



Mise au point d'une méthode de cartographie de la pollution de l'air intégrant à la fois pollution de fond et pollution de proximité automobile

Agnès Poulain

► To cite this version:

Agnès Poulain. Mise au point d'une méthode de cartographie de la pollution de l'air intégrant à la fois pollution de fond et pollution de proximité automobile. Météorologie. 2008. dumas-00551339

HAL Id: dumas-00551339

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00551339>

Submitted on 3 Jan 2011

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.

MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES DES ENVIRONNEMENTS URBAINS

SPECIALITE AEEU

Année 2007/2008.

Thèse de Master STEU

*Diplôme cohabilité par
l'École Centrale de Nantes,
l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes
l'Ecole Supérieure d'Architecture de Nantes,
l'Université de Nantes*

Présentée et soutenue par :

Agnès Poulain

Le 26 Septembre 2008

à l'Ecole Centrale de Nantes

TITRE

Mise au point d'une méthode de cartographie de la pollution de l'air intégrant à la fois pollution de fond et pollution de proximité automobile.

JURY

Examineurs :

Jean-François Sini
Frank Plestan

Professeur
Professeur

Directeur de mémoire : Rafael Bunales

Laboratoire/Institution : AIRAQ, agence de surveillance de la qualité de l'air

Résumé en français

Dans le domaine de la surveillance de la qualité de l'air, l'outil géostatistique est largement utilisé. Il permet de fournir des cartographies de la pollution atmosphérique intégrant tout un ensemble d'informations (mesures et paramètres complémentaires). Les cartographies sont obtenues à partir de l'interpolation entre les données de mesures, et sont par la méthode géostatistique cohérentes avec la physique du phénomène de pollution. Autre avantage de cet outil : il permet d'évaluer l'incertitude associée à l'interpolation. Ces cartographies illustrent le phénomène de pollution de fond.

D'autres études réalisées par les acteurs de la surveillance de la qualité de l'air concernent l'évaluation de la pollution en proximité automobile, à partir d'outils de modélisation déterministe.

Chez AIRAQ, association de surveillance de la qualité de l'air en Aquitaine, les techniques de cartographie de la pollution de fond, et d'estimation des concentrations engendrées par le trafic routier sont maîtrisées séparément. Le but de ce stage est la réalisation de cartographies intégrant les deux phénomènes : pollution de fond et pollution de proximité routière.

Une méthodologie de réalisation de ces cartographies à échelle fine intégrant à la fois pollution de fond et de proximité a été mise au point par un groupe de travail travaillant dans la qualité de l'air (groupe de travail Air-ProCHE, coordonné par l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'environnement et du Travail et de l'Institut Français de l'Environnement). Cette méthodologie prévoit de combiner à travers une approche géostatistique les mesures de fond et les informations relatives à la pollution de proximité automobile : les modélisations et les mesures de proximité.

La mission du stage consiste à développer cette méthode en l'adaptant aux outils utilisés à AIRAQ : ISATIS comme outil de géostatistique et STREET comme outil de modélisation de pollution engendrée par le trafic routier. Mise à part l'adaptation aux outils, il a fallu tester, paramétrer puis valider la nouvelle méthode de cartographie à partir de deux études : Périgueux et Agen.

Les résultats sont donc :

- Adaptation, choix des paramètres optimaux et validation de la méthode;
- Réalisation de cartographies intégrant phénomènes de fond et de proximité pour Périgueux et Agen;
- Rédaction d'un mode opératoire de la nouvelle méthode de cartographie, permettant la réalisation de cartes à partir des outils ISATIS et STREET.

Mots-clés : Qualité de l'air, cartographie, géostatistique, intégration phénomènes de pollution de fond et de proximité.

Titre et résumé en anglais

Mapping air quality in urban areas : how to integrate background pollution and pollution from road traffic.

Several air quality modelling techniques have been developed to tackle different aspects of air pollution, the geostatistical methods of interpolation are the most widely used.

Mapping atmospheric pollutants in urban areas relies on a number of air quality measurements. In this context, a classical approach consists in mapping background urban pollution from background measurement sites, ignoring proximity measurements.

The pollution from road traffic emissions can be estimated thanks to traffic simulator models.

A new method enables to integrate background pollution and proximity pollution. The aim of this work is to adapt this new method, to test it and to validate it, working on two examples : Périgueux and Agen.

The results are :

- Adaptation of this method;
- Maps of Périgueux and Agen integrating background pollution and proximity pollution;
- A document describing the method, adapted to the tools used in AIRAQ.

Key words : Mapping, geostatistics, integrating background pollution and proximity pollution.

Remerciements

Pour commencer, j'aimerais remercier toutes les personnes travaillant à AIRAQ pour m'avoir accueillie et permis de travailler avec eux.

Tout d'abord, j'exprime ma reconnaissance à Patrick Bourquin, directeur d'AIRAQ qui m'a permis de rejoindre l'équipe pendant 6 mois. Je tiens à remercier Pierre-Yves Guernion, responsable du bureau d'étude pour m'avoir acceptée au sein de l'équipe des études.

J'ai une pensée pour tous les autres membres de l'association AIRAQ. Je remercie pour leur disponibilité et gentillesse Sarah Le Bail, Florence Péron, Isabelle Paillot, Véronique Badin, Alexandre Laurent et Frédéric Dupond.

J'ai beaucoup apprécié travailler avec cette équipe. Grâce à eux, mon stage s'est déroulé dans de parfaites conditions.

Enfin, je remercie particulièrement mon maître de stage Rafael Bunales qui m'a permis d'effectuer ce stage. Je le remercie pour sa patience, sa gentillesse et la qualité de son encadrement.

Sommaire

I. PRESENTATION DU CONTEXTE DU STAGE	9
I.1. AIRAQ, ASSOCIATION MEMBRE DU RESEAU ATMO	9
I.2. LES MISSIONS D'AIRAQ	9
I.2.1. Le dispositif de surveillance	10
I.2.1.a. Moyens fixes de surveillance	10
I.2.1.b. Moyens mobiles de surveillance	11
I.2.2. Modélisation et prévision	12
I.2.2.a. A l'échelle régionale : prévision.....	12
I.2.2.b. A l'échelle locale : cartographie des niveaux de polluants	12
I.2.2.c. A l'échelle de proximité : pollution automobile	13
I.2.3. Mission d'information	14
I.2.3.a. Procédures d'alerte	14
I.2.3.b. Indices ATMO et indicateurs de la qualité de l'air simplifiés (IQA)	14
I.3. L'ORGANISATION A AIRAQ	14
II. PRESENTATION DU SUJET	15
II.1. CONTEXTE DE L'ETUDE	15
II.1.1. La cartographie des mesures de pollution de fond.....	15
II.1.2. Evaluer la pollution automobile le long des axes.....	16
II.1.3. Mission du stage : comment représenter à la fois pollution de fond et pollution de proximité automobile?	17
II.2. ELEMENTS DE BIBLIOGRAPHIE	17
II.2.1. Un peu de théorie sur la géostatistique	17
II.2.1.a. Présentation des méthodes d'interpolations classiques	17
II.2.1.b. Théorie géostatistique : principe du krigeage	19
II.2.1.c. Le variogramme : sa construction	19
II.2.1.d. Le variogramme : mise en place des équations linéaires permettant de calculer les pondérateurs.....	22
II.2.1.e. Quantification de l'incertitude	23
II.2.1.f. Intégration des informations indirectes	23
II.2.1.g. Les problèmes rencontrés et les limites du krigeage.....	24
II.2.2. Méthode de cartographie intégrant pollution de fond et de proximité : données bibliographiques	24
II.2.2.a. Principe de la méthode	25
II.2.2.b. Cartographie de la pollution de fond	25
II.2.2.c. Estimation des concentrations sur le réseau routier.....	25
II.2.2.d. Spatialisation des données de proximité routière	26
II.2.2.e. Cartographie finale.....	26
III. DEROULEMENT DU STAGE : MISE EN PLACE DE LA METHODE	26
III.1. PRISE EN MAIN DES OUTILS	27
III.1.1. Présentation des outils	27
III.1.1.a. MAPINFO	27
III.1.1.b. STREET	28
III.1.1.c. ISATIS.....	29
III.1.2. Flux de données entre les outils	29
III.2. DETAILS DE LA METHODE	29
III.2.1. Cartographie de fond	30
III.2.1.a. Choix des points non impactés	30
III.2.1.b. Interpolation, ajout de variables auxiliaires	30
III.2.2. Cartographie des surconcentrations.....	31
III.2.2.a. Estimation sous STREET des concentrations liées au trafic routier	31

III.2.2.b.	Discrétisation des données STREET.....	32
III.2.2.c.	Traitement des données de concentrations sur le chapelet de points	32
III.2.2.d.	Procédure d'interpolation : spatialisation des surconcentrations.....	35
III.2.3.	Cartographie finale	37
III.3.	MISE EN PLACE DE LA NOUVELLE METHODE : ETAPES DE VALIDATION	38
III.3.1.	Utilisation de nouveaux outils	38
III.3.1.a.	Les nouvelles commandes	38
III.3.1.b.	Mise au point de l'outil de calcul des moyennes d'axes	39
III.3.2.	Paramétrage	39
III.3.2.a.	Deux paramètres : distance d'impact et portée	39
III.3.2.b.	Réalisation du KDE : intégration d'une constante lors de la régression linéaire? ..	41
IV.	RESULTATS : VALIDATION DE LA METHODE SUR 2 VILLES, PERIGUEUX ET AGEN.....	42
IV.1.	MISE EN PLACE DES ETUDES	43
IV.1.1.	Données de mesures	43
IV.1.1.a.	Périgueux	43
IV.1.1.b.	Agen	44
IV.1.2.	Etude STREET.....	46
IV.1.2.a.	Caractérisation de l'axe.....	46
IV.1.2.b.	Données météorologiques	46
IV.1.2.c.	Conditions de circulation	46
IV.1.2.d.	Composition de la flotte.....	47
IV.1.2.e.	Pollution de fond	48
IV.2.	RESULTATS	50
IV.2.1.	Validation de la méthode	50
IV.2.1.a.	Meilleurs paramètres pour le polluant NO ₂	50
IV.2.1.b.	Meilleurs paramètres pour le polluant benzène	52
IV.2.2.	Les cartographies de pollution de l'air.....	54
IV.2.2.a.	Pour le polluant NO ₂	55
IV.2.2.b.	Pour le polluant benzène	56
IV.2.3.	Mode opératoire	57
IV.2.3.a.	Description du rendu	57
IV.2.3.b.	Le protocole d'utilisation.....	58
IV.2.3.c.	Démarche pour paramétrer au mieux	60
V.	CONCLUSION	60
VI.	ANNEXE I : MESURES DU NO₂ ET DU BENZENE	62
VII.	ANNEXE II : SCHEMA GENERAL DE LA METHODE DE CARTOGRAPHIE	64
VIII.	ANNEXE III : COMPARAISON SUR LA CARTOGRAPHIE DU BENZENE DE L'INFLUENCE DE LA PORTEE.....	65

Table des figures

Figure 1 : Répartition sur l'Aquitaine des stations de mesures fixes avec type de polluants analysés	11
Figure n°2 : Capteurs placés lors des campagnes par échantillonnage passif	12
Figure n°3 : Répartition des points de mesure et cartographie du polluant NO ₂ sur l'agglomération de Périgueux	13
Figure n°4 : Pollution de proximité automobile sur les principaux axes d'Agen	13
Figure n°5 : Illustration de l'échelle ATMO	14
Figure n°6 : Différence de représentativité spatiale entre des données linéiques et des données ponctuelles de points mesures	16
Figure n°7 : Les cartes obtenues par (a) la méthode du plus proche voisin, (b) la moyenne mobile des 3 et 7 données plus proches, et (c) l'inverse des distances puis du carré des distances	18
Figure n°8 : obtention du variogramme expérimental : nuage de points, nuée variographique, variogramme expérimental	20
Figure n°9 : Propriété du variogramme expérimental	21
Figure n°10 : Ajustement du variogramme expérimental : modèle effet pépité combiné avec modèle sphérique	24
Figure n°11 : Illustration de l'importance de l'effet de pépité	24
Figure n° 12 : Principe de spatialisation des concentrations autour d'un axe jusqu'à la distance d'impact	26
Figure n°13 : Résultat de la méthode sur l'agglomération de Toulon : cartographie de NO ₂	26
Figure n°14 : exemple de données géo-référencées en Aquitaine : cours d'eau, agglomérations, zones forestières	28
Figure n° 15 : Points de mesures PA et chapelet de points ne coïncidant pas	33
Figure n° 16 : Mesures PA superposées au chapelet de points avant KDE à gauche, et chapelet après KDE à droite	34
Figure n° 17 : Chapelet de points (maillage très fin) avec les points impactés	34
Figure n°18 : Exemple d'interpolation de l'ensemble des surconcentrations à un croisement, si cette interpolation est réalisée en une seule fois	36
Figure n° 19 : Somme des deux cartographies pour obtenir la cartographie finale	38
Figure n°20 : Etude de Périgueux, polluant NO ₂ : résultat du KDE sur les mesures PA avec constante (à droite) et sans constante (à gauche)	42
Figure n° 21 : Localisation des points de mesure sur l'agglomération de Périgueux	43
Figure n° 23 : Localisation des points de mesure sur l'agglomération d'Agen	45
Figure n° 24 : Cartographies de fond retenues sur Agen pour le NO ₂ (à gauche) et le benzène (à droite)	45
Figure n° 25 : Rue Saint-Front et sa configuration de rue (type S2GS)	46
Figure n° 26 : Régression linéaire, moyenne en fonction du P98	49
Figure n° 27 : Régression linéaire, P50 en fonction de la moyenne	49
Figure n°28 : Cartographie du NO ₂ sur Périgueux	55
Figure n° 29 : Cartographie du NO ₂ sur Agen	55
Figure n°30 : Cartographie de fond du NO ₂ sur Périgueux	56
Figure n° 31 : Cartographie du benzène sur Périgueux	56
Figure n° 32 : Cartographie du benzène sur Agen	57

Introduction

Ce rapport a pour but de présenter le travail de fin d'étude qui s'est déroulé pendant 6 mois à AIRAQ, association de surveillance de la qualité de l'air en Aquitaine.

La qualité de l'air fait objet de réglementation et surveillance en France. L'état français s'appuie sur des associations pour remplir les objectifs de surveillance de la qualité de l'air sur le territoire, objectifs fixés par la loi LAURE en 1996.

AIRAQ remplit ses missions de surveillance sur le territoire de l'Aquitaine. L'association est basée à Mérignac, en Gironde, commune de l'agglomération bordelaise.

La mission du stage est *"la mise au point d'une méthode de cartographie de la pollution de l'air intégrant à la fois pollution de fond et pollution de proximité automobile"*. Le but est de rédiger un mode opératoire permettant la réalisation simple de ces cartographies à partir des outils mis à disposition à AIRAQ. Les polluants cartographiés sont le dioxyde d'azote et le benzène.

Dans un premier temps, le contexte du stage est présenté : les missions et l'organisation à AIRAQ. Le sujet de stage est ensuite détaillé. La problématique initiale est présentée et les études bibliographiques permettent d'introduire la théorie de la cartographie : la géostatistique. Ce sont également des éléments de bibliographie qui permettent de connaître les grands principes de la nouvelle méthode de cartographie de la pollution. Par la suite, le déroulement du stage est expliqué avec la mise en place concrète de la méthode. Cette méthode a du être adaptée aux outils d'AIRAQ, et a été validée sur deux exemples : les cartographies des villes de Périgueux et Agen. Enfin, sont présentés les résultats du stage : la méthode rédigée sous forme de mode opératoire, et les cartographies de Périgueux et Agen.

I. Présentation du contexte du stage

Ce stage s'est déroulé du 1^{er} avril au 26 septembre 2008 chez AIRAQ, association chargée de la surveillance de la qualité de l'air en Aquitaine. Cette première partie vise à présenter l'association ainsi que le cadre de travail.

I.1. AIRAQ, association membre du réseau ATMO

La stratégie de surveillance de la qualité de l'air se base sur plusieurs niveaux de réglementation :

- Niveau européen avec des directives qui fixent les bases d'une stratégie commune;
- Niveau national avec en 1996 la **loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie** (LAURE). Cette loi reconnaît pour le citoyen le droit à : "respirer un air qui ne nuise pas à sa santé", ainsi qu'un droit à l'information;
- Niveau régional et local avec les arrêtés préfectoraux.

L'état français est responsable de la surveillance de la qualité de l'air sur son territoire. Pour mettre en place cette politique de surveillance, le ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire (MEEDDAT) confie cette mission à des associations de type loi 1901 réparties sur le territoire national. Il s'agit du **réseau national ATMO** constitué de l'ensemble des **Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA)**.

La surveillance de la qualité de l'air s'effectue donc grâce au réseau ATMO mais aussi grâce à d'autres acteurs. Tout d'abord, le MEEDDAT élabore les politiques de la surveillance de la qualité de l'air à mettre en œuvre. Puis, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) assure une mission générale de coordination technique ainsi que la gestion des fonds de l'Etat destinés à l'acquisition d'équipements de mesure pour les réseaux de surveillance. Le laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) est la structure d'appui technique auprès de l'ensemble du dispositif de surveillance. Ensuite intervient donc la fédération ATMO regroupant les AASQA. Enfin, sur le plan régional, les Directions Régionales de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) pilotent la mise en œuvre des prérogatives du ministère.

AIRAQ est l'agence agréée par le MEEDDAT pour la surveillance de la qualité de l'air en Aquitaine. AIRAQ est, conformément à la loi sur l'air, constituée en association loi 1901. L'assemblée générale est constituée de 4 collèges : Etat, collectivités, industriels et personnalités qualifiées/associations. Elle regroupe une centaine d'adhérents.

I.2. Les missions d'AIRAQ

Les missions d'AIRAQ sont :

- **Surveiller** en continu la qualité de l'air conformément à la réglementation
- **Exploiter** les données des mesures issues des différentes techniques de surveillance
- **Prévoir et modéliser** pour évaluer la qualité de l'air dans le temps et l'espace
- **Alerter** lors des dépassements des seuils réglementaires
- Aider à la mise en œuvre de politiques de prévention efficaces



Les polluants surveillés sont :

- Le dioxyde de soufre (SO₂)
- Les oxydes d'azote (NOx)
- Les particules (PM10 et PM2.5)
- L'ozone (O₃)
- Le monoxyde de carbone
- Les composés organiques volatils (benzène, toluène, xylènes : BTX)
- Les métaux lourds (arsenic, nickel, cadmium, plomb)
- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
- Certains produits phytosanitaires

I.2.1. Le dispositif de surveillance

I.2.1.a. Moyens fixes de surveillance

AIRAQ dispose d'un **réseau de surveillance continue** sur tout le territoire d'Aquitaine. Celui-ci est constitué d'un certain nombre de stations ou sites de mesures, répartis en Aquitaine de manière à répondre aux objectifs de surveillance notamment en ce qui concerne la surveillance des agglomérations de plus de 100 000 habitants et la surveillance des sites où il y a un risque de dépassement des seuils d'une norme réglementaire. Depuis 1996, ce sont 32 stations fixes qui ont été installées en respect de critères définis par l'ADEME.

- **En agglomération : les stations urbaines de fond**

Ces stations sont placées dans des quartiers densément peuplés (entre 3000 et 4000 habitants/km²). Elles ne doivent pas être exposées directement à une source de pollution. Elles permettent de rendre compte du taux d'exposition chronique auquel est soumise la population.

- **En agglomération : les stations périurbaines**

Celles-ci sont situées en périphérie des centres villes, elles permettent le suivi du niveau d'exposition moyen de la population aux phénomènes de pollution photochimique à la périphérie du centre urbain.

- **En agglomération : les stations de proximité automobile**

Elles doivent être implantées en zones habitées à moins de 10 m d'une route à grand trafic routier dont la circulation doit être, dans la mesure du possible, supérieure à 10 000 véhicules par jour. Les

polluants mesurés sont ceux d'origine automobile : CO, NO et NOx, les particules, et les BTX. Ces stations rendent compte des teneurs maximales auxquelles la population peut être exposée ponctuellement.

- **En zone industrielle : les stations de proximité industrielle**

Elles se situent à proximité d'un site industriel, qui par son activité et ses émissions gazeuses, est susceptible d'augmenter les teneurs de certains polluants, voire de dépasser certaines normes (situation pouvant impliquer des alertes à la pollution atmosphérique).

- **En zone rurale : les stations de référence et d'observation**

Elles sont éloignées de toute activité polluante importante et implantée en zone faiblement peuplée. Elles permettent notamment pour l'ozone de mesurer des teneurs de fond à échelle régionale.

Cet ensemble de stations fixes enregistre en continu les données grâce à 92 analyseurs au total mesurant 11 types de polluants atmosphériques.

