance". Cela concernait la surveillance des zones rurales peu couvertes, des villes de 10 000 à 100 000 habitants, et la question de l'alimentation et validation de modèles.

Ces études ont été menées sur les oxydes d'azote, l'ozone et le benzène. Ces travaux nous ont permis de rédiger le socle d'un guide de recommandations sur les stratégies à adopter.

D'un point de vue temporel, l'EMD et l'INERIS ont participé à l'évaluation et à la diffusion au sein des AASQA des méthodes d'échantillonnage aléatoire stratifié et de plans de sondage. Ils contribuent à l'élaboration de dimensionnements de campagne et à la rédaction du guide qui conclura les réflexions et travaux du GT "Plans d'échantillonnage et reconstitution de données".

Travaux proposés pour 2007

- **Analyse spatiale**

A partir des travaux réalisés sur les échantillonnages selon les objectifs "types" du Guide ADEME, nous souhaiterions poursuivre une **analyse des situations particulières entrant dans le domaine d'intervention des AASQA** et enrichir ainsi le corps du guide de recommandations fourni en 2006.

Nous envisageons de traiter les **échantillonnages relatifs à la surveillance de sites industriels, de zones aéroportuaires, de sites de proximité, de villes de plus de 100000 habitants.**

La première étape sera consacrée à une **analyse bibliographique des études réalisées** dans les AASQA (échantillonnages réalisés, méthodes d'exploitation des données, résultats produits).

Puis, pour chaque type de situation pouvant impliquer un échantillonnage d'assez grande taille, nous proposons de **sélectionner avec des AASQA un ou plusieurs jeux de données déjà exploités** afin d'évaluer, dans la mesure du possible, la sensibilité à l'échantillonnage des résultats obtenus. Ces travaux sont ciblés sur les oxydes d'azote, l'ozone et le benzène, si des données sont disponibles.

L'étude s'achèvera par la **rédaction d'un complément au guide de recommandations** sous forme d'un retour d'expérience.

- **Analyse temporelle**

Les réflexions du GT *Echantillonnage et reconstitution de données* et les recommandations élaborées par ce groupe de travail nécessitent d'être étayées par des **tests d'échantillonnage et l'application de méthodes d'estimation.**

Dans la continuité des travaux effectués en 2004 et 2005 (méthodes ISO/plans de sondage), l'EMD et l'INERIS ont ainsi entamé fin 2006 la réalisation de calculs supplémentaires sur une même base de données fournie par l'ORAMIP.

Une troisième approche par régression est mise également en œuvre par Air Pays de Loire. Des tests complémentaires pourront être réalisés en 2007 selon les besoins du groupe de travail. Tous les résultats feront l'objet d'un examen approfondi, en s'attachant notamment au problème de l'incertitude.

Le LCSQA participera également à **la rédaction du guide qui clôturera en juillet 2007 les travaux du GT.** Une assistance à toute AASQA intéressée par l'utilisation de ces techniques est envisageable.