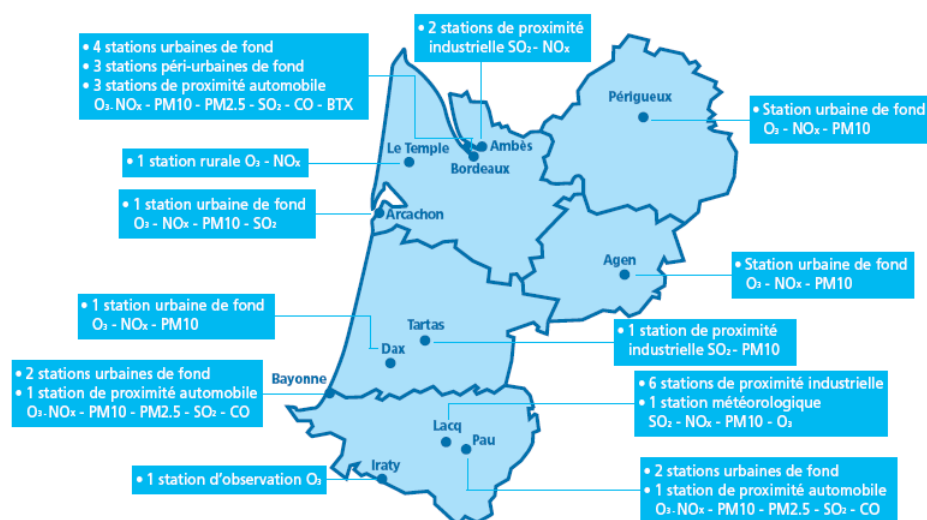


Figure 1 : Répartition sur l'Aquitaine des stations de mesures fixes avec type de polluants analysés

1.2.1.b. Moyens mobiles de surveillance

AIRAQ dispose également de deux **laboratoires mobiles** qui permettent de réaliser les mêmes mesures que les stations fixes, tout en permettant les déplacements. Ceux-ci rendent possible la couverture de nouvelles zones (pour par exemple valider des emplacements pour l'installation de nouvelles stations fixes), ou encore permettent de répondre à des demandes ponctuelles.

En plus des laboratoires mobiles, AIRAQ dispose de **préleveurs** qui permettent de d'évaluer la présence de certains polluants spécifiques, et d'**armoires de mesures** qui réalisent les même types de mesures que les laboratoires mobiles mais qui présentent l'avantage d'être plus légères et simples à utiliser.

D'autre part, si des moyens de mesure tels que les stations fixes et les laboratoires mobiles permettent d'évaluer l'évolution temporelle des polluants sur le territoire, d'autres types de mesure permettent de connaître la variation spatiale des concentrations de polluants. Il s'agit des **campagnes de mesures par tubes passifs**, qui consistent à placer sur un territoire restreint un ensemble de points de mesures. L'information "temporelle" est moins précise que pour une mesure continue puisque les concentrations mesurées sont moyennées sur au minimum 2 semaines. Ces campagnes permettent par contre de réaliser des **cartographies de polluants**, à partir des données de l'ensemble des points et par modélisation.

A partir de ce dispositif de surveillance de la qualité de l'air par moyen continu ou mobile, AIRAQ peut remplir ses deux premières missions : mesurer et exploiter. L'ensemble des données acquises en

continu par les stations fixes ou les laboratoires mobiles sont envoyées au serveur d'AIRAQ. Ces données sont ensuite exploitées : validées puis archivées. Ces activités sont assurées par le service exploitation d'AIRAQ, aidé pour la maintenance de l'ensemble des stations fixes par le Laboratoire des Pyrénées.

I.2.2. Modélisation et prévision

La loi sur l'air et ses décrets d'application recommandent de connaître la qualité de l'air en tout point du territoire. Les activités de prévision et de modélisation permettent d'obtenir un rendu sous forme de cartographies des niveaux de polluants.

I.2.2.a. A l'échelle régionale : prévision

AIRAQ dispose d'un outil de prévision de la qualité de l'air en partenariat avec les autres AASQA. Il s'agit du modèle SYRSO, adaptation régionale du modèle national PREV'AIR qui permet de diffuser des cartographies de prévision de la qualité de l'air. Cet outil est essentiellement efficace pour le polluant O₃. Des développements sont toutefois en cours sur les PM₁₀ (particules dont le diamètre est inférieur à 10µm).

I.2.2.b. A l'échelle locale : cartographie des niveaux de polluants

A partir des **campagnes par échantillonnage passif**, des cartographies de polluants divers (NO₂, benzène, ozone) sont réalisées sur des zones allant de la région à la commune.

Les capteurs passifs collectent spécifiquement les polluants présents dans l'air ambiant. Les résultats permettent d'estimer une concentration moyenne sur une période de 2 semaines en général.

La technique par diffusion passive est un moyen simple, rapide et peu onéreux d'estimer la qualité de l'air ambiant. Ce principe de mesures est cependant moins précis que les capteurs actifs. En effet la qualité des mesures, mesures déjà moyennées sur 2 semaines, peut être conditionnée par de nombreux paramètres : condition d'exposition des tubes, manipulation...



Figure n°2 : Capteurs placés lors des campagnes par échantillonnage passif

La mise en place d'une campagne par échantillonnage passif commence avec la définition de la zone d'étude : souvent à l'échelle d'une agglomération. Après repérage, les sites de mesures sont ensuite choisis et classés. Pour une campagne sur une agglomération comme Périgueux, la répartition des

sites a été la suivante : 47 sites de fond, 9 sites de proximité automobile, 3 sites de proximité industrielle.

Pour une estimation annuelle des niveaux en polluants (benzène et NO₂), une campagne de mesure se déroule en 2 phases : une campagne estivale et une campagne hivernale. Chacune de ces phases est décomposée en 2 séries de mesures de 2 semaines. Ainsi, une campagne annuelle par échantillonnage passif se traduit par deux campagnes de 1 mois. L'exposition des tubes passifs dure deux semaines, période pendant laquelle les tubes collectent les polluants gazeux. L'échantillonnage passif repose sur le principe de contrôle de la diffusion gazeuse à travers une membrane (Se reporter à l'Annexe I qui explique le principe des techniques de mesure du NO₂ et du benzène)

L'outil géostatistique (dont le principe est expliqué par la suite) permet de réaliser les cartes de concentrations en polluants : à partir des points de mesures, **les concentrations sont interpolées aux nœuds d'une grille** représentant la cartographie finale. L'outil géostatistique permettant de réaliser ces interpolations est **ISATIS**.

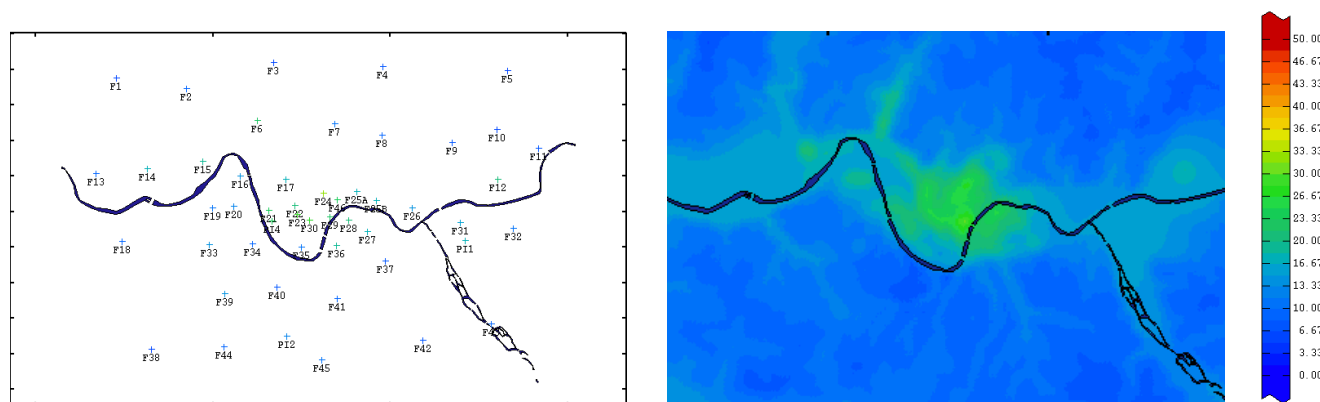


Figure n°3 : Répartition des points de mesure et cartographie du polluant NO₂ sur l'agglomération de Périgueux

1.2.2.c. A l'échelle de proximité : pollution automobile

AIRAQ dispose enfin d'outils permettant de quantifier les **pollutions de type automobile** à l'échelle de la rue. La dispersion des polluants en milieu urbain est un problème spécifique, du aux infrastructures qui peuvent provoquer des niveaux importants de pollution de proximité. L'outil de modélisation actuellement utilisé à AIRAQ est **STREET**.

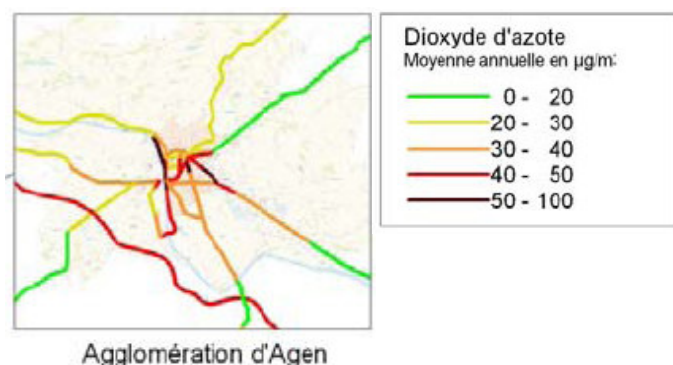


Figure n°4 : 2 Pollution de proximité automobile sur les principaux axes d'Agen

Les missions de prévision et de modélisation sont remplies par le service études à AIRAQ.

I.2.3. Mission d'information

La dernière mission d'AIRAQ concerne la communication. AIRAQ doit diffuser en permanence l'information sur la qualité de l'air au public et aux autorités, elle doit alerter lors des dépassements des seuils réglementaires.

I.2.3.a. Procédures d'alerte

Des procédures d'alerte à la pollution existent en milieu urbain pour les villes de Bordeaux, Pau, Bayonne, Périgueux, Agen et Dax. De plus, sur le plan régional, une mesure interpréfectorale a été mise en place. En cas de dépassement d'un des seuils d'alerte, AIRAQ informe le Préfet, conformément aux prescriptions des arrêtés en vigueur.

Les données du réseau de surveillance sont acquises en continu, et observées en moyennes horaire, journalière ou annuelle. Pour les polluants tels que l'ozone, le NO₂ et le NOx ou le SO₂, il existe un **seuil d'alerte**. Celui-ci est dépassé lorsque les **valeurs horaires** des polluants dépassent une limite, et ceci pendant une à trois heures consécutives selon le polluant. D'autre part, pour ces polluants et d'autres comme les PM ou le benzène, il existe un **objectif qualité**, ainsi que des valeurs limites qui concerne lui les **valeurs annuelles**.

I.2.3.b. Indices ATMO et indicateurs de la qualité de l'air simplifiés (IQA)



Figure n°5 : Illustration de l'échelle ATMO

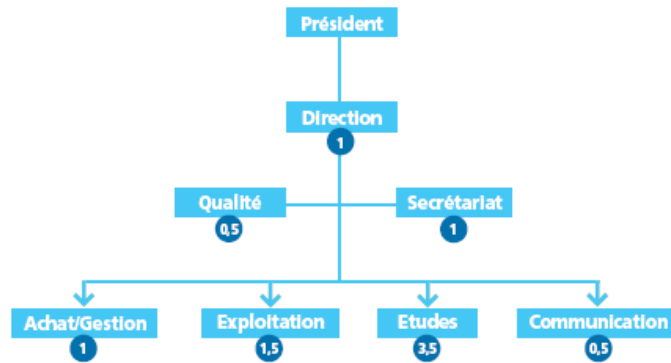
Les indices sont calculés et communiqués quotidiennement. L'**indice ATMO** caractérise la qualité de l'air quotidienne d'une agglomération de plus de 100 000 habitants sur une échelle de 1 à 10. Cette échelle tient compte des niveaux du **SO₂**, du **NO₂**, de l'**ozone** et des **particules fines**. Pour les zones de moins de 100 000 habitants, on parle d'indices de la qualité de l'air simplifiés (**IQA**). Ces indices ne permettent pas de mettre en évidence des phénomènes localisés de pollution mais une **pollution globale de fond**.

Le mode de calcul de l'indice ATMO fait d'abord intervenir le calcul des 4 sous-indices correspondant aux 4 polluants observés. L'indice final est le plus élevé des 4 sous-indices.

Outres le calcul et la diffusion des indices, les services étude et communication s'occupent :

- de la rédaction et de la publication des rapports d'études faisant suite aux campagnes de mesures;
- de la mise en place d'un historique des données (bilan des données);
- de la diffusion en continu des informations sur la qualité de l'air, de l'édition régulière du bulletin d'information "Formule Air";
- de la mise à disposition du public des données via, entre autres, le site internet d'AIRAQ.

I.3. L'organisation à AIRAQ



Neuf personnes travaillent à AIRAQ :

- Directeur : Patrick Bourquin
- Secrétariat : Isabelle Paillot
- Achat/gestion : Véronique Badin
- Communication : Florence Péron (demi-poste)
- Service étude : Pierre-Yves Guernion, Sarah Le Bail, Rafael Bunales, Florence Péron (demi-poste)
- Service exploitation : Alexandre Laurent, Frédéric Dupond (demi-poste)
- Qualité : Frédéric Dupond (demi-poste)

Comme toute association, AIRAQ a également comme instances dirigeantes :

- Un président;
- Un bureau;
- Un conseil d'administration nommé par les membres de l'association.

II. Présentation du sujet

L'étude qui a fait l'objet de ce stage se rattache au travail du service étude. L'intitulé du sujet est : *"Mise au point d'une méthode de réalisation de cartographies intégrant à la fois pollution de fond et pollution de proximité automobile".*

II.1. Contexte de l'étude

II.1.1. La cartographie des mesures de pollution de fond

La problématique de l'étude concerne la cartographie à échelle fine de la pollution atmosphérique dans une agglomération. A partir de **campagnes par échantillonnage passif**, il est possible d'**interpoler** aux nœuds d'une grille régulière, entre les points de mesures, les concentrations en polluant. Interpoler entre les points de mesures revient à affecter une concentration estimée à chaque nœud de la grille. Pour chaque nœud, la concentration estimée est une **moyenne pondérée** des concentrations observées aux stations de mesures voisines du nœud. Il existe cependant plusieurs techniques d'interpolation.

La technique d'interpolation utilisée pour la cartographie des polluants atmosphériques est la technique **géostatistique**. L'algorithme géostatistique de pondération s'adapte aux caractéristiques spatiales spécifiques du polluant.

L'outil de géostatistique utilisé à AIRAQ est l'**outil ISATIS**.

La technique d'interpolation géostatistique permet d'obtenir de bons résultats appliquée à la cartographie de la pollution de l'air. Cependant ces résultats se focalisent sur la **pollution de fond**. En effet, lors d'une campagne de mesures, il existe trois types de points de mesures :

- Les mesures de fond : représentent une grande majorité des points de mesures et ces points recouvrent l'ensemble de la zone à cartographier
- Les mesures de proximité industrielle : quelques points répartis sur la zone cartographiée situés à côté de sites industriels susceptibles de rejeter des polluants atmosphériques
- Les mesures de proximité automobile : quelques points de mesures répartis au niveau des axes les plus importants de la ville

Seules les mesures de fond possèdent une représentativité spatiale suffisante pour pouvoir subir le traitement d'interpolation géostatistique, et fournir une cartographie finale représentative du phénomène de pollution de fond.

Les mesures de **proximité automobile** (PA), en dépit de leur importance, ne peuvent pas être intégrées dans le processus de cartographie. Le phénomène de pollution automobile se représente spatialement par des **données linéiques de concentration le long des axes**. Quelques points de mesures PA répartis sur la zone à cartographier seront interprétés par la technique d'interpolation géostatistique comme des sources ponctuelles de pollution. Le phénomène de pollution le long des axes ne peut pas être illustré par la méthode géostatistique seule.

Ainsi par manque de représentativité spatiale, **les mesures PA sont exclues des cartographies de pollution de l'air**. Le cas des mesures de proximité industrielle (PI) est différent, et sera traité plus tard dans ce rapport. Le fait que ces mesures PI soient interprétées par le traitement géostatistique comme des sources ponctuelles de pollution semble moins éloigné de la réalité que dans le cas de la pollution automobile.

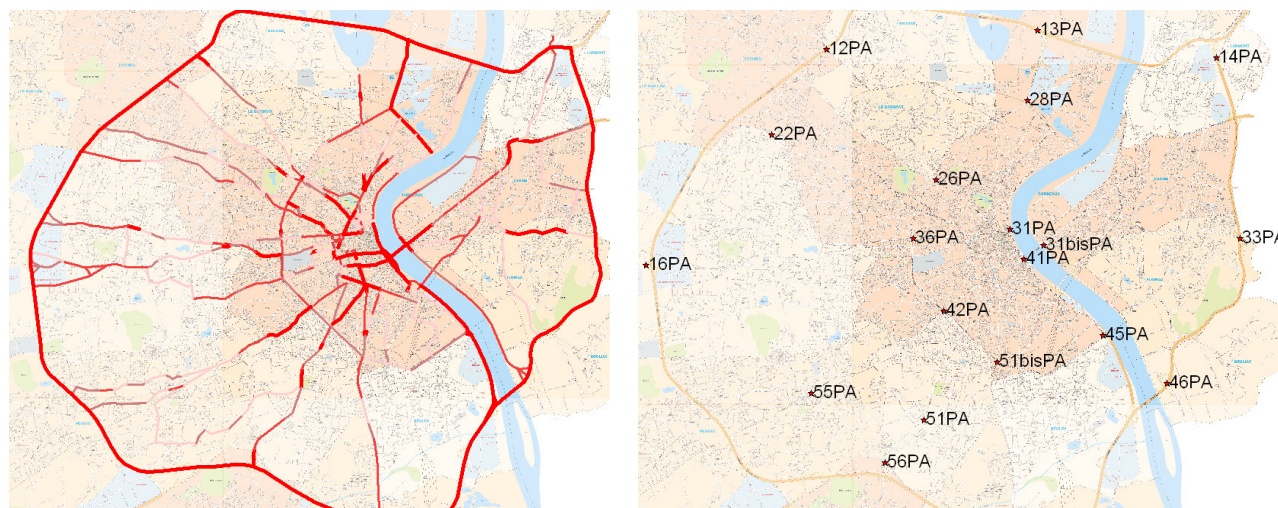


Figure n° 6 : Différence de représentativité spatiale entre des données linéiques (à gauche) et des données ponctuelles de points mesures (à droite)

II.1.2. Evaluer la pollution automobile le long des axes

La pollution automobile peut être évaluée grâce à un outil de modélisation nommé **STREET**. Cet outil permet de modéliser un axe routier et d'évaluer l'**immission** des polluants : il s'agit de la concentration en polluant rencontrée au niveau des axes et non de l'émission directe due au trafic automobile.

Les polluants pris en compte par STREET sont les gaz mis en jeu dans la combustion automobile : NO₂, PM₁₀, COV, CO, SO₂.

Plusieurs paramètres sont à fournir pour permettre au logiciel d'effectuer ses calculs : caractérisations de l'axe, météorologie, pollution de fond... On obtient comme résultat des **niveaux de concentration pour chaque polluant par axe modélisé**.

II.1.3. Mission du stage : comment représenter à la fois pollution de fond et pollution de proximité automobile?

Deux techniques sont donc maîtrisées séparément : la cartographie de fond, et la modélisation de la pollution automobile. Le cœur de la problématique du stage consiste donc à résoudre ce problème : *comment représenter sur une cartographie ces deux phénomènes?*

Une première solution pourrait consister à réaliser tout d'abord la cartographie de fond à l'aide des points de mesure, puis superposer le long des principaux axes les concentrations modélisées sous STREET. Cette méthode n'est pas satisfaisante sur au moins deux points :

- Les mesures PA n'étant pas utilisées, cette information est perdue, et les concentrations modélisées sous STREET risquent d'être incohérentes avec les mesures PA;
- Les concentrations modélisées sur le réseau routier ne sont pas spatialisées : l'impact des axes routiers sur la qualité de l'air au voisinage des axes (à 100 ou 200 m) n'est pas pris en compte.

La méthode développée lors de ce stage consiste à travers une approche géostatistique à combiner les informations relatives aux mesures de fond et les informations relatives à la pollution de proximité automobile (modélisation et mesures PA). Le but est **d'utiliser conjointement les deux outils ISATIS et STREET**.

Le but final du stage est de fournir un **mode opératoire** permettant de réaliser, pour n'importe quelle agglomération, une cartographie des niveaux de polluants intégrant phénomènes de fond et de proximité. Ce mode opératoire a été mis en place pour deux polluants : **le dioxyde d'azote (NO₂)** et **le benzène (C₆H₆)**.

II.2. Éléments de bibliographie

Cette partie a pour but, à partir d'éléments de bibliographie, d'exposer la théorie de l'interpolation géostatistique utilisée pour réaliser les cartographies, ainsi que de présenter les points principaux de la nouvelle méthode de cartographie.

II.2.1. Un peu de théorie sur la géostatistique

Document 1 : " <i>Méthodes de représentation de la qualité de l'air – Guide d'utilisation des méthodes de la géostatistique linéaire</i> " INERIS – centre de géostatistique de l'ENSMP L. Malherbe, L. Rouil, C. Fouquet

Document 2 : " <i>L'intégration des informations indirectes à la cartographie géostatistique des polluants.</i> " Air Normand, Michel Bobbia, Valérie Pernelet, Chris Roth.
--

Autres documents : documents internes, présentations AIRAQ. AIRAQ R. Bunales

Le document 2 permet de présenter les différentes méthodes dites classiques d'interpolation. Le document 1 explique d'autre part la théorie géostatistique, et le principe du krigeage. Enfin, les deux documents permettent d'illustrer le choix du modèle du variogramme, ainsi que l'intégration des données indirectes.

II.2.1.a. Présentation des méthodes d'interpolations classiques

Pour interpoler aux nœuds d'une grille, entre les points de mesures, plusieurs algorithmes existent : il s'agit de méthodes de pondérations possibles pour estimer sur un nœud le niveau de concentration à

partir des concentrations rencontrées aux nœuds voisins. Le document 2 présente les techniques d'interpolation classiques pour montrer leurs limites :

- **Méthode du plus proche voisin.** Le choix de pondération affecte pour cette technique tout le poids au nœud le plus proche, et zéro aux autres nœuds. Cette méthode est simpliste et ne permet pas d'obtenir des cartes satisfaisantes.
- **Méthode de la moyenne mobile.** Le choix de pondération affecte ici le même poids à toutes les données voisines du nœud. Cependant, le choix du nombre de points à prendre en compte change grandement la carte résultante.
- **Méthode de l'inverse des carrés des distances.** Le poids affecté est proportionnel à l'inverse de la distance entre le nœud et la donnée considérée. Ainsi, les nœuds les plus proches reçoivent un poids plus important par rapport aux nœuds éloignés. Cependant, pourquoi ne pas choisir l'inverse du carré des distances comme règle de pondération? Ce choix implique une part d'arbitraire dans la réalisation des cartographies. De plus cette méthode tend à considérer chaque point de mesure comme des puits ou des sources de pollution.

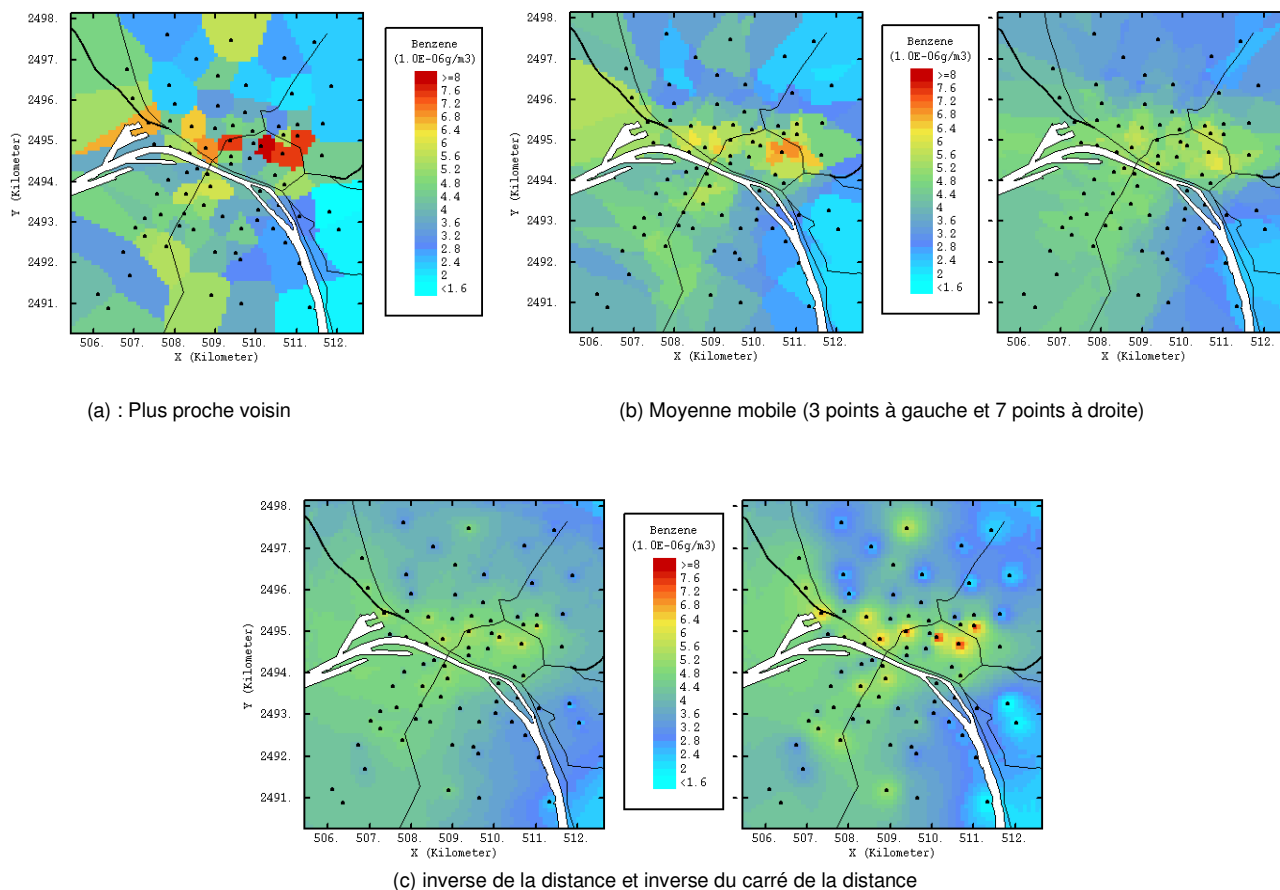


Figure n°7 : Les cartes obtenues par (a) la méthode du plus proche voisin, (b) la moyenne mobile des 3 et 7 données plus proches, et (c) l'inverse des distances puis du carré des distances.

Le choix de la carte finale à l'aide de ces techniques d'interpolation classiques apparaît donc subjectif. Idéalement, la technique utilisée doit prendre en compte les caractéristiques spatiales du polluant. Il s'agit là du grand atout de la technique d'interpolation géostatistique : l'interpolation par krigeage.

II.2.1.b. Théorie géostatistique : principe du krigeage

Le terme Krigeage vient du nom de son précurseur, l'ingénieur minier sud-africain D.G. Krige. Dans les années 50, Krige a développé plusieurs méthodes statistiques afin de déterminer la distribution spatiale de minerais à partir de forages. C'est le français Matheron qui a formalisé l'approche en utilisant les corrélations entre les forages pour en estimer la répartition spatiale.

Le krigeage est une méthode d'interpolation géostatistique, pour laquelle la règle de pondération est déterminée par le comportement spatial des données du polluant.

Ainsi, pour chaque nœud, la concentration est estimée en fonction :

- Des **concentrations mesurées** aux différents points de mesure
- De la **variabilité de la concentration en fonction de la distance entre deux points** (déterminée avec le variogramme)

Nous étudions une **variable régionalisée** (ici les concentrations en polluants) décrivant un phénomène dit régionalisé se déployant dans l'espace, sur un champ borné. Supposons que la variable régionalisée puisse être modélisée par une **variable aléatoire Z** stationnaire (la différence de la variable entre deux points ne dépend pas de la position dans l'espace mais uniquement de la distance entre ces deux points).

Pour ce type de variable aléatoire, il existe deux types de krigeages : krigeage ordinaire (variable stationnaire de moyenne inconnue) et le krigeage simple (variable stationnaire de moyenne connue). Supposons que la moyenne des concentrations est inconnue. Nous décrivons donc les mécanismes du **krigeage ordinaire** :

- La variable aléatoire Z n'est connue qu'en quelques points du plan : notons **Z_i** les valeurs prises aux points de données **x_i**, nous disposons de **n** points de mesure.
- **Z*** est l'**estimateur** de la variable par krigeage.

Pour calculer la concentration en un point cible x, la formule de l'estimateur linéaire de la variable s'écrit sous la forme d'une combinaison linéaire pondérée des données expérimentales :

$$Z^* = a + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (a)$$

Où **a** est une constante et les **λ_i** sont les pondérateurs associés à chaque point de mesure. Un **système d'équations** linéaires permet de déterminer les valeurs des pondérateurs.

Pour chaque point cible x les valeurs des pondérateurs diffèrent, il faudra donc déterminer en chaque point le système d'équation qui conduira à une autre famille de pondérateurs.

C'est à partir du **variogramme** qu'il est possible d'établir un système linéaire d'équations afin de déterminer le poids optimal à affecter aux données lors de l'interpolation.

II.2.1.c. Le variogramme : sa construction

Les deux documents expliquent clairement que le krigeage s'adapte aux caractéristiques spatiales du polluant via le modèle de variogramme. Cette partie a pour but d'expliquer à partir des documents dans quelle mesure le variogramme illustre le comportement spatial du polluant.

La conception du variogramme part d'une idée de base : lorsqu'on observe un phénomène naturel, les données ne sont pas totalement "imprévisibles" et en moyenne, l'écart entre deux points de mesures proches doit être petit, et l'écart entre deux points éloignés doit être grand.

Concrètement, le variogramme représente l'évolution de l'écart entre les données en fonction de la distance qui les sépare.

Le **variogramme expérimental** est estimé à partir des données de mesures, pour une classe de distance h :

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{x_j - x_i \approx h} [z(x_j) - z(x_i)]^2 \quad (b)$$

Où $N(h)$ représente le nombre de couples de points distants de h . Ainsi, le variogramme est une fonction qui à une distance h associe la 1/2 variance de l'écart entre l'ensemble des couples de mesures distantes de h .

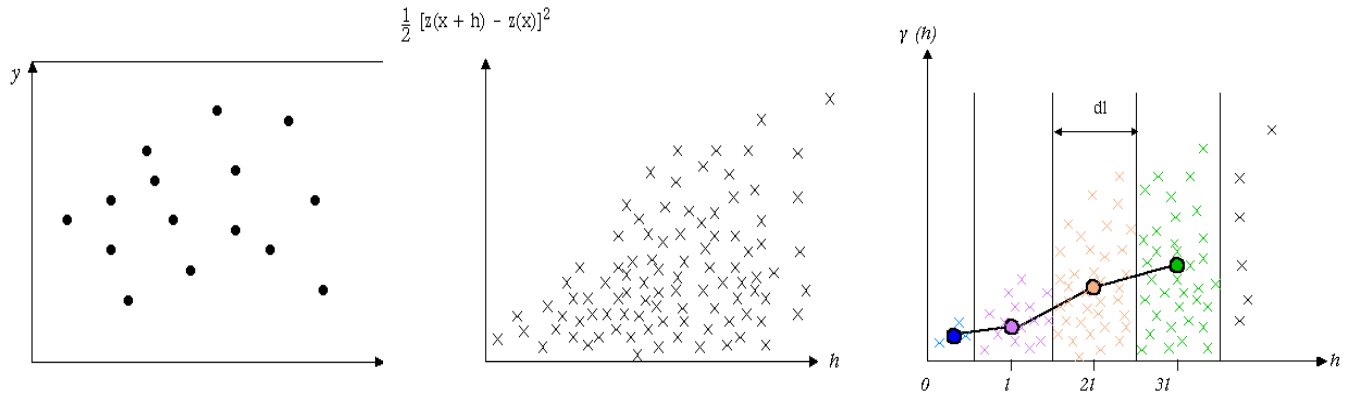


Figure n°8 : Obtention du variogramme expérimental : nuage de points, nuée variographique, variogramme expérimental

Comme l'illustre la figure n°8, l'obtention du variogramme expérimental se déroule en plusieurs étapes.

En partant de l'ensemble des n points, il est possible de construire **la nuée variographique**. Pour placer graphiquement les $n(n-1)$ points de la nuée variographique, il faut considérer les $n(n-1)$ couples de points, et :

- Calculer le $\frac{1}{2}$ écart² entre les mesures;
- Recenser l'ensemble des $n(n-1)$ distances h_i séparant deux points;
- Enfin, construire le graphique en reportant pour les $n(n-1)$ points en abscisse la distance h et en ordonnée le $\frac{1}{2}$ écart².

A partir de la nuée variographique, il est finalement possible de construire le **variogramme expérimental**. Pour cela, il faut :

- En abscisse choisir un pas définissant des classes de distances h ;
- Calculer en ordonnée la moyenne des $\frac{1}{2}$ écarts²
- Lier les points

Le variogramme expérimental révèle la corrélation spatiale du polluant entre ses points de mesure. Plusieurs propriétés du variogramme peuvent être observées, comme sur la figure n°9.

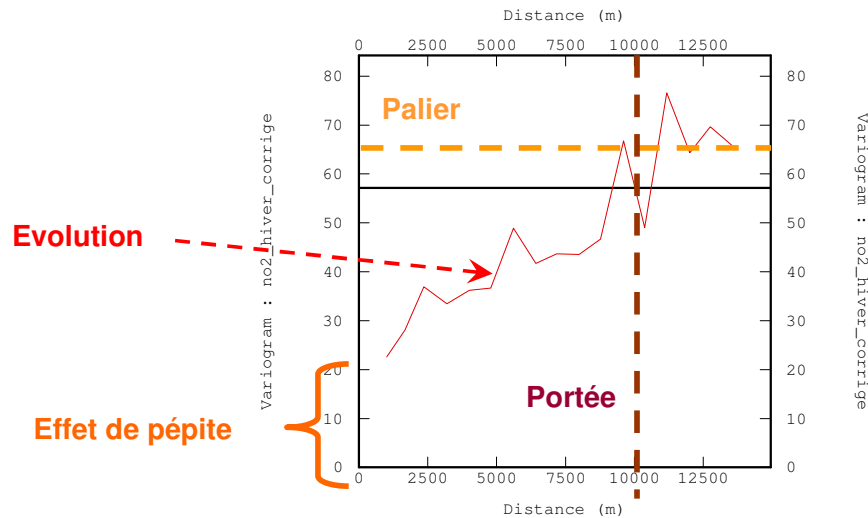


Figure n°9 : Propriétés du variogramme expérimental

Le variogramme présente les caractéristiques suivantes :

- C'est une fonction de la distance h croissante.
- Il peut présenter une ordonnée à l'origine : il s'agit de "**l'effet pépité**". Ceci signifie qu'à très petite distance, il n'y a pas corrélation parfaite entre les mesures. Plusieurs raisons peuvent expliquer pourquoi deux mesures très proches ne sont pas égales (ou à peu près égales), la principale étant l'existence d'erreurs de mesures ou de positionnement d'échantillons.
- Le variogramme se stabilise à un niveau de variabilité appelé **palier**. La distance pour laquelle le palier est atteint est appelée la **portée** : c'est la distance au-delà de laquelle les mesures ne sont plus corrélées entre elles.

Le variogramme expérimental est donc constitué d'une série de points expérimentaux sur lesquels il est possible d'ajuster un **modèle**. Ce modèle de variogramme, avec son expression analytique, permet de déduire la covariance entre deux points quelconques en fonction de leur espacement géographique. Une fois ce modèle connu, la suite des calculs s'effectue à partir de ce modèle.

L'étape d'ajustement du modèle au variogramme expérimental est une étape délicate du krigeage. Il existe plusieurs modèles de base, parmi lesquels le modèle sphérique, le modèle exponentiel, le modèle gaussien, le modèle linéaire, le modèle effet pépité pur, le modèle linéaire... Souvent, pour ajuster un modèle, la somme de plusieurs modèles est utilisée.

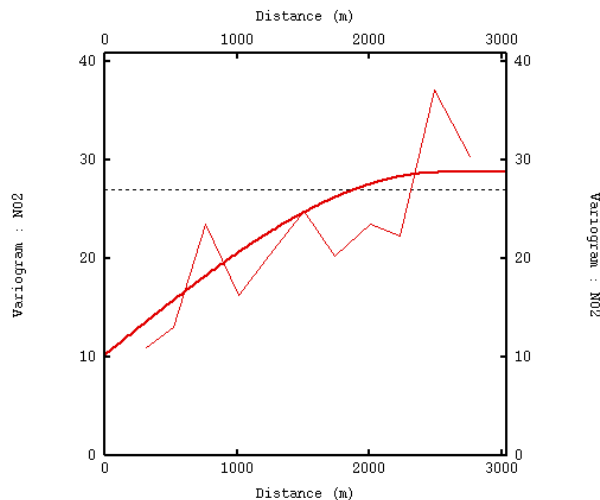


Figure n°10 : Ajustement du variogramme expérimental : modèle effet pépité combiné avec modèle sphérique

II.2.1.d. Le variogramme : mise en place des équations linéaires permettant de calculer les pondérateurs

Si par sa construction, le variogramme rend compte du comportement spatial du polluant, il intervient également dans la mise en place d'un système linéaire d'équations permettant de calculer les pondérateurs. L'**estimateur Z* par krigeage** de la variable aléatoire Z a pour équation :

$$Z^* = a + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (a)$$

L'estimateur Z* doit répondre aux exigences du krigeage :

- L'estimateur doit être sans biais, c'est-à-dire : $E(Z^* - Z) = 0$ (où E est l'espérance mathématique). Ceci implique que :
 - $a = 0$
 - $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$
- L'estimateur doit être le plus précis possible, la variance de l'erreur doit donc être minimale, soit :

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_i} \text{Var}(Z^* - Z) = 0, \forall i \quad (c)$$

L'ensemble des poids λ_i qui remplissent ces conditions sont solutions du système matriciel faisant intervenir γ , fonction du modèle du variogramme.

$$\begin{array}{c}
 \text{Pondérateurs} \\
 \text{recherchés} \\
 \left[\begin{array}{cccccc} \gamma_{11} & \dots & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \dots & & & \dots & \dots \\ \dots & & & \dots & \dots \\ \gamma_{N1} & & & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & \dots & \dots & 1 & 0 \end{array} \right] \begin{array}{c} \lambda_1 \\ \dots \\ \dots \\ \lambda_N \\ \mu \end{array} = \begin{array}{c} \gamma_{1x} \\ \dots \\ \dots \\ \gamma_{Nx} \\ 1 \end{array}
 \end{array} \quad (d)$$

Corrélation entre données
Corrélation entre données et cible

- La matrice d'ordre (N+1, N+1), s'obtient à partir du variogramme et uniquement à partir des données de points de mesures.
- Le vecteur $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N, \mu)$ est le vecteur inconnu. Le paramètre μ est un multiplicateur de Lagrange.

Afin de résoudre le système et de connaître les pondérateurs, il suffit d'inverser la matrice (N+1, N+1). Le vecteur $(\gamma_{1x}, \gamma_{2x}, \dots, \gamma_{Nx}, 1)$ est calculé grâce au modèle de variogramme, en estimant la corrélation entre le point cible x et les autres mesures.

Pour résumer, l'interpolation par krigeage ordinaire aux nœuds d'une grille résultat se déroule en plusieurs étapes :

1. A partir des données de mesure, déterminer le **variogramme expérimental**.
2. Ajuster au variogramme expérimental un **modèle analytique**.
3. **Mettre en place le système d'équations** (d). La matrice (N+1, N+1) est constante, quelque soit le point cible, elle s'obtient à partir du modèle de variogramme et des mesures. Le vecteur $(\gamma_{1x}, \gamma_{2x}, \dots, \gamma_{Nx}, 1)$ doit être calculé pour tous les points cibles, c'est-à-dire pour tous les nœuds de la grille résultat.
4. **Résoudre le système d'équation** (d) mis en place pour tous les nœuds, pour obtenir les pondérateurs.
5. Les pondérateurs, associés à chaque nœud étant connus, en les réinjectant dans l'équation (a), obtenir la valeur de l'**estimateur à chaque nœud**.

II.2.1.e. Quantification de l'incertitude

Il s'agit d'un des points forts de la géostatistique : le cadre probabiliste de la méthode permet de **quantifier l'incertitude** associée à la valeur interpolée à l'aide de la variance de krigeage.

La variance de krigeage quantifie la dispersion possible de la valeur vraie, mais inconnue, autour de la valeur estimée. Elle dépend uniquement du modèle de variogramme et de la configuration des données dans le voisinage de krigeage.

Les variations spatiales de l'écart-type de krigeage indiquent la perte de précision lorsqu'on s'éloigne des points de mesure.

II.2.1.f. Intégration des informations indirectes

Comme le démontre le document 2, la méthode géostatistique permet non seulement de s'adapter aux caractéristiques spatiales d'un polluant, mais également, d'intégrer des **variables auxiliaires** lors de l'interpolation. En effet, certaines variables auxiliaires comme la densité de population, l'occupation du sol ou encore l'altitude sont liées d'une certaine façon à la concentration des polluants. Prendre en compte des informations indirectes par l'intermédiaire de variables externes présente un fort intérêt : dans les zones où les mesures sont rares, l'information provenant de la variable auxiliaire peut prendre le relais. Deux méthodes permettent d'intégrer des informations auxiliaires à l'interpolation : le krigeage avec dérive externe et le cokrigeage. Les paragraphes suivants ont pour but d'expliquer brièvement ces deux méthodes.

- **Le krigeage avec dérive externe (KDE).** Cette méthode est utilisée lorsque la variable auxiliaire représente globalement l'allure des niveaux de polluants. Autrement dit, cette variable auxiliaire représente la dérive du polluant. Concrètement, lors d'un KDE, une régression linéaire permet d'expliquer les concentrations mesurées par la (les) variable(s) auxiliaire(s).

$$[C^{\circ}mesurée] = a_1 \cdot Variable_1 + a_2 \cdot Variable_2 + \dots + cste + residus$$

Les paramètres a_1 , a_2 , ..., et la constante sont évalués lors de la régression linéaire à partir de l'ensemble des mesures. Les variables auxiliaires (telles que l'altitude, la densité de population, etc....) sont connues sur chaque nœud de la grille résultat, c'est-à-dire de la cartographie finale. De plus, sur chaque point de mesure, les résidus sont calculés. Ce sont ces résidus qui vont subir l'interpolation. Il sera donc possible au final de connaître l'estimation des résidus aux nœuds de la grille résultat, ceci, avec la connaissance des variables auxiliaires et des coefficients permet d'obtenir la cartographie finale en réutilisant la formule de régression linéaire.

- **Le cokrigeage.** Cette technique prend en compte le comportement spatial du polluant et celui de la variable auxiliaire, ainsi que la corrélation croisée entre eux. Plus les concentrations en polluant et la variable auxiliaire sont liés, meilleure sera l'estimation. La mise en œuvre d'un

cokrigeage implique la modélisation des variogrammes simples et croisés entre la variable auxiliaire et le polluant. Les trois fonctions de corrélations sont ensuite rentrées dans un système de cokrigeage, afin de déterminer les poids qui seront affectés aux données lors de l'interpolation.

II.2.1.g. Les problèmes rencontrés et les limites du krigage

Certaines erreurs sont à éviter lors de l'ajustement du modèle de variogramme. Il est par exemple important de toujours respecter la présence de l'effet de pépité.

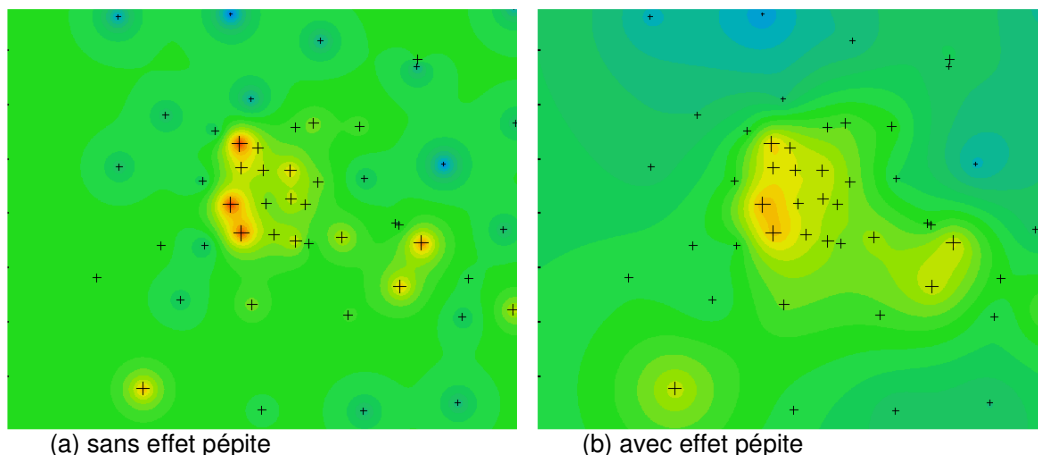


Figure n°11 : Illustration de l'importance de l'effet de pépité.

Sur la figure 11, le modèle de variogramme ne comprend **pas d'effet pépité**. Ainsi, $\gamma(0) = 0$, et **l'écart entre les mesures croît très rapidement avec la distance**. L'interpolation obtenue n'est pas satisfaisante : les valeurs très proches des points sont fortement corrélées avec les mesures, mais rapidement, avec la distance la corrélation décroît, et les concentrations interpolées atteignent la moyenne m des concentrations. Il est intéressant de noter que le choix d'un modèle de variogramme sans effet pépité et avec une forte croissance à l'origine revient à accorder aux quelques points les plus proches de fortes pondérations, et zéro aux autres. Les points de mesures apparaissent à nouveau comme des puits ou des sources (même défaut que pour les techniques d'interpolation classiques).

Lorsqu'on ajoute un effet de pépité, les concentrations interpolées proches des points de mesures ne sont pas contraintes d'atteindre le niveau des mesures, ce qui évite d'obtenir des variations importantes sur de faibles distances sur les cartes (ce phénomène est rarement rencontré en situation de fond). Il y a encore corrélation entre les points éloignés, et le phénomène a une continuité spatiale.

D'autre part, une cartographie de niveaux de polluants obtenue par krigage sera une bonne représentation de la réalité, mais aura tendance à **lisser le phénomène cartographié**. En effet, la technique d'interpolation géostatistique ne permet pas de prévoir les fluctuations importantes. Ainsi, le krigage ne peut pas être utilisé sous cette forme pour prédire ce qui est au-dessus d'un seuil.

II.2.2. Méthode de cartographie intégrant pollution de fond et de proximité : données bibliographiques

La mise au point de la nouvelle méthode de cartographie se base sur des éléments bibliographiques. Il s'agit de deux études qui présentent les principes de la méthode.

Document 3 : Cartographie géostatistique intégrée fond/proximité et comparaison à une approche déterministe.

Document 4 : Cartographie de la qualité de l'air en agglomération : comment intégrer pollution de fond et pollution de proximité.

2^{ème} con. Environnement & Transports, N. Jeannée, S. Fayet, L. Mary, A. Fromage-Mariette, C. Cabero, G. Perron, A. Armangaud

Ces documents sont le résultat du groupe de travail Air-ProCHE, coordonné par l'AFSSET (Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'environnement et du Travail) et de l'IFEN (Institut Français de l'Environnement). AirProCHE vise à coordonner et développer une démarche harmonisée de cartographie fine permettant d'identifier les portions du territoire national où les populations sont affectées par les niveaux de pollution atmosphérique les plus élevés.

II.2.2.a. Principe de la méthode

Comme cela a été déjà dit dans les chapitres précédents, la méthode a pour but l'utilisation conjointe de deux outils : ISATIS pour la cartographie et STREET pour évaluer la pollution causée par le trafic routier. Il a également été établi que dans le cadre de l'interpolation géostatistique, les points de mesures de PA ne peuvent pas être pris en compte.

Cette méthode permet d'intégrer les informations de pollution de proximité automobile au cadre de l'interpolation géostatistique, en utilisant l'outil STREET. Ainsi deux étapes distinctes se dégagent :

- Cartographie de la **pollution de fond**;
- Ajout de la cartographie des **surconcentrations** de proximité routière obtenue à partir des données de mesures PA et de la modélisation sous STREET.

II.2.2.b. Cartographie de la pollution de fond

La cartographie de la pollution de fond est obtenue par les techniques de krigeage classiques pour ce genre de cartographie. Des variables auxiliaires sont utilisées pour réaliser les cartes. Cependant, une attention supplémentaire est portée sur le choix des points de mesures qui serviront lors de l'interpolation.

Le principe même de la méthode repose sur le choix de séparer pollution de fond et pollution de proximité automobile. Ainsi, même des points de mesures considérés comme des points de fond peuvent être **impactés par un axe proche**, et caractériser dans une certaine mesure la pollution de proximité automobile. Ces points "impactés" doivent être retirés du processus de cartographie. Les cartes de fond doivent dans cette méthode illustrer uniquement le phénomène de pollution de fond.

II.2.2.c. Estimation des concentrations sur le réseau routier

C'est lors de cette étape que l'**outil STREET** intervient, sur l'ensemble du réseau routier modélisé. Les concentrations le long des axes routiers sont alors évaluées. Les résultats sont donc disponibles sous forme de **données linéiques** correspondant aux tronçons du réseau routier modélisés.

Cependant, ISATIS étant un outil de géostatistique, il interpole à partir de données ponctuelles (généralement, les données de mesures). C'est pourquoi les données linéiques de concentrations le long des axes sont **discrétisées** en un chapelet de points répartis le long des axes. Le pas de discrétisation doit être suffisamment fin pour que le rendu cartographique illustre un comportement linéique : celui du phénomène de pollution le long des axes.

Après discrétisation, les données ponctuelles de pollution le long des axes peuvent être traitées par la géostatistique sous ISATIS. Les mesures PA sont utilisées pour recalculer les concentrations STREET sur le chapelet de points au niveau des concentrations mesurées.

II.2.2.d. Spatialisation des données de proximité routière

Les concentrations de proximité automobile sont estimées et réévaluées au niveau des axes et doivent être spatialisées. Il s'agit d'évaluer l'impact autour des routes : la **décroissance des niveaux de pollution autour des axes routiers**. En milieu urbain, la décroissance des niveaux de NO₂ est de type exponentiel, et la distance d'impact est évaluée à 100 m (Résultats d'études ASPA 2003 et ADEME 2002).

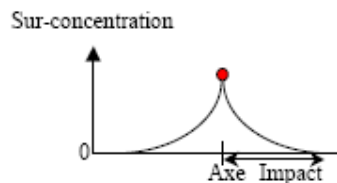


Figure n° 12 : Principe de spatialisation des concentrations autour d'un axe jusqu'à la distance d'impact

Cette spatialisation est menée sur les surconcentrations obtenues en soustrayant la pollution de fond cartographiée aux concentrations de proximité. Une **cartographie des surconcentrations** de proximité est finalement obtenue.

II.2.2.e. Cartographie finale

La dernière étape consiste simplement à sommer la cartographie de fond et la cartographie des surconcentrations. Le résultat respecte bien les données de mesures (aussi bien de fond que de proximité) et intègre la pollution de proximité automobile en spatialisant les niveaux de concentration autour des axes.

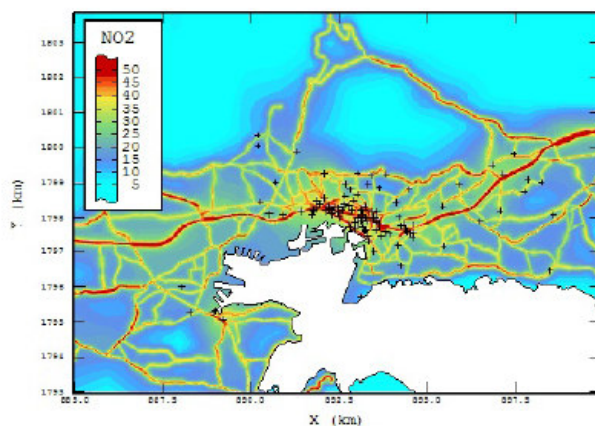


Figure n°13 : Résultat de la méthode sur l'agglomération de Toulon : cartographie du NO₂.

III. Déroulement du stage : mise en place de la méthode

La mission du stage est d'élaborer un mode opératoire décrivant précisément et simplement chaque étape de la méthode. Plusieurs modes opératoires ont été créés à AIRAQ afin de faciliter le travail sur les différents outils que le service étude est amené à utiliser : ISATIS, MAPINFO, STREET. Le mode

opérateur qui a été rédigé durant ce stage sert en complément des documents déjà existants et vise à détailler une méthode, sans expliquer le fonctionnement des outils de travail. Afin de mettre en place ce document final, plusieurs étapes d'appropriation des logiciels, de la méthode, et des nouvelles fonctionnalités des outils ont été nécessaires.

III.1. Prise en main des outils

III.1.1. Présentation des outils

III.1.1.a. MAPINFO

MAPINFO est un **système d'information géographique** (SIG). Il permet d'organiser et de présenter des données alphanumériques qui sont géographiquement référencées, dans le but de produire des cartes.

Le SIG est un système d'information qui comporte une composante spatiale. Il permet à la fois la gestion de **base de données** (relations logiques entre données alphanumériques) et la gestion des relations entre objets liées à la **spatialisation** (affichage géographique de données thématiques, calcul et stockage dans la base de données de mesures spatiales, analyses spatiales...).

L'outil SIG permet de manipuler des données qui représentent la réalité sous forme de points, lignes, polygones ou maillages. Ces données, dites données géographiques possèdent 2 composantes : **spatiale** (localisation d'objets), et **thématique** (la nature du phénomène).

Les SIG sont des outils informatiques permettant de manipuler les données géo-référencées, et notamment :

- La saisie de données (numérisation);
- Le stockage de données;
- L'analyse de données (par requêtes, modélisation...)
- L'exportation (résultats sous forme de cartes ou tableaux)

AIRAQ possède une base de données collectant des informations sur toute la région Aquitaine avec par exemple :

- Des données démographiques : densité de population (par commune ou par îlot de population)
- Des données géographiques :
 - Les communes, les départements en Aquitaine (contours);
 - Les nœuds routiers;
 - Les principales agglomérations (localisation en Aquitaine);
 - Le réseau hydrographique;
 - Les zones bâties;
 - Les zones forestières;
 - Les autoroutes, routes nationales, routes départementales;
 - Pour chaque agglomération : des images raster de haute résolution
 - Une grille d'altitude
 - La localisation des stations de mesures
 - L'occupation du sol
 - ...

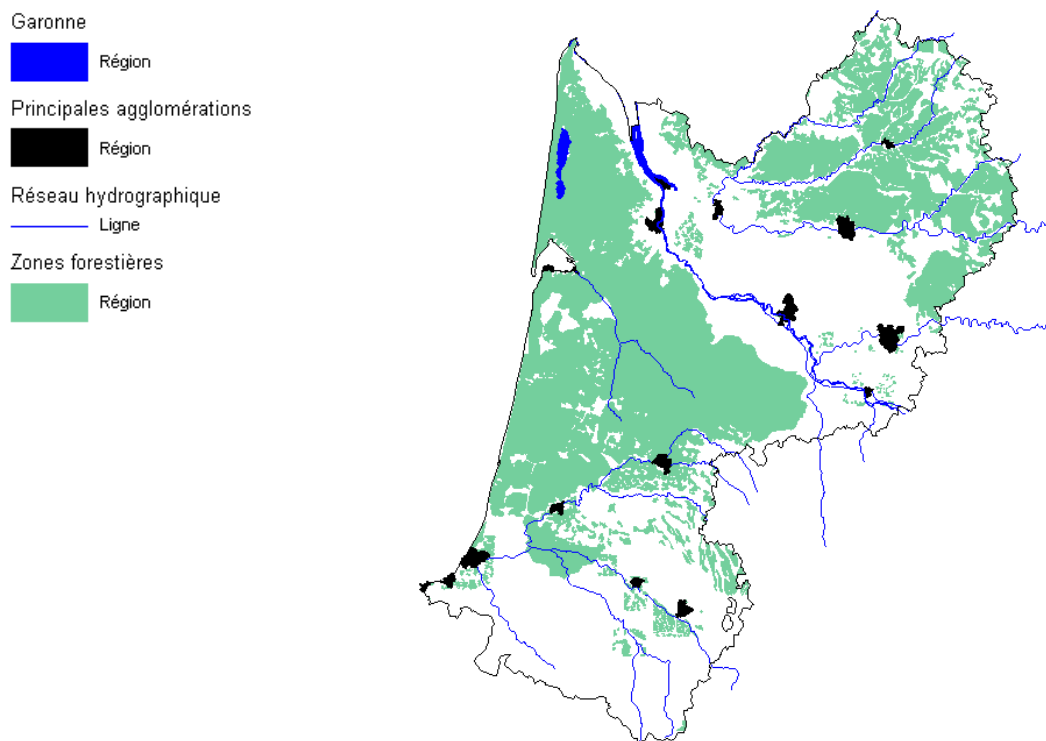


Figure n°14 : Exemple de données géo-référencées en Aquitaine : cours d'eau, agglomérations, zones forestières.

Les données de MAPINFO qui sont amenées à être utilisées pour la réalisation des cartographies de pollution de l'air sont : les points de mesures, les axes routiers modélisés, l'altitude, l'occupation du sol et la densité de population.

III.1.1.b. STREET

STREET est un outil d'évaluation de la **pollution atmosphérique provoquée par la circulation routière**. Les bases scientifiques du logiciel ont été élaborées lors d'un programme de recherche initié par le ministère de l'environnement du Land Baden-Württemberg. La version française a été mise au point par la société allemande KTT en collaboration avec la société française Targetting. Pour adapter l'outil à la France, les données sur le parc français de véhicules ont été prises en compte ainsi que les facteurs d'émission spécifiques, basés sur le logiciel IMPACT de l'ADEME.

Pour calculer les immissions engendrées par la circulation routière sur un axe, STREET a besoin de données d'entrées:

- type de voie (il existe 98 configurations possibles sur STREET)
- paramètres géographiques, orientation de la rue, pente...
- pollution de fond
- conditions météorologiques locales
- circulation automobile: nombre de véhicules par jour, pourcentages des deux-roues, poids lourds, taux d'encombrement de la voie ...

Avant de débiter une étude sous STREET, un travail de collecte de données est nécessaire. Les sources de ces données sont principalement des données recueillies sur le terrain, des données de **comptages routiers** fournies par les mairies d'agglomérations, des données de pollution de fond issues d'études, etc.... Les données "brutes" n'étant cependant ni parfaites, ni complètes, il est souvent nécessaire de formuler quelques hypothèses.

Concrètement, l'outil STREET lit les paramètres d'entrée à partir d'un tableau Excel. Le tableau recense l'ensemble des axes modélisés, et chaque colonne correspond à un paramètre ou une donnée d'entrée dont STREET a besoin pour lancer le calcul. Le résultat se présente également sous forme de tableau, et pour chaque axe, des concentrations en polluants ont été estimées.

III.1.1.c. ISATIS

ISATIS est un outil de géostatistique. C'est lui qui interpole, à partir de points de mesures, les concentrations aux nœuds d'une carte résultat. ISATIS a besoin de données d'entrée sous forme de **fichiers de points avec coordonnées**. Pour réaliser une cartographie, les données nécessaires sont les points des mesures, et les variables auxiliaires.

Les différentes étapes du krigeage se déroulent sous ISATIS :

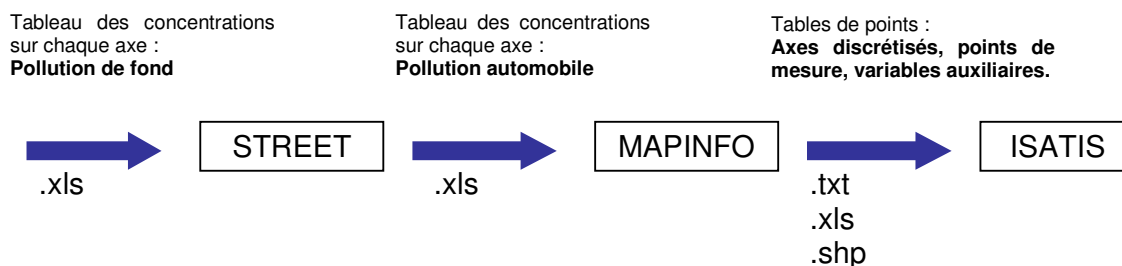
- **Enregistrement du variogramme expérimental;**
- **Ajustement du modèle** de variogramme;
- Création de la grille résultat;
- Lancement du calcul : interpolation en chaque point de la grille résultat (calcul des pondérateurs).

L'utilisateur d'ISATIS travaille essentiellement sur le variogramme. Ce sont les étapes d'enregistrement du variogramme expérimental (choix des points) et d'ajustement du modèle qui permettent à l'utilisateur d'influencer l'interpolation.

ISATIS fournit comme résultat des cartes de niveaux de concentrations de polluants.

III.1.2. Flux de données entre les outils

Les trois outils forment et reçoivent des données d'entrée et de sortie les uns pour les autres. STREET fonctionne seulement avec des fichiers Excel. MAPINFO lit les fichiers Excel et exporte sous forme de fichier texte ses données (points de mesure et variables auxiliaires), ainsi que sous le format "ESRI Shape" pour permettre la lecture sous ISATIS des données discrétisées des axes. ISATIS à son tour peut exporter sous forme de fichier texte.



III.2. Détails de la méthode

Grâce aux éléments de bibliographie, les principes de la méthode sont connus. La première mission du stage a donc été de comprendre la méthode, et de l'adapter aux outils. Ainsi, la méthode ici détaillée est déjà le résultat d'une adaptation aux outils dont dispose AIRAQ pour la cartographie.

Cette partie a pour but de détailler la méthode, et d'expliquer la logique des étapes (avec données d'entrée et de sortie). Ceci correspond au travail d'appropriation du sujet, travail qui a permis de mettre à jour :

- L'existence de *paramètres* à faire varier pour paramétrer au mieux la méthode;
- La nécessité de l'utilisation et de la mise au point de *nouveaux outils, outils ou commandes des logiciels dont l'utilisation pour la cartographie est nouvelle à AIRAQ.*

Rappelons que le principe de la méthode est de différencier d'une part la pollution de fond et d'autre part la pollution engendrée par le trafic routier, évaluée en termes de surconcentrations. Outre l'évaluation des surconcentrations sur les axes (en utilisant STREET et les mesures PA), la méthode prévoit d'évaluer l'impact de la circulation routière en faisant des hypothèses sur la décroissance des niveaux de polluants autour des axes.

Ainsi, pour obtenir la cartographie finale, la cartographie des surconcentrations évaluées sur et à proximité des axes est sommée à la cartographie de fond.

III.2.1. Cartographie de fond

III.2.1.a. Choix des points non impactés

Le cœur de la méthode générale consiste à rajouter à la cartographie de fond les surconcentrations engendrées par le trafic routier. Il est donc très important de veiller à ce que cette cartographie de fond illustre **uniquement la pollution de fond**. Ce qu'il faut éviter ici, c'est "compter 2 fois" une même pollution : l'attention se reporte donc sur les points situés dans la zone d'influence des axes. En effet, ces zones impactées par la proximité d'un axe représentent un point sensible de la méthode : **comment déterminer l'impact d'un axe routier?** Le choix a été fait de considérer uniquement la distance.

Il s'agit là d'un premier paramètre de la méthode à faire varier : la distance d'impact d'un axe.

La littérature ne fournit pas de réponse exacte et systématique à cette question. Cependant, la distance d'impact pour le NO₂ a été évaluée inférieure à 200 m en milieu fermé urbain. Les études sur le comportement spatial des polluants fournissent également comme résultat que la distance d'impact du benzène a tendance à être inférieure à celle du NO₂.

Une fois la distance d'impact déterminée, le but est de **retirer les points** considérés comme impactés de la sélection de points destinés à fournir la cartographie de fond. Le travail se décompose donc en deux étapes :

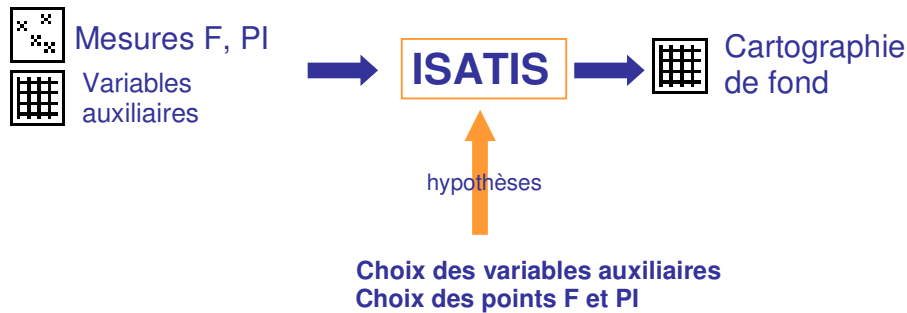
- Calculer les distances entre les points et les axes sous MAPINFO;
- Créer une sélection de points sous ISATIS en retirant les points de mesure de proximité automobile et les points impactés.

Pour mettre en place cette sélection, un nouvel outil de sélection géographique sous ISATIS a du être utilisé.

La raison du retrait des points de mesure PA pour réaliser une cartographie de la pollution de fond a déjà été expliqué. Il a été choisi dans cette étude de maintenir les points de mesure de proximité industrielle en donnée d'entrée pour les cartographies. En effet, la pollution PI peut être assimilée à une source ponctuelle de pollution (contrairement à la pollution d'origine automobile qui est un phénomène de pollution le long des axes).

III.2.1.b. Interpolation, ajout de variables auxiliaires

L'objectif est de réaliser la cartographie de fond en utilisant les points de mesures sélectionnés et les données auxiliaires. Il s'agit d'une étape "classique" de cartographie sous ISATIS. Plusieurs techniques d'interpolation existent, et il y a d'autant plus de choix que de variables auxiliaires à tester. Il faut alors tester l'ensemble des méthodes d'interpolation, et reporter son choix sur la technique donnant le meilleur résultat (estimation de l'incertitude, carte des écart-types de krigeage).



III.2.2. Cartographie des surconcentrations

C'est dans cette étape que réside l'innovation de la méthode : la prise en compte des données de pollution automobile (par mesure et estimation STREET), et leur exploitation géostatistique grâce à une discrétisation des données linéiques. Il s'agit d'une étape complexe faisant intervenir tous les outils.

Cette étape commence par l'estimation de la pollution le long des axes grâce à STREET. Les données de concentration sur les axes sont ensuite discrétisées. Un fichier de points renseigne alors les concentrations sur les axes routiers le long d'un chapelet de points. Enfin, ce fichier de points est traité sous ISATIS : les données sont réévaluées et spatialisées grâce à la géostatistique.

III.2.2.a. Estimation sous STREET des concentrations liées au trafic routier

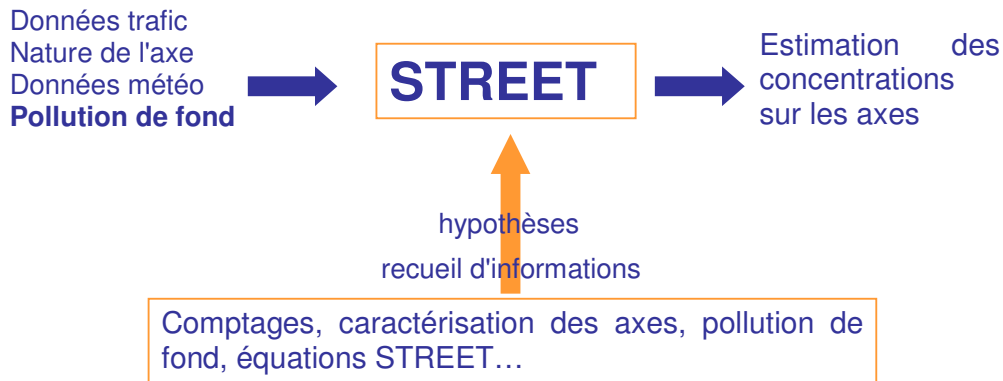
Il s'agit ici de réaliser une étude STREET standard. Le but est d'estimer le long des axes les concentrations de polluants (NO_2 et benzène) engendrés par le trafic routier. Cependant, le modèle STREET requiert en **donnée d'entrée des informations relatives à la pollution de fond**. Il se dégage donc un point particulier qu'il faut veiller à respecter : la donnée d'entrée qui concerne la pollution de fond correspond obligatoirement à la pollution de fond estimée lors de la première étape. Ainsi, la pollution de fond moyenne par axe doit être estimée à partir de la cartographie de pollution de fond, afin d'éviter toute incohérence (comme par exemple un niveau de pollution de proximité automobile inférieur à la pollution de fond).

Ceci implique notamment deux choses :

- L'étape de mise en place de la cartographie de fond doit obligatoirement précéder l'étape de calculs sous STREET;
- **Une méthode de calcul des concentrations moyennes rencontrées sur chaque axe** doit être mise en place.

Afin d'effectuer ce calcul de moyennes sur chaque axe, un outil de calcul sous Excel (Macro Excel) a été mis au point.

Le travail sur les données d'entrée de STREET ne concerne pas seulement la pollution de fond. Les données d'entrée concernent également les configurations des axes, les comptages routiers, les conditions de circulation, etc..... Le détail de la mise en place d'une étude STREET sera expliqué par l'exemple de Périgueux, expliquant notamment le travail de recueil d'informations et de formulation d'hypothèses.



III.2.2.b. Discrétisation des données STREET

Le phénomène de pollution automobile le long des axes est représenté par des concentrations attribuées à des axes ou tronçons d'axe. Ce type d'information est intéressant mais ne peut pas être interprété sous ISATIS, outil qui interpole sur une grille à partir de données type "points". Le principe même de la méthode consiste à rendre ces données linéiques de pollution automobile lisibles par ISATIS en les discrétisant. Ainsi un ensemble de lignes ou poly-lignes représentant la pollution sur le réseau routier devient après discrétisation un chapelet de points répartis le long des axes, chaque point étant renseigné d'une estimation de la concentration.

Cette discrétisation s'effectue sous MAPINFO, en utilisant une nouvelle commande de l'extension Vertical Mapper.



III.2.2.c. Traitement des données de concentrations sur le chapelet de points

Avant de spatialiser les concentrations STREET, c'est-à-dire de déterminer la décroissance des niveaux de concentrations autour des axes, il est important de les transformer au préalable. En effet, il faut garder une certaine cohérence entre les concentrations estimées par STREET et les mesures de fond, de proximité automobile et des points impactés proches des axes. L'idée est de **conserver l'allure générale** des concentrations modélisées par STREET et de les **réévaluer grâce aux mesures dont on dispose**. Cette étape est importante puisque c'est elle qui permet l'utilisation des concentrations discrétisées de STREET combinées avec les mesures (de fond, PA).

L'étape de traitement des données se déroule sous ISATIS, en trois temps.

- **Comparaison STREET/mesures de fond** : il peut exister des incohérences entre les immissions modélisées par STREET et les concentrations de fond, c'est-à-dire des points où la concentration modélisée sous STREET serait inférieure à la concentration de fond. Il faut alors corriger ces valeurs en rabattant les données à la valeur de fond (choix du maximum).



La nouvelle variable assurant la cohérence entre les concentrations STREET et la pollution de fond sur le chapelet de points résulte d'une opération sur les deux variables : le choix du maximum.

Les opérations sur les variables fait appel à la commande "Calculator" qu'il a fallu maîtriser.

- **Réévaluation sur l'ensemble des points des concentrations STREET par rapport aux mesures en PA** : il s'agit ici d'observer la cohérence entre les concentrations estimées par STREET sur les points de mesure en PA et les mesures. A partir de cette observation, l'ensemble des données STREET pourront être recalées aux concentrations observées en effectuant un krigeage avec dérive externe.



La méthode consiste à effectuer un **krigeage avec dérive externe des mesures en proximité automobile** avec comme **dérive externe les concentrations STREET**. Cependant, chaque point de proximité automobile ne coïncide pas exactement avec un point du chapelet. Pour permettre la comparaison STREET/proximité automobile, il faut faire migrer les points de mesures en proximité automobile pour qu'ils coïncident localement avec un point du chapelet.

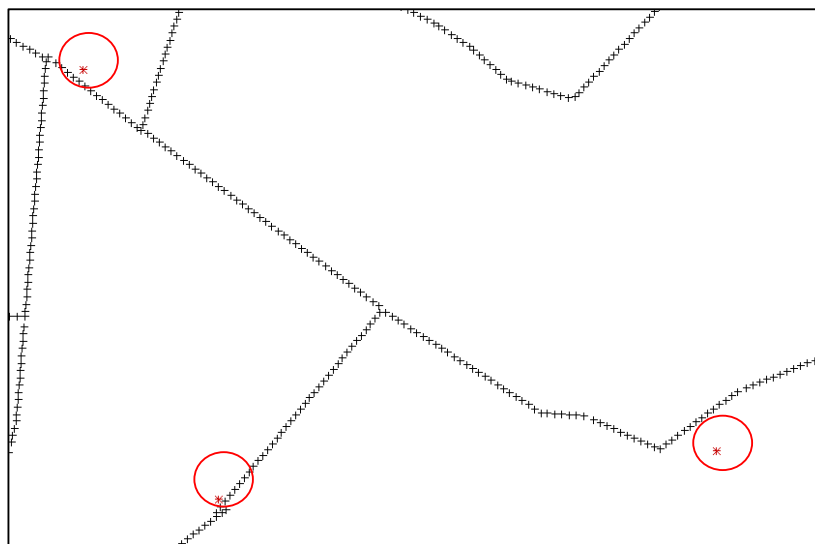


Figure n° 15 : 3 Points de mesures PA et chapelet de points ne coïncidant pas.

Pour permettre le KDE, la commande "Migrate" a du être maîtrisée.

Après avoir fait coïncider les points de mesures avec les points de chapelet, il faut réaliser le KDE. Cette étape consiste finalement à faire une régression linéaire exprimant les mesures en PA en fonction des mesures STREET:

$$[]_{PA} = a \times []_{STREET} + residu$$

Les résidus, et le coefficient a sont calculés à partir des points de mesure PA (chacun ayant migré sur le point du chapelet le plus proche) et des mesures STREET sur ces mêmes points. Le principe du KDE est d'estimer sur les nœuds d'un fichier résultat la concentration finale en utilisant la même combinaison linéaire, et en interpolant les résidus calculés sur ces points. C'est ainsi que

l'ensemble des concentrations du chapelet de points, qui sont déjà cohérentes avec les mesures de fond, sont réévaluées à partir des mesures PA.

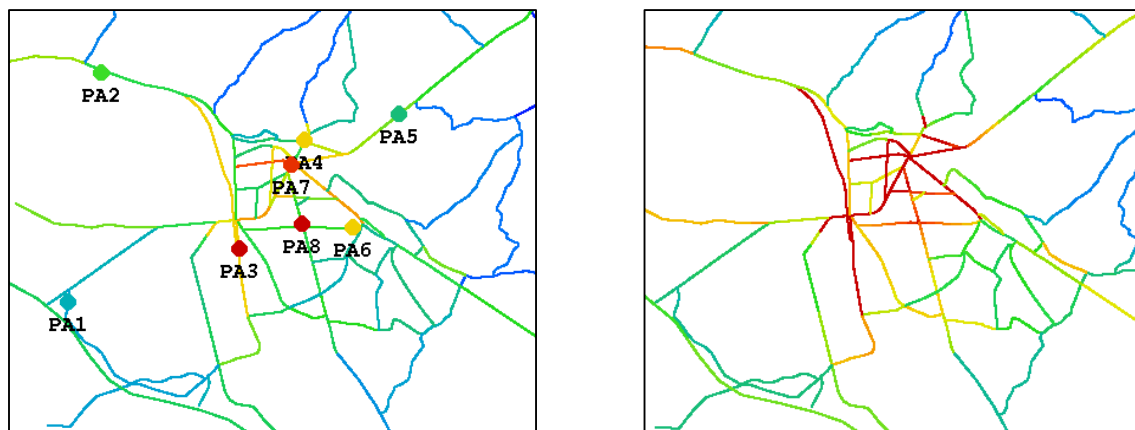


Figure n° 16 : Mesures PA superposées au chapelet de points avant KDE à gauche, et chapelet après KDE à droite

- **Ajout au chapelet de points des dernières mesures encore non exploitées** : il s'agit des points impactés qui ont été retirés lors de la cartographie de fond. Pour ne pas perdre leur information, ils sont rajoutés au fichier de points lors de cette dernière étape. Le résultat sera donc un nouveau fichier de points composé du chapelet et des points impactés.

Afin d'ajouter au fichier de points les points impactés, la commande "Merge" a été utilisée.

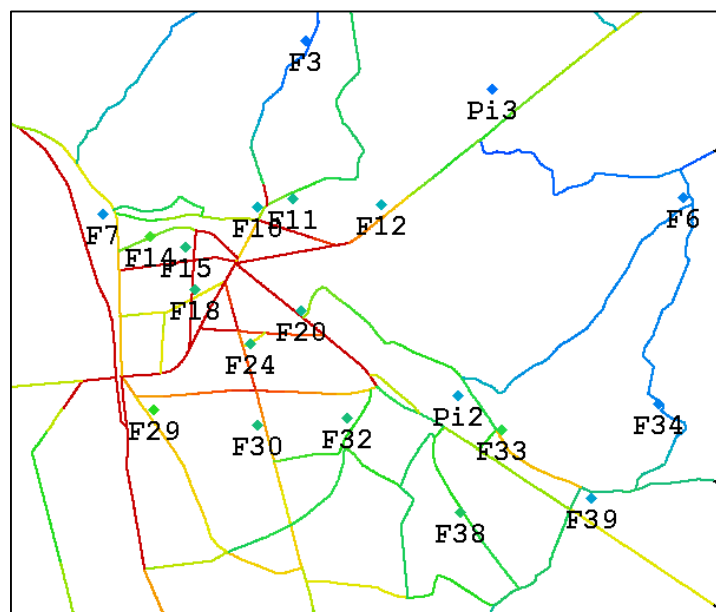


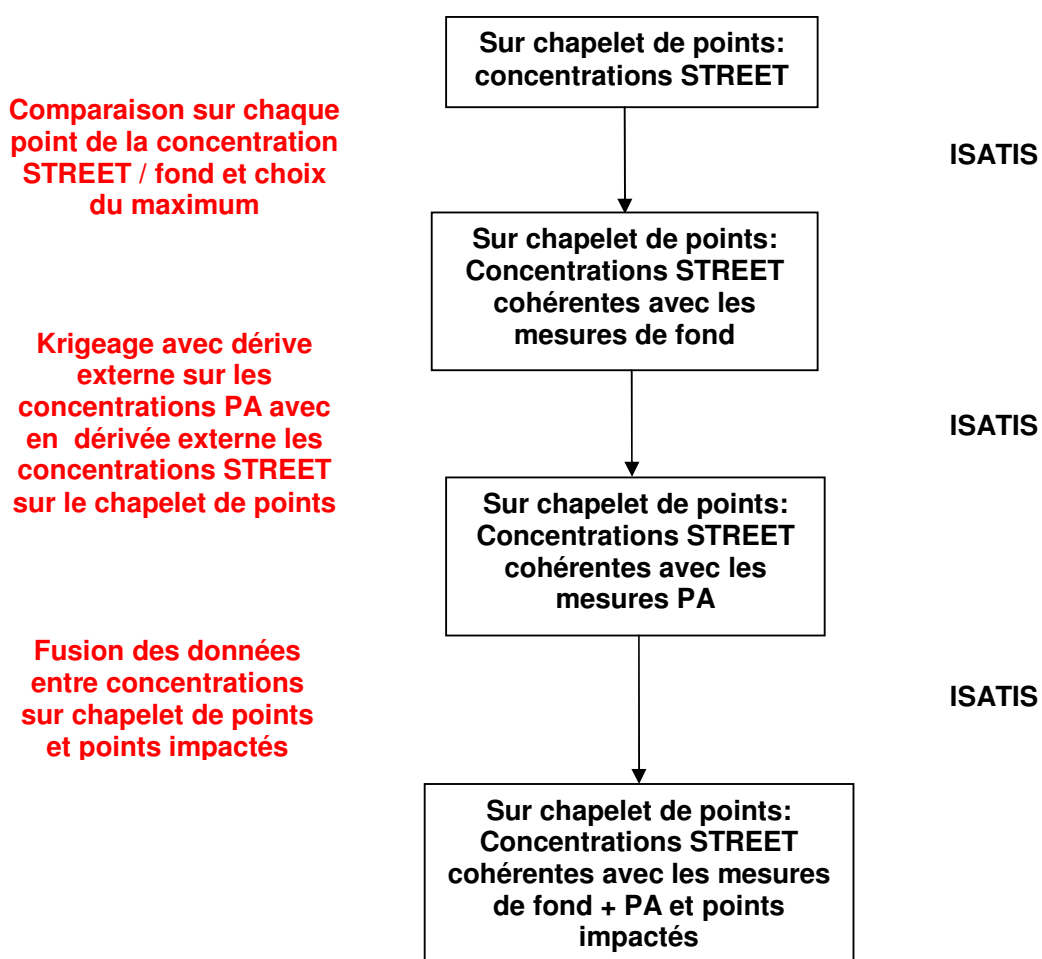
Figure n° 17 : Chapelet de points (maillage très fin) avec les points impactés.



A la fin de cette étape, un nouveau fichier de points a été créé. Ce fichier contient :

- les points impactés;
- les points du chapelet dont des concentrations STREET sont cohérentes avec la cartographie de fond, et les mesures de PA.

Les trois étapes se sont ainsi déroulées :



III.2.2.d. Procédure d'interpolation : spatialisation des surconcentrations

L'étape précédente permet d'obtenir un fichier de points répartis le long des axes cohérent grâce à l'utilisation des estimations STREET et des mesures. Ces données sont dans cette étape spatialisées.

La décroissance des niveaux de pollution à partir des axes est **exponentielle**. Cependant, la portée de cet impact n'est pas fixée.

Il s'agit donc là d'un deuxième paramètre à faire varier : la portée de la décroissance.

Le travail de spatialisation s'effectue sur des données de **surconcentrations**. Ces surconcentrations s'obtiennent simplement en soustrayant la pollution de fond à la pollution de proximité routière modélisées (puis réévaluée) sur les axes. Cette étape permet ensuite d'obtenir simplement la cartographie finale en sommant cartographie de fond et cartographie des surconcentrations.

La suite de la méthode prévoit de **diviser l'ensemble des points en deux populations** afin d'effectuer la spatialisation en deux fois: une première pour les faibles surconcentrations, et la deuxième pour les plus élevées.

Les raisons de cette spatialisation en deux fois par tranches de concentration viennent de problèmes liés à STREET. Le logiciel estime de **manière indépendante** les concentrations pour chaque axe rencontré.

Si un axe connaissant un très faible trafic se trouve proche d'un très gros axe, dans la réalité, la concentration rencontrée au niveau du petit axe sera fortement influencée par l'axe voisin. STREET procédant de manière indépendante ne verra pas cette influence et estimera de faibles concentrations sur le premier axe et des concentrations élevées sur le deuxième.

De plus, lors de la spatialisation, si ISATIS doit interpoler la surconcentration sur un point situé entre les deux axes, il donnera lors du calcul **autant de poids à la faible surconcentration qu'à la surconcentration élevée**, ce qui nivellera les surconcentrations vers le bas alors qu'en réalité c'est l'axe le plus important qui influence les valeurs des surconcentrations autour de lui vers le haut.

De même lorsqu'un axe important croise un axe plus petit, nous risquons de voir la surconcentration spatialisée décroître autour de l'axe plus important au niveau du croisement, ce qui ne reflète évidemment pas la réalité.

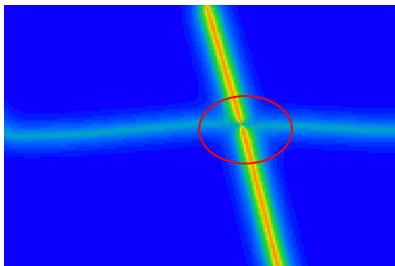
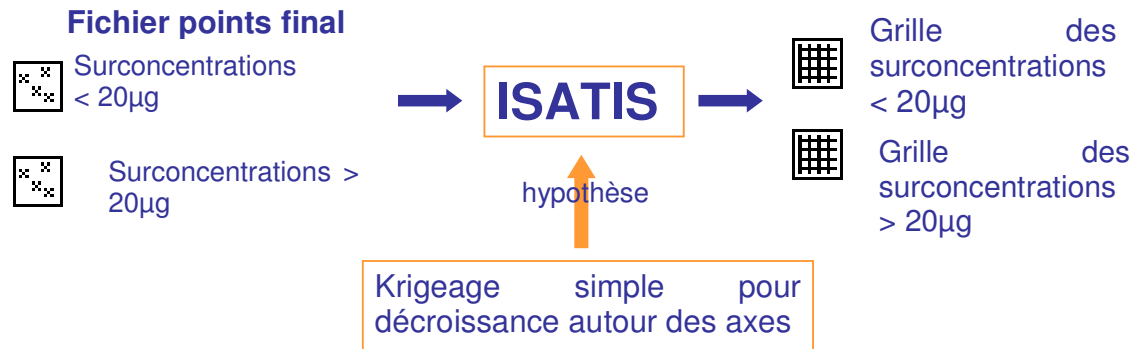


Figure n°18: Exemple d'interpolation de l'ensemble des surconcentrations à un croisement, si cette interpolation est réalisée en une seule fois

Ainsi, en procédant en deux fois, la première spatialisation concernant les concentrations élevées ne sera pas nivelée par le bas par les concentrations faibles, puis inversement. Le choix du maximum sur les zones d'influence de fortes et de faibles concentrations va faire prévaloir les fortes concentrations, résultat auquel nous pouvons nous attendre dans la réalité.

Les surconcentrations sont spatialisées en deux fois, par Krigeage Simple (KS à moyenne connue), en utilisant comme modèle de variogramme une structure exponentielle, et dont la portée reste à paramétrer. La moyenne des surconcentrations est mise à zéro.



Le résultat des 2 krigeages simples fournit donc 2 grilles des surconcentrations autour des axes, sur une distance d'impact d'une centaine de mètres (selon le paramétrage). Les points en dehors de cette influence n'ont pas été calculés lors de l'interpolation, ils sont considérés comme non renseignés.

Afin d'attribuer à cet ensemble de points non impactés par les axes routiers la valeur de 0 en surconcentration, une nouvelle commande a été utilisée sous ISATIS.

La cartographie des surconcentrations s'obtient finalement en choisissant en tout point de la grille le maximum des deux grilles des surconcentrations.

III.2.3. Cartographie finale

La cartographie finale est tout simplement la somme des deux cartographies obtenues précédemment.



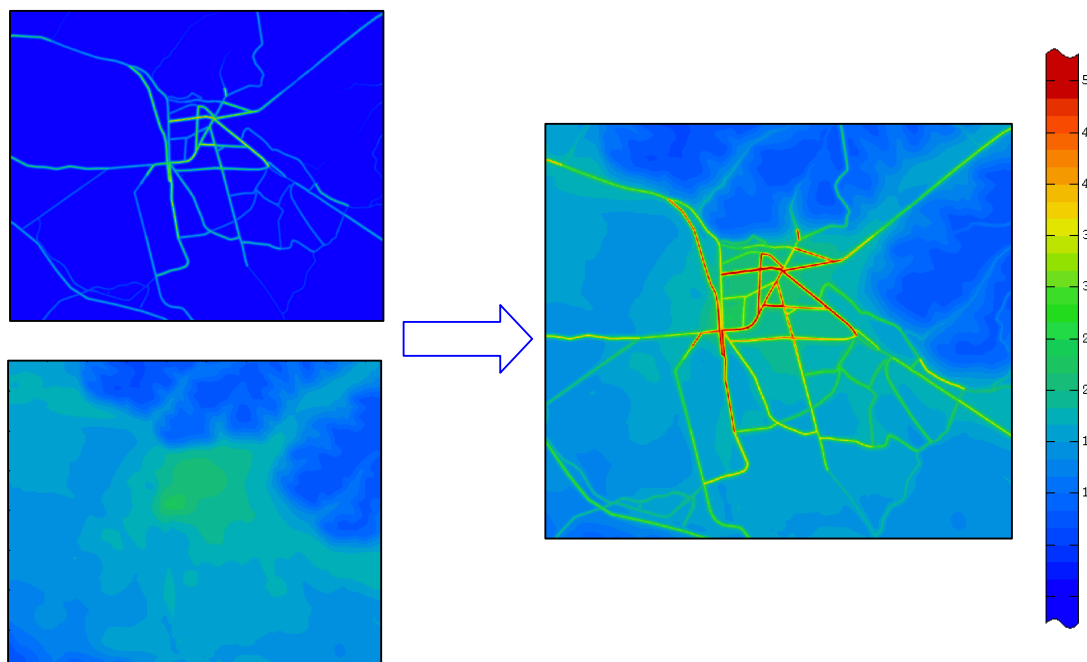


Figure n° 19 : Somme des deux cartographies pour obtenir la cartographie finale (Agen)

III.3. Mise en place de la nouvelle méthode : étapes de validation

III.3.1. Utilisation de nouveaux outils

Pour adapter la nouvelle méthode de cartographie aux logiciels, il a fallu au cours de ce stage approfondir la connaissance des outils. Parmi les différentes fonctionnalités qu'offrent ISATIS, MAPINFO et STREET, il a fallu trouver les commandes adaptées.

III.3.1.a. Les nouvelles commandes

Dans le but de rédiger le mode opératoire, il est important de recenser toutes ces "nouvelles" commandes. En effet, plus de détails seront apportés pour ces étapes complexes, faisant intervenir des commandes encore non utilisées, donc non maîtrisées par le lecteur du mode opératoire.

La recherche de ces "nouvelles" commandes et l'appropriation des nouvelles fonctionnalités a d'ailleurs représenté une part importante du travail pendant le stage. Au début du stage, plusieurs points étaient encore inconnus :

- Comment discrétiser les données?
- Comment réaliser le krigeage avec dérive externe des points de mesure en proximité automobile avec comme variable auxiliaire les concentrations STREET sur le chapelet de points? Régression linéaire avec ou sans constante?
- Comment paramétrer le krigeage simple pour spatialiser les surconcentrations?

Finalement 9 nouvelles fonctionnalités ont été utilisées pour la mise en place de la méthode.

Logiciel	Etape de la méthode	But de la commande
ISATIS	Choix des points non impactés	Comment créer une sélection géographique?

MAPINFO	Calcul des concentrations de fond moyennes par axe	Comment discrétiser?
ISATIS	Calcul des concentrations de fond moyennes par axe	Comment importer un fichier de points?
ISATIS	Calcul des concentrations de fond moyennes par axe	Comment interpoler une variable en un point?
ISATIS	Calcul des concentrations de fond moyennes par axe	Comment éliminer les doublons d'un fichier de points?
ISATIS	Traitement des données de concentration sur le chapelet de points	Comment faire des opérations sur les variables?
ISATIS	Traitement des données de concentration sur le chapelet de points	Comment faire migrer un ensemble de points?
ISATIS	Traitement des données de concentration sur le chapelet de points	Comment fusionner deux fichiers points?
ISATIS	Procédure d'interpolation : spatialisation des surconcentrations	Comment remplacer sur une grille les points indéfinis par des 0?

Ces 9 nouvelles fonctionnalités ont été intégrées à la rédaction du mode opératoire.

Deux étapes ont notamment demandé du travail :

- **Etape de discrétisation.** Initialement, il était pressenti de réaliser la discrétisation sous ISATIS en utilisant un "fichier journal". Cette méthode nécessitait l'import sous ISATIS du réseau d'axes routiers sous forme de fichier de polygones. Cependant, il s'est avéré impossible d'importer des lignes depuis MAPINFO sous ISATIS. L'étape de discrétisation étant impossible sous ISATIS, les recherches se sont centrées sur les commandes de MAPINFO. C'est finalement une commande de l'extension de MAPINFO, VERTICAL MAPPER, qui a permis de réaliser cette discrétisation.
- **Etape de calcul des concentrations de fond moyennes par axe.** Cette étape requiert, à partir de la cartographie de fond de calculer les concentrations moyennes par axe. Il a été choisi d'importer le fichier de points des axes discrétisés sous ISATIS (*nouvelle commande permettant l'import d'un fichier de points*), et d'interpoler sur ces points les concentrations de la cartographie de fond (*nouvelle commande permettant l'interpolation d'une variable en un point*). Pour chaque point du chapelet, les données de concentration et l'identifiant de l'axe auquel appartient ce point sont exportés sous Excel. Enfin, c'est l'application d'une Macro sous Excel qui permet de moyenner sur chaque axe la concentration de fond avec l'ensemble des points.

III.3.1.b. Mise au point de l'outil de calcul des moyennes d'axes

Il s'agit d'une **Macro sous Excel**. Le but du programme est de calculer la concentration moyenne de fond pour chaque axe. L'outil ISATIS fournit sur une feuille de calcul la liste de l'ensemble des points issus de la discrétisation des axes, et pour chaque point, l'identifiant de l'axe auquel il appartient, ainsi que la pollution de fond en ce point. La macro va sur une autre feuille de calcul attribuer à chaque axe la moyenne des points qui lui sont rattachés.

III.3.2. Paramétrage

III.3.2.a. Deux paramètres : distance d'impact et portée

La nouvelle méthode a généré deux paramètres qu'il reste à fixer. Il s'agit de la **distance d'impact** d'un axe pour déterminer les points à retirer lors de la cartographie de fond, et de la **portée** de la décroissance des niveaux de pollution autour des axes lors de la spatialisation.

Ces deux paramètres ne sont pas forcément égaux, même s'ils sont liés. Il est par exemple souhaitable que si une distance d'impact est choisie pour réaliser la cartographie de fond, la portée soit inférieure ou égale à cette distance. Dans le cas contraire, il existe certaines zones où des points "assez" proches des axes sont pris en compte, et où lors de l'interpolation des surconcentrations sont aussi rajoutées.

Cependant, beaucoup de **combinaisons (distance d'impact/portée)** ont été réalisées, en ne tenant pas compte de ce genre de considération. Tout a été testé afin de pouvoir argumenter le choix final des paramètres. D'autre part les comportements des deux polluants NO₂ et benzène étant différents, les tests réalisés ont été adaptés.

Pour le polluant NO₂ :

Distance d'impact / Portée	50	100	200
50	x	x	x
100	x	x	x

Pour le polluant benzène :

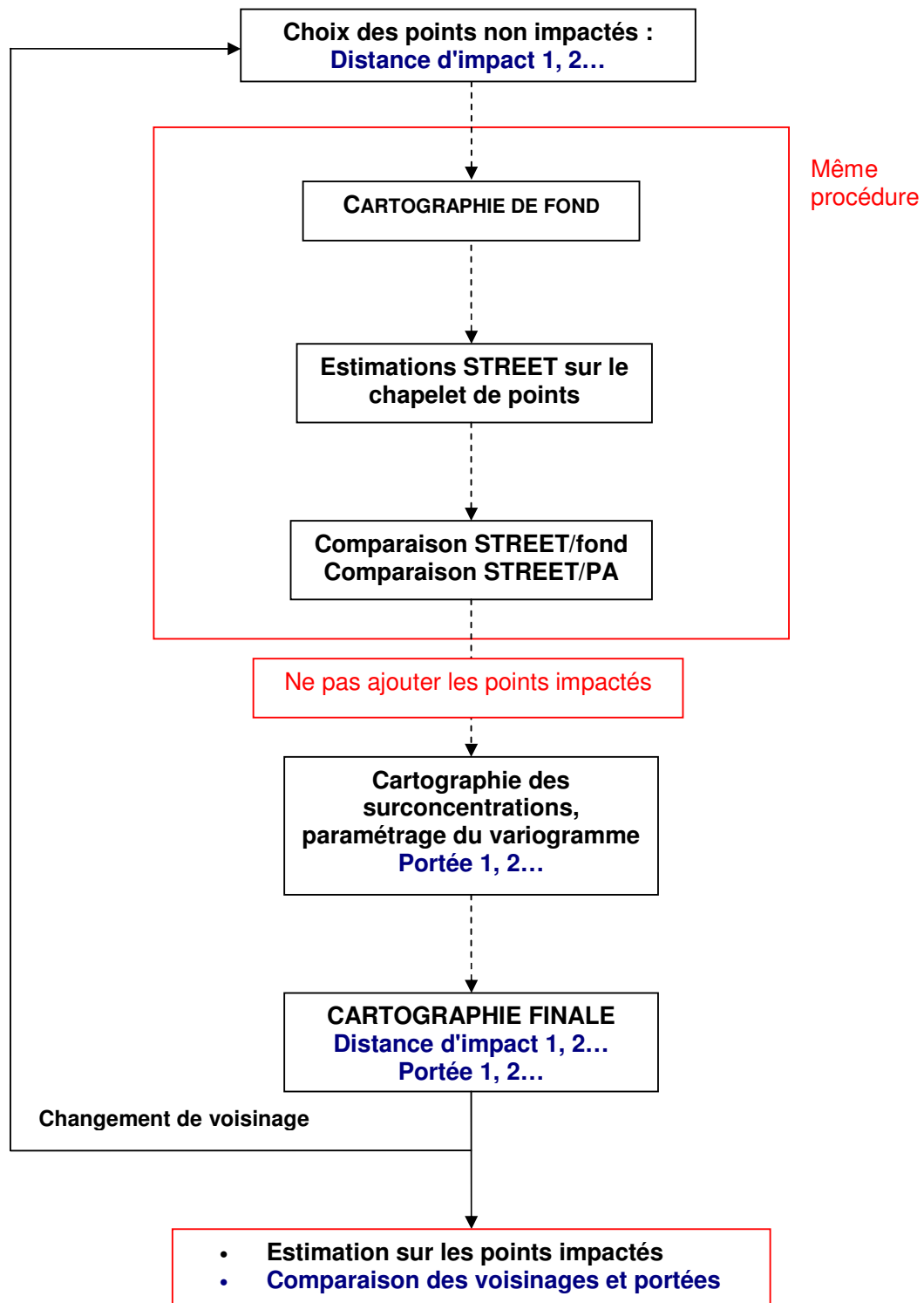
Distance d'impact / Portée	50	100
25	x	x
35	x	x
50	x	x

Pour déterminer le meilleur paramétrage, toutes les combinaisons ont été testées, afin de retenir celle qui fournit la meilleure estimation.

Pour cela, les **estimations ont été comparées aux mesures** en plusieurs points. Nous disposons en effet d'un ensemble de points de mesures et sur certains de ces points, l'estimation que produit la méthode de cartographie a été calculée. Cette estimation consiste à interpoler sur les points de mesures retenus une concentration à partir de la cartographie finale.

Pour valider notre démarche, il est nécessaire que les **points** sur lesquels nous faisons cette comparaison ne soient **pas utilisés dans la méthode**. Intuitivement, il semble logique de vouloir tester la méthode sur les points impactés proches des axes. En effet, l'intérêt de cette méthode vient du fait qu'elle estime justement cet impact des axes. **Pour comparer les combinaisons, il faut donc comparer la justesse de l'estimation des concentrations sur les points impactés.**

Ainsi, la méthode de comparaison des combinaisons reprend la méthode générale de cartographie et y inclut quelques changements : l'étape d'ajout des points impactés est bien-sûr supprimée, et une estimation est faite sur ces points non utilisés à partir de la cartographie finale.



III.3.2.b. Réalisation du KDE : intégration d'une constante lors de la régression linéaire?

L'étape du krigeage avec dérive externe sur les mesures de proximité automobile avec comme variables auxiliaires les concentrations STREET permet de réévaluer les concentrations sur le

chapelet de points grâce aux mesures. Les premiers tests sur la méthode ont permis de déterminer si l'usage d'une constante lors de la régression linéaire était nécessaire.

En choisissant d'intégrer la constante, la réévaluation des données STREET à partir des mesures risque d'être faussée. Si l'estimation STREET n'est pas bien corrélée avec les mesures PA, l'équation de régression avec constante risque de donner une **constante trop élevée**.

Par exemple pour l'étude de Périgueux, les régressions linéaires donnent :

- Avec constante :

$$[]_{PA} = 0.31 \times []_{STREET} + 34.55 + \text{residu}$$

Avec une constante de 34.5, la concentration minimale est très élevée, même pour les concentrations STREET initialement très faibles. L'ajout de la constante implique donc une **surestimation des concentrations**.

- Sans constante :

$$[]_{PA} = 1.2 \times []_{STREET} + \text{residu}$$

Avec cette équation, les faibles concentrations évaluées par STREET ne sont pas excessivement réévaluées à la hausse.

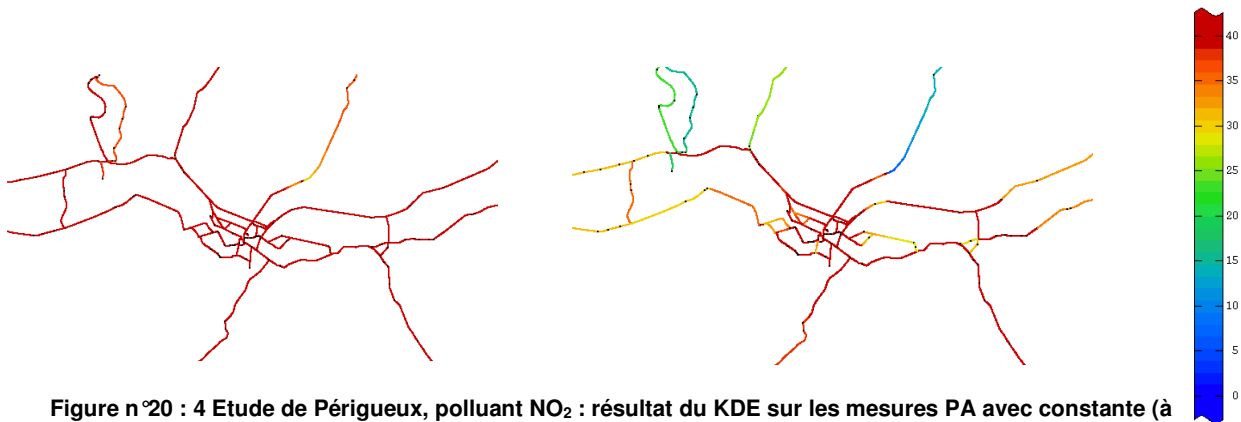


Figure n°20 : 4 Etude de Périgueux, polluant NO₂ : résultat du KDE sur les mesures PA avec constante (à droite) et sans constante (à gauche)

Le choix s'est donc rapidement porté sur une **régression linéaire sans constante** pour l'étape de krigeage avec dérive externe sur les mesures en proximité automobile.

IV. Résultats : validation de la méthode sur 2 villes, Périgueux et Agen

L'application de la méthode à deux villes a permis 2 choses :

- La mise au point, l'adaptation de la méthode afin de rédiger le mode opératoire;
- Le choix des meilleurs paramètres : meilleure combinaison (distance d'impact/portée).

L'ensemble des combinaisons des deux paramètres, ainsi que la technique d'évaluation de la méthode ont été précédemment présentés.

La première ville, **Périgueux** a servi de test. Il s'agit du **premier essai** de la méthode, essai qui a permis de répondre aux premières questions : *La méthode est-elle réalisable? L'association des outils STREET et ISATIS est-elle fiable? Disposons-nous de tous les outils, toutes les commandes nécessaires à la réalisation de la méthode?*

Ce premier test a permis l'adaptation de la méthode aux outils d'AIRAQ, et la mise en place du mode opératoire.

L'application de la méthode sur la ville de Périgueux ayant été concluante, son application sur la ville d'**Agen** a fait figure de **validation**. En effet, lors du premier test sur Périgueux, un **paramétrage optimal** est apparu. Se pose alors la question : *Est-ce que ce paramétrage optimal est constant, quelque soit la ville étudiée?*

Si les résultats sur la ville d'Agen fournissent le même paramétrage optimal, la rédaction du mode opératoire et la réalisation des cartographies se trouvent finalement fortement simplifiés : on admet qu'un paramétrage optimal existe, et que **pour toute réalisation de cartographie, le même mode opératoire peut être suivi**.

IV.1. Mise en place des études

IV.1.1. Données de mesures

IV.1.1.a. Périgueux

Les données sont issues de la campagne de mesures par échantillonnage passif du 23 août au 20 septembre 2006 (campagne de mesures estivale), et du 7 mars au 3 avril 2007 (campagne de mesures hivernale). Les deux polluants étudiés sont le dioxyde d'azote et le benzène.

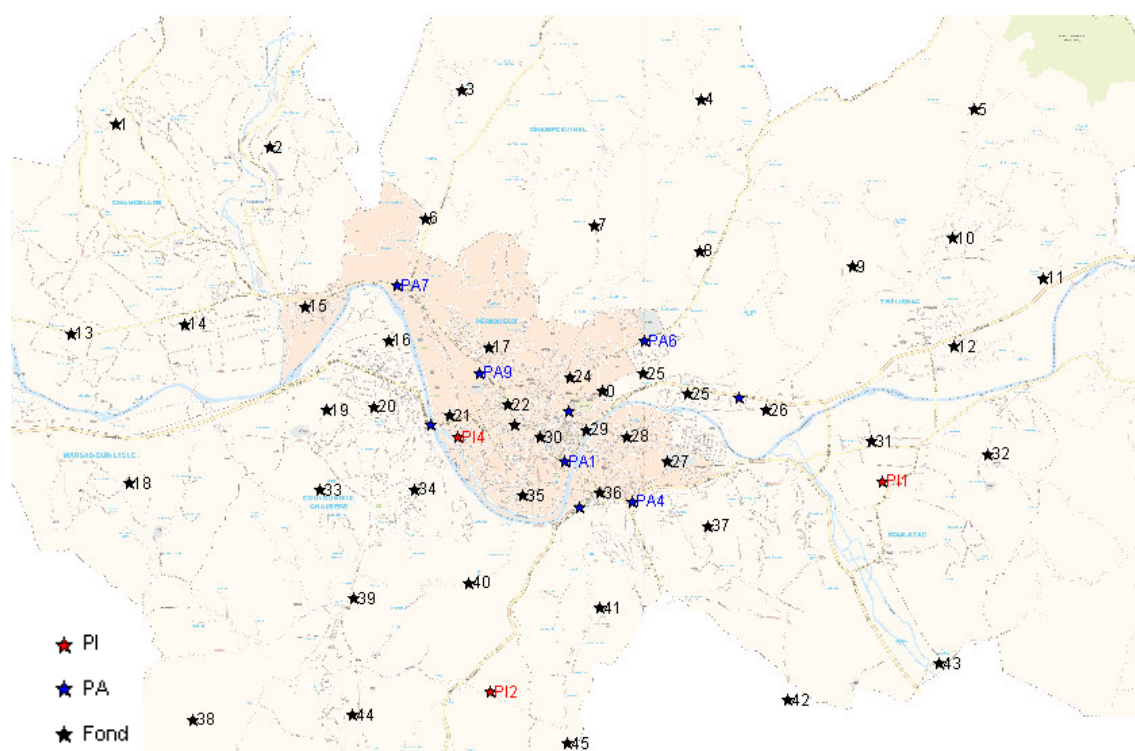


Figure n° 21 : Localisation des points de mesure sur l'agglomération de Périgueux.

La campagne comporte 47 sites de fond, 4 sites de proximité industrielle et 9 sites de proximité automobile.

Le repérage sous MAPINFO des points de mesure se présente sous la forme d'une **table de données**, avec pour chaque point : les coordonnées, les concentrations hivernales, les concentrations estivales, les concentrations moyennes, et le type de site (F, PI ou PA). Ce tableau peut être exporté vers ISATIS (en passant par les formats texte puis Excel).

Le fichier de points obtenu sous ISATIS permet la réalisation de la cartographie de fond. Il faut au préalable importer les données auxiliaires de MAPINFO vers ISATIS.
Le premier paramètre à faire varier étant la **distance d'impact**, il faut réaliser autant de cartographies de fond que de distances à tester :

Distance d'impact	<50 m	<100 m	<200 m
Nombre de points considérés comme impactés	6	14	22
Nombre de points dans la sélection pour la cartographie de fond	44	36	28

Ainsi, pour les cartographies de NO₂, 3 sélections sont testées (50 m, 100 m, 200 m), et pour le benzène, 2 sélections sont testées (50 m et 100 m).

Avant de réaliser les cartographies de fond, la dernière étape consiste à tester l'ensemble des variables auxiliaires, avec les différentes techniques d'interpolation pour déterminer la cartographie de fond.

Sur l'agglomération de Périgueux, les techniques d'interpolation utilisées pour la cartographie de pollution de fond sont :

- Pour le NO₂ : KDE avec comme variables auxiliaires l'altitude et la densité;
- Pour le benzène : KDE avec comme variables auxiliaires l'occupation du sol et la densité.

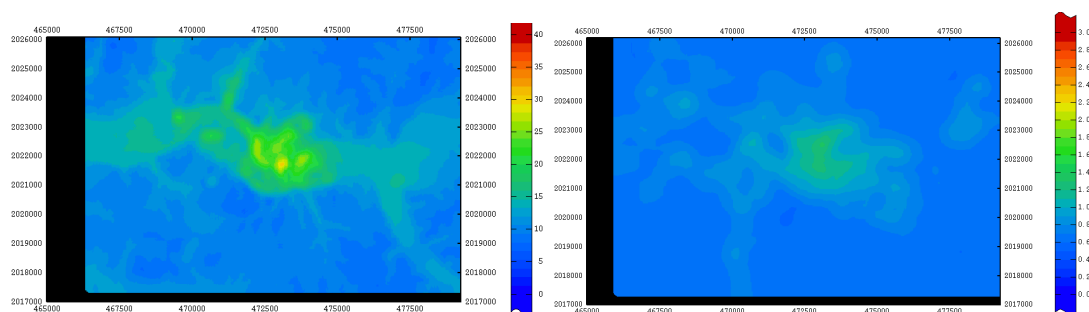


Figure n° 22 : Cartographies de fond retenues sur Périgueux pour le NO₂ (à gauche) et le benzène (à droite).

IV.1.1.b. Agen

Les données sont issues de la campagne de mesures par échantillonnage passif du 19 juin au 17 juillet 2007 (campagne de mesures estivale), et du 21 novembre au 20 décembre 2007 (campagne de mesures hivernale). Les deux polluants étudiés sont le dioxyde d'azote et le benzène.

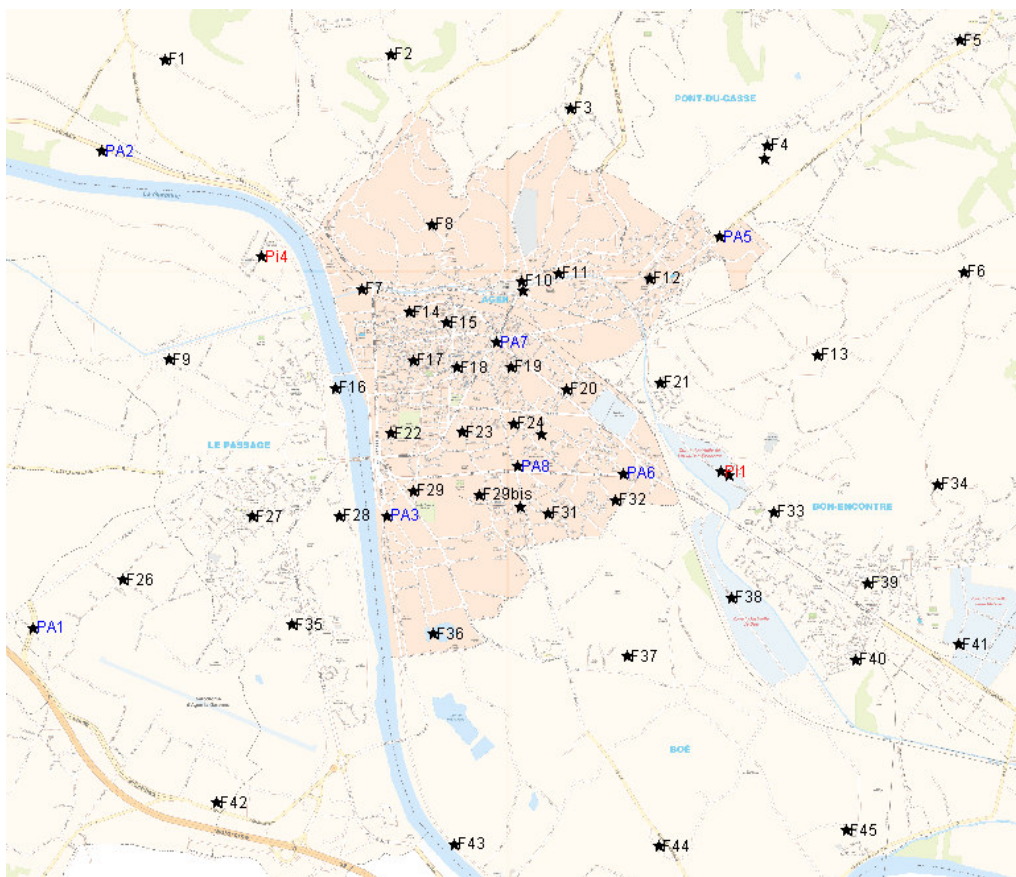


Figure n° 23 : Localisation des points de mesure sur l'agglomération d'Agen.

La campagne comporte 46 sites de fond, 4 sites de proximité industrielle et 8 sites de proximité automobile.

Distance d'impact	<50m	<100m	<200m
Nombre de points considérés comme impactés	10	23	34
Nombre de points dans la sélection pour la cartographie de fond	40	27	16

En ce qui concerne les techniques d'interpolation, sur l'agglomération d'Agen, les techniques utilisées pour la cartographie de pollution de fond sont :

- Pour le NO_2 : KDE avec comme variables auxiliaires l'altitude et l'occupation du sol;
- Pour le benzène : KDE avec comme variables auxiliaires l'occupation du sol et la densité.

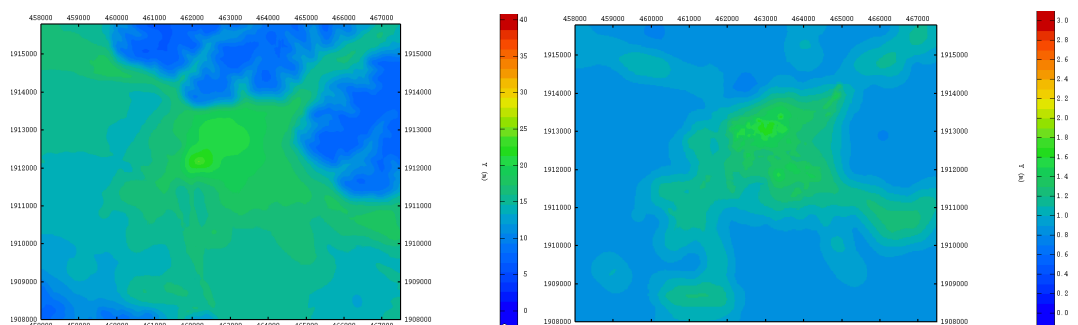


Figure n° 24 : Cartographies de fond retenues sur Agen pour le NO_2 (à gauche) et le benzène (à droite).

IV.1.2. Etude STREET

Lors de la mise en place de la méthode, les études STREET n'ont pas posé de problème : l'utilisation de l'outil est facile et sa mise en œuvre pareille à toute étude STREET standard. Cependant, la difficulté a consisté à réunir les données d'entrée du logiciel.

Le but de cette partie est de montrer le **travail amont à l'étude STREET** sur Périgueux : recueil des données sur le terrain, formulation d'hypothèses...

IV.1.2.a. Caractérisation de l'axe

La configuration de l'axe a été appréciée sur place par l'utilisateur parmi les **98 configurations** possibles. Il ne s'agit donc pas ici d'hypothèse réellement formulée par l'utilisateur mais d'un choix subjectif de telle ou telle configuration.

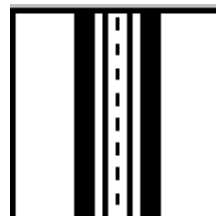


Figure n° 25 : 5 Rue Saint-Front et sa configuration de rue (type S2GS)

Un axe est aussi caractérisé par son orientation (angle formé par rapport à la verticale) et la pente (fixée à 0% lorsqu'il n'y a pas de relief et 2% sinon).

IV.1.2.b. Données météorologiques

Il s'agit des données sur la vitesse et la direction du vent, ainsi que sur le taux annuel de journées de pluie. Pour le travail sur l'agglomération de Périgueux, le pourcentage de jours de pluie a été fixé à 30%. La vérification sur PolAir des données annuelles sur le vent permettent de confirmer la direction: **Nord-ouest/Sud-est**, code 05 pour STREET. La moyenne annuelle de vitesse des vents sur l'agglomération de Périgueux, quant à elle, est plutôt de l'ordre de 3 m/s. Cependant, conformément aux conseils de STREET le code 01 pour une **vitesse moyenne de 2 m/s** a été retenu (relatif à la topographie du milieu, il s'agit aussi du cas le plus défavorable).

IV.1.2.c. Conditions de circulation

Il existe dans STREET **9 catégories de circulation**. Ici encore, le choix d'appartenance d'un axe à telle ou telle catégorie revient à l'utilisateur. Les critères sont:

Code catégorie de circulation	Vitesse moyenne en km/h	Description
F0	5	Centre villes, Stop & Go (100 % bouchonné)
F1	19	Voie secondaire, front continu de bâtiments, fortes perturbations
F2	28	Voie principale avec feux, perturbations moyennes
F3	32	Voie secondaire, bâtiments alignés à grandes distances, perturbations moyennes
F4	46	Voie principale prioritaire, faibles perturbations
F5	58	Traversée prioritaire, sans perturbations
F6	80	Autoroute
F7	105	Autoroute vitesse moyenne 105 km/h, PL 80 km/h
F8	130	Autoroute vitesse moyenne 130 km/h, PL 80 km/h

Pour chaque catégorie de circulation, un **pourcentage de bouchons** peut être défini. Nous avons choisi pour l'agglomération de Périgueux de respecter les pourcentages recommandés par le manuel STREET.

Catégorie de circulation	Pourcentage de bouchons
F1	30 %
F2	20 %
F3	10 %
F4	5 %
F5	3 %
F6-F8	pas d'information

IV.1.2.d. Composition de la flotte

Il s'agit de renseigner les données sur la **circulation journalière** : nombre de véhicules roulant sur l'axe par jour. Les données nécessaires ici sont les données de comptages. Pour Périgueux, quatre sources de données nous ont permis de déterminer les comptages routiers sur les différents axes de l'étude.

Ces sources n'étant pas équivalentes et chacune étant incomplète, nous avons dû formuler des hypothèses ainsi que des priorités dans le choix de la source.

Choix 1	Les comptages fournis par la communauté d'agglomérations de Périgueux, données datant de 2005 et 2006
Choix 2	Les comptages fournis par la mairie de Périgueux issus de deux études : "Circulation au sein de la ville ancienne", datant de novembre 2006, et le dossier d'enquête publique "Aménagement de la place Francheville" datant de février 2004
Choix 3	Les comptages déjà utilisés lors de l' étude régionale 2006
Choix 4	Les comptages fournis par la mairie issus d'une étude de l'ECCTA : "Aménagement du Centre Ville de Périgueux" datant de juin 2005

Les trois premières sources sont utilisables, données en circulation journalière, avec des degrés de confiance différents. Lorsqu'ils étaient disponibles, les comptages utilisés **en priorité** étaient donc ceux fournis par la **communauté d'agglomération**.

La quatrième source ne peut être utilisée telle-quelle. L'étude de l'ECCTA fournit des comptages effectués sur seulement 6 heures dans la journée (heures de pointes: 2 heures le matin, deux heures le soir, et deux heures le midi). Ces données sont horaires mais non représentatives de ce que

pourrait être une moyenne horaire effectuée sur 24 heures. Cependant, il est toujours intéressant de comparer pour différents axes les résultats d'une même étude.

En complément de ces données de comptages, il faut renseigner le logiciel sur la **composition de la flotte**. Nous avons fixé le pourcentage des poids lourds dans le centre à 2% et à 7% autour de la ville (pourcentage correspondant à la moyenne annuelle sur le département). Pour ce qui est des VUL (véhicules utilitaires légers), nous avons fixé dans le centre à 15% de la circulation journalière, et hors centre à 10%. En effet, la circulation du centre-ville comprenant moins de poids lourds, le pourcentage de VUL augmente. Le pourcentage des deux-roues a été fixé à 5% dans le centre et à 2% sur les autres axes.

IV.1.2.e. Pollution de fond

La pollution de fond présente au niveau de chaque axe fait aussi partie des données d'entrée du logiciel STREET. Les concentrations pour les polluants **NO₂** et **benzène** sont estimés à partir des **cartographies de la pollution de fond** sur l'agglomération. Pour les autres polluants, nous avons fait les hypothèses présentées dans le tableau suivant :

pollution de fond								
	Benzène	PM10	CO	NO2 98	NO2 50	NO2 moyen	SO2	NOx
	[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]
Centre-ville	Cartographie pollution de fond.	19	400	Calculés à partir de NO2 moyen.		Cartographie pollution de fond.	3	30
Hors centre		16	200				1	30

Dans STREET, les calculs des concentrations de **NO₂** sont effectués avec la **concentration moyenne annuelle**, mais aussi avec les données de **percentile 98 et 50**. Nous disposons des données de moyenne annuelle. STREET fonctionne avec les données en percentile 98 qu'il transforme ensuite en donnée moyenne et percentile 50. Des **équations linéaires** lient ces trois types de données. Les paramètres de ces équations dépendant de la situation locale, nous avons effectué des régressions linéaires avec les données dont dispose AIRAQ sur l'Aquitaine afin de trouver les paramètres permettant de passer de données moyennes aux données en percentile 98 et 50.

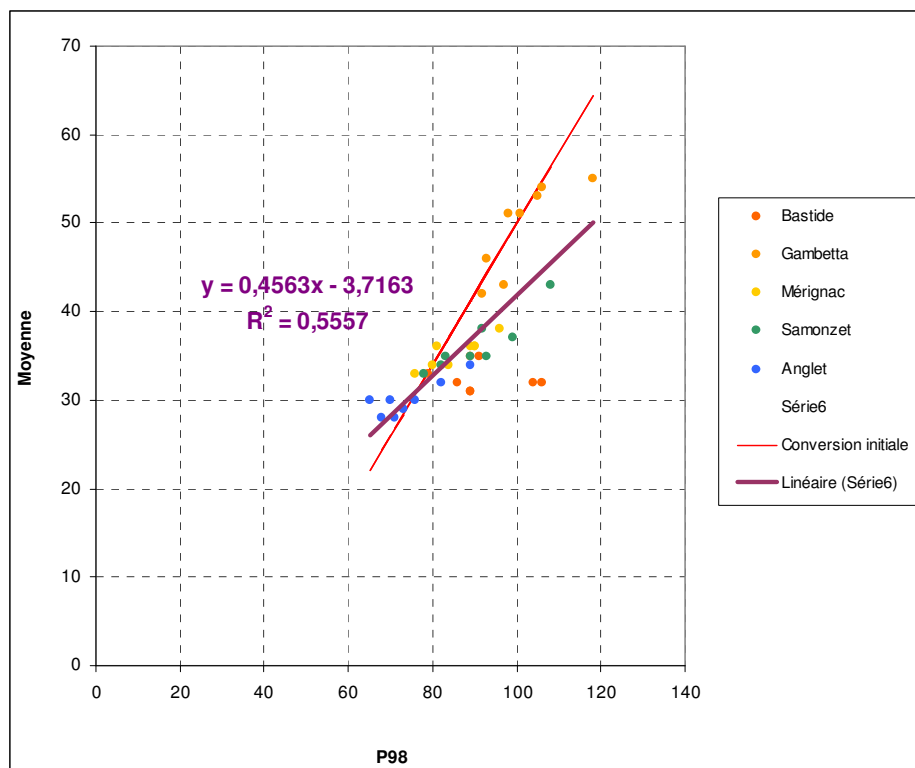


Figure n° 26 : Régression linéaire, moyenne en fonction du P98.

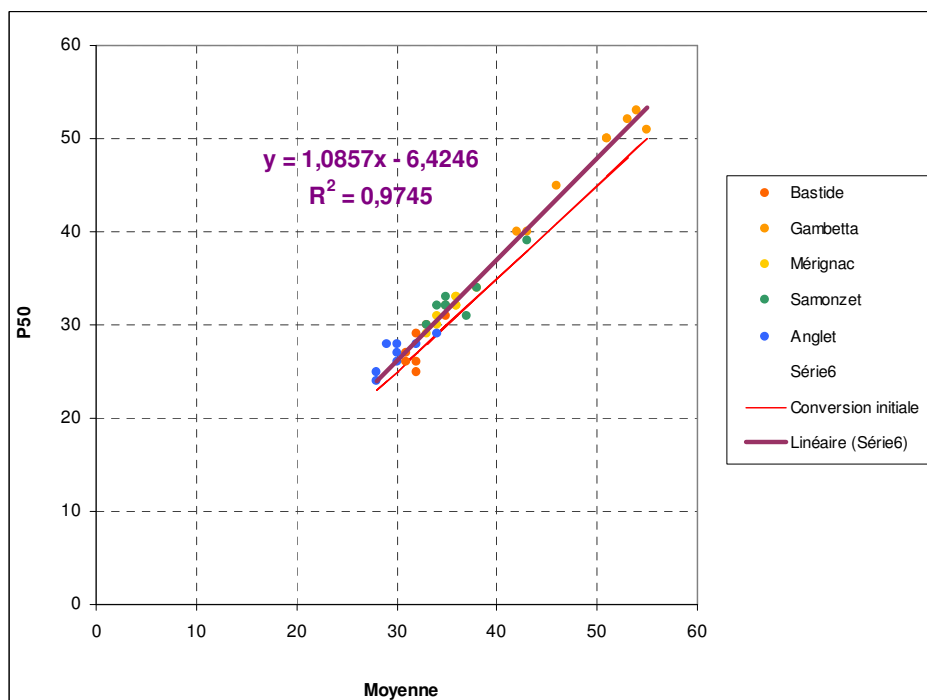


Figure n° 27 : Régression linéaire, P50 en fonction de la moyenne

$$[NO_2]_{moyenne} = 0.4563 \times [NO_2]_{P98} - 3.7163$$

$$[NO_2]_{P50} = 1.0857 \times [NO_2]_{moyenne} - 6.4246$$

Grace à ces équations de transformation, il est possible de fournir à STREET les données en P98 (et P50) à partir des données moyennes. De même, ce sont ces facteurs de conversion qu'utilise STREET pour donner ses résultats (à partir de P98, il calcule la moyenne et P50).

Ainsi, avant de lancer les calculs sous STREET, il est important de **vérifier toutes les hypothèses**, et notamment les équations linéaires liant NO₂ 50, NO₂ 98 et NO₂ moyen. L'étude sur l'agglomération d'Agen a été analogue. Néanmoins, moins d'hypothèses ont été nécessaires pour caractériser la circulation journalière, les données de comptages sur Agen étant de meilleure qualité.

Il faut également noter, que pour tester le premier paramètre, la distance d'impact, trois cartographies de fond pour le NO₂ et deux pour le benzène sont générées. Ces cartographies de fond fournissent autant de données d'entrée différentes pour STREET.

IV.2. Résultats

Les résultats obtenus sur Périgueux et Agen sont :

- La **validation de la méthode** avec le choix d'un paramétrage optimal : quelle **distance d'impact** choisir pour réaliser la cartographie de fond en retirant les points impactés ? Quelle est la **portée de la décroissance des niveaux de pollution** lors de l'étape de spatialisation des surconcentrations au niveau des axes routiers ?
- L'obtention de **nouvelles cartographies** de la pollution intégrant pollution de fond et phénomènes de proximité pour ces deux villes.

IV.2.1. Validation de la méthode

Rappelons la démarche utilisée pour **paramétrer au mieux la méthode de cartographie** :

- Appliquer la nouvelle méthode de cartographie en retirant les points impactés pour obtenir une carte finale intégrant pollution de fond et de proximité;
- Estimer les concentrations en ces points à partir du résultat;
- Comparer estimations/mesures sur ces points.

La comparaison concerne les résultats de la méthode pour **différentes combinaisons distance d'impact/portée**. Notons que faire varier la distance d'impact revient à faire varier le nombre de points impactés à retirer de la méthode. Ainsi, pour comparer deux méthodes utilisant deux distances d'impact différentes, il faut comparer la justesse de l'estimation sur la même sélection de points : la plus petite comprenant les points distants de la plus petite distance d'impact.

La méthode sera validée si le paramétrage optimal reste le même pour Périgueux et Agen.

IV.2.1.a. Meilleurs paramètres pour le polluant NO₂

Pour le polluant NO₂, 6 paramétrages différents sont à comparer. Les distances d'impacts sont de 50 m, 100 m et 200 m, impliquant 3 sélections de points. Ce sont **les points situés à 50 m d'un axe** qui sont **communs aux 3 sélections**.

Ainsi, sur chacun de ces points sont comparés estimations et mesures. Le calcul des **erreurs** et notamment de la **moyenne des erreurs** pour chaque paramétrage permet de déterminer la meilleure combinaison des 2 paramètres.

Sur Périgueux, les résultats indiquent que les erreurs d'estimations sont minimisées pour le paramétrage : Distance d'impact 100 m et portée 50 m, comme le montre le tableau des résultats.

$\text{Erreur} = \text{Estimation} - \text{Mesure} \text{ } [\mu\text{g}/\text{m}^3]$

Paramétrages	Distance d'impact 50 m		Distance d'impact 100 m		Distance d'impact 200 m	
	Portée 50m	Portée 100m	Portée 50m	Portée 100m	Portée 50m	Portée 100m
Points impactés						
F2	4,6	5,2	3,5	4,0	1,6	2,2
F13	5,5	5,5	4,4	4,4	2,6	2,6
F23	1,2	12,9	1,8	13,3	3,8	14,0
F29	6,7	18,4	6,5	18,6	9,4	19,2
F36	4,6	16,4	4,2	16,3	6,1	17,5
PI4	6,3	7,6	4,7	6,5	3,6	5,3
Moyenne de l'erreur	4,8	11,0	4,2	10,5	4,5	10,2

Sur Agen, les résultats indiquent que les erreurs d'estimations sont minimisées pour le paramétrage : Distance d'impact 200 m et portée 50 m, comme le montre le tableau des résultats.

Erreur = Estimation - Mesure [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]						
Paramétrages	Distance d'impact 50m		Distance d'impact 100m		Distance d'impact 200m	
	Portée 50m	Portée 100m	Portée 50m	Portée 100m	Portée 50m	Portée 100m
Points impactés						
F10	2,8	7,5	2,2	7,0	0,2	4,7
F14	1,0	1,4	1,8	2,3	2,6	2,1
F18	5,6	16,0	5,9	16,7	1,5	12,4
F20	6,2	18,1	5,7	18,0	4,0	17,6
F24	9,4	12,1	9,6	12,5	7,8	10,8
F3	1,7	1,2	2,5	2,3	1,4	0,9
F34	1,7	1,7	0,5	0,5	1,5	1,6
F38	1,3	3,1	0,6	2,4	1,0	0,9
F6	3,6	1,5	4,1	2,5	3,2	1,3
Pi3	4,6	4,6	4,6	4,6	3,6	3,6
Moyenne de l'erreur	3,8	6,7	3,8	6,9	2,7	5,6

Avec ces deux résultats, certaines conclusions peuvent être faites. Notons tout d'abord que l'**ordre de grandeur des erreurs commises est assez faible, de 3 à 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , sachant que les surconcentrations sont de l'ordre de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La première observation concerne le paramètre de la **portée de la spatialisation**. Quelque soit la distance d'impact choisie, les erreurs d'estimations obtenues avec une portée de 50 m sont toujours inférieures aux erreurs obtenues avec une portée de 100 m.

La première conclusion est donc que **la portée de la spatialisation est fixée à 50 m**. Ainsi, lors de l'ajustement du modèle de variogramme exponentiel, étape paramétrant la spatialisation des concentrations de NO_2 autour des axes, la portée du modèle doit être fixée à 50 m.

La deuxième observation concerne le deuxième paramètre. Pour Périgueux, la distance d'impact fournissant les meilleurs résultats est de 100 m. Pour Agen, c'est 200 m. Cependant, quelque soit la ville, ces deux distances d'impact fournissent des résultats à peu près comparables.

Pour départager ces deux distances, 100 m ou 200 m, la première idée est de comparer à nouveau la justesse des estimations, mais sur une nouvelle sélection de points. Ce sont alors les points situés à 100 m d'un axe qui sont communs aux deux sélections. Cette nouvelle comparaison est plus précise que la première, puisqu'elle s'effectue sur un plus grand nombre de points (14 à la place de 6 pour Périgueux, et 23 à la place de 10 pour Agen).

Les moyennes des erreurs en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur ces points fournissent de nouveaux résultats :

Comparaison des distances d'impacts à 100 et 200 m sur Périgueux :

Paramétrages	Erreur = Estimation - Mesure [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			
	Distance d'impact 100m		Distance d'impact 200m	
	Portée 50m	Portée 100m	Portée 50m	Portée 100m
Moyenne de l'erreur	4,6	9,7	5,2	9,4

Comparaison des distances d'impact à 100 m et 200 m sur Agen :

Paramétrages	Erreur = Estimation - Mesure [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			
	Distance d'impact 100m		Distance d'impact 200m	
	Portée 50m	Portée 100m	Portée 50m	Portée 100m
Moyenne des erreurs	3,5	5,3	3,5	4,5

Sur Périgueux, le résultat est identique à celui de la première sélection de points : une distance d'impact fixée à 100 m fournit de meilleurs résultats. Sur Agen, l'ajout de nouveaux points pour comparer les deux paramètres permet de montrer que les deux distances d'impact fournissent des résultats en moyenne tout à fait comparables (même moyenne d'erreur).

Ces nouveaux résultats tendent à montrer que la distance d'impact fixée à 100 m est le paramétrage qui en moyenne fournit les meilleurs résultats sur les deux villes. De plus, une autre considération est à prendre en compte : choisir une distance d'impact de 200 m risque de poser problème pour la réalisation des cartographies de fond, première étape de la méthode. En effet, pour nos exemples, choisir une distance d'impact de 200 m revient à retirer 22 points sur 50 pour la cartographie de fond de Périgueux, et 34 points sur 58 pour Agen.

Ce qui pose la question de la validité d'une cartographie réalisée à partir de seulement une vingtaine de points (au lieu d'une cinquantaine)?

La seconde conclusion concerne donc la **distance d'impact**, paramètre permettant de déterminer les points à retirer de la cartographie de fond. Ce paramètre est **fixé à 100 m**.

Le choix de paramétrer la **distance d'impact à 100 m** permet donc d'obtenir **en moyenne les meilleurs résultats**. Cependant, choisir une distance d'impact de 200 m conduit également à de bons résultats, et il est possible que sur un cas particulier, ce soit ce paramétrage qui soit le meilleur. Afin de laisser à l'utilisateur de la méthode le choix du meilleur paramétrage appliqué à son étude, le mode opératoire reprend la possibilité de paramétrer la distance d'impact à 200 m.

IV.2.1.b. Meilleurs paramètres pour le polluant benzène

Pour le polluant benzène, 6 paramétrages différents sont à comparer. Les distances d'impacts sont de 50 m et 100 m, impliquant 2 sélections de points. Ce sont **les points situés à 50 m d'un axe** qui sont **communs aux 2 sélections**.

Sur Périgueux, les résultats indiquent que les erreurs d'estimations sont minimisées pour le paramétrage : Distance d'impact 100 m et portée 25 m, comme le montre le tableau des résultats.

Erreur = Estimation - Mesure [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Paramétrages	Distance d'impact 50 m			Distance d'impact 100 m		
	Portée 25m	Portée 35m	Portée 50m	Portée 25m	Portée 35m	Portée 50m
F2	0,10	0,09	0,08	0,09	0,08	0,06
F23	0,21	0,15	0,01	0,05	0,09	0,25
F29	0,05	0,00	0,13	0,09	0,13	0,24
F36	0,12	0,08	0,02	0,09	0,05	0,04
PI4	0,17	0,23	0,29	0,14	0,19	0,24
Moyenne de l'erreur	0,13	0,11	0,11	0,09	0,11	0,17

Sur Agen, les résultats indiquent que les erreurs d'estimations sont minimisées pour le paramétrage : Distance d'impact 50 m et portée 25 m, comme le montre le tableau des résultats.

Paramétrages	Erreur = Estimation - Mesure [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]					
	Distance d'impact 50m			Distance d'impact 100m		
	Portée 25m	Portée 35m	Portée 50m	Portée 25m	Portée 35m	Portée 50m
F10	0,42	0,42	0,43	0,44	0,44	0,46
F14	0,13	0,14	0,15	0,19	0,21	0,22
F18	0,09	0,12	0,20	0,13	0,16	0,23
F20	0,12	0,18	0,29	0,16	0,21	0,32
F24	0,23	0,27	0,30	0,24	0,28	0,31
F3	0,21	0,21	0,21	0,23	0,23	0,23
F34	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15
F38	0,02	0,01	0,03	0,03	0,00	0,02
F6	0,13	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15
PI3	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
Moyenne des erreurs	0,15	0,17	0,19	0,17	0,19	0,21

Ces deux résultats laissent à penser que le choix d'un paramétrage optimal est compliqué pour le polluant benzène. Aucun paramétrage ne donne clairement de meilleurs résultats, que ce soit pour la distance d'impact ou la portée. Notons cependant que l'ordre de grandeur de l'erreur ($\sim 0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est le même, quelques soient les paramètres choisis. L'idée est donc de choisir **le meilleur paramétrage en moyenne**.

Si l'on compare, à portée égale, les distances d'impact, les résultats pour 50 m sont en moyenne meilleurs que les résultats pour 100 m (cette différence s'observe clairement sur Agen). Puis, en choisissant une distance d'impact de 50 m, les résultats pour une portée de 35 m sont en moyenne meilleurs que pour 25 et 50 m.

Ainsi, **en moyenne**, le meilleur résultat s'obtient pour **une distance d'impact de 50 m** et une **portée de 35 m**.

Ici encore, ce paramétrage peut être discuté pour un cas particulier. La liberté est laissée au lecteur du mode opératoire de tester ces différents paramètres s'il veut optimiser au mieux le choix des paramètres pour son étude.

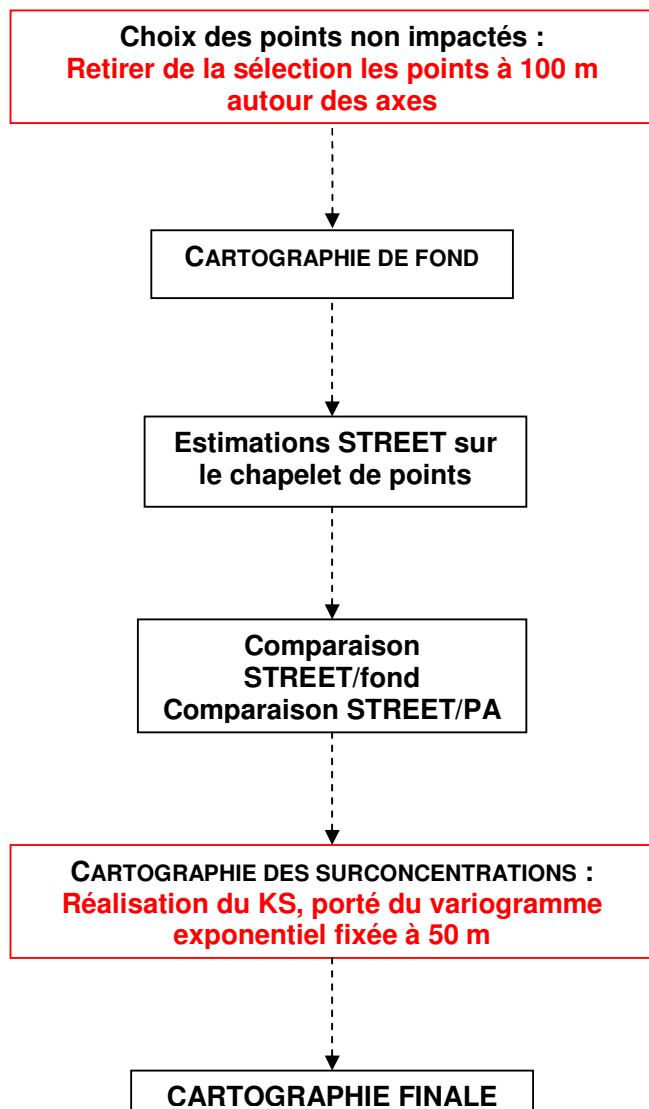
Cependant, le choix de ces paramètres influence relativement peu la cartographie finale : celle-ci aura la même allure générale.

Pour illustrer ceci prenons l'exemple de la cartographie de Périgueux, qui est une grille dont les mailles sont de 10 m x 10 m. Ainsi, le changement entre un krigeage simple de portée de 25 m et un krigeage simple de portée 35 m n'est visible que sur un nœud dans l'axe de décroissance de la pollution autour des routes. Se référer à l'annexe 3 : les deux cartographies sont tout à fait semblables, exception faite de quelques pixels.

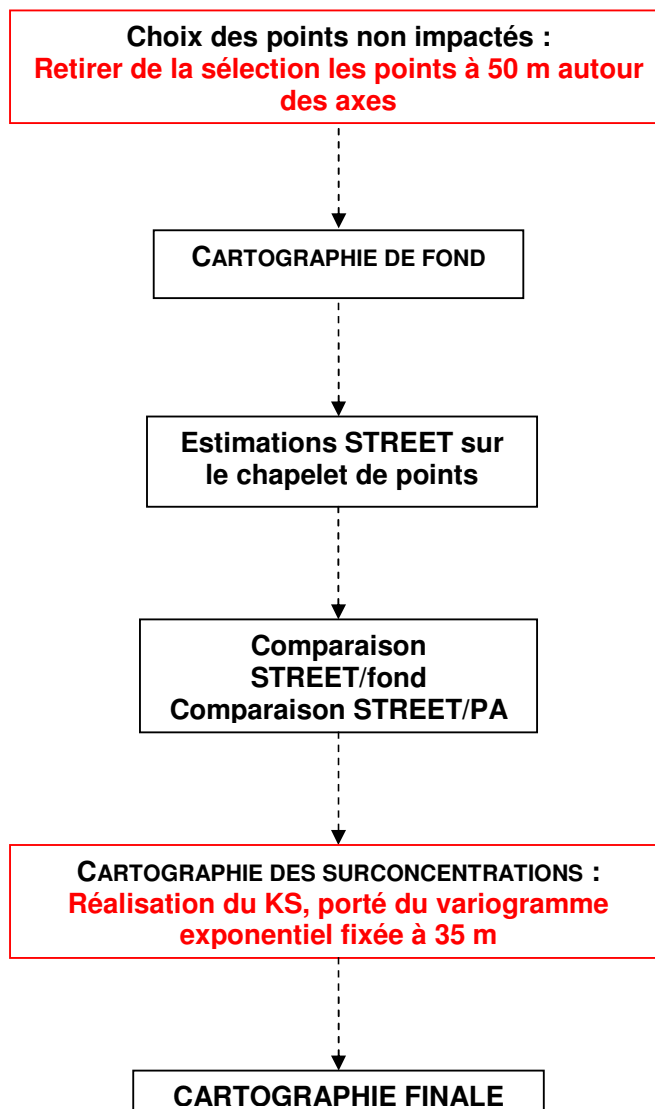
La nouvelle méthode de cartographie est donc validée grâce à ces deux exemples. Les résultats en termes d'ordre de grandeur des erreurs d'estimation sont bons.

L'existence d'un paramétrage optimal est très nette pour le polluant NO₂ (notamment en termes de portée, fixée à 50 m). Pour le benzène, les différences sont moins marquées et aucun paramètre n'a de grande influence sur les erreurs d'estimations. Le paramétrage conseillé pour le benzène est le meilleur paramétrage en moyenne.

Cartographie du NO₂



Cartographie du Benzène



IV.2.2. Les cartographies de pollution de l'air

Cette partie a pour but de présenter les résultats de la méthode : les cartographies de la pollution de l'air, obtenues avec les paramétrages déterminés dans le chapitre précédent.

IV.2.2.a. Pour le polluant NO₂

Sur Périgueux, cartographie obtenue avec une distance d'impact de 100 m et une portée pour la spatialisation des niveaux de polluants de 50 m :

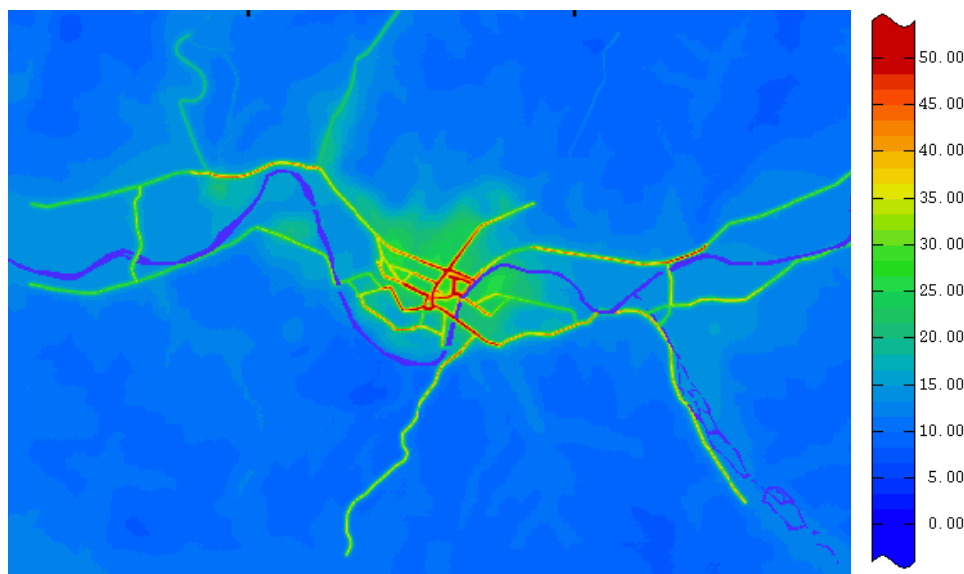


Figure n°28 : Cartographie du NO₂ sur Périgueux

Sur Agen, cartographie obtenue avec une distance d'impact de 100 m et une portée pour la spatialisation des niveaux de polluants de 50 m :

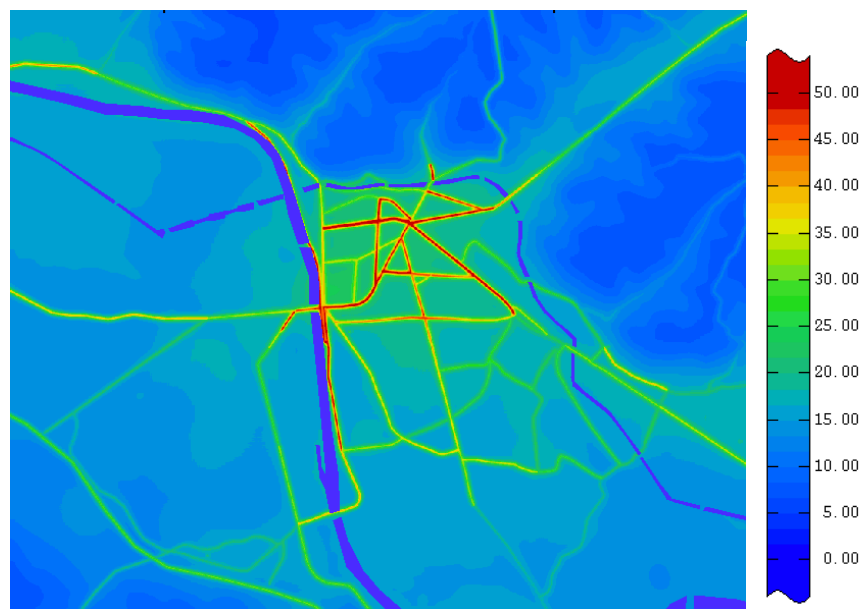


Figure n°29 : Cartographie du NO₂ sur Agen

Les objectifs de la mise en place de cette méthode semblent atteints : en comparaison aux cartographies de fond, ces cartographies **illustrent de manière plus complète les phénomènes de pollution à la fois de fond et de proximité routière**. Cette nouvelle méthode permet d'améliorer la compréhension des phénomènes et la communication liée à la pollution atmosphérique en agglomération.

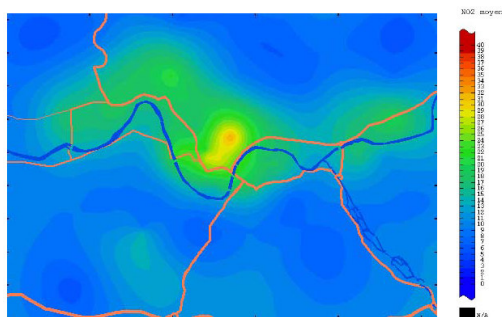


Figure n°30 : Cartographie de fond du NO₂ sur Périgueux

IV.2.2.b. Pour le polluant benzène

Sur Périgueux, cartographie obtenue avec une distance d'impact de 50 m et une portée pour la spatialisation des niveaux de polluants de 35 m :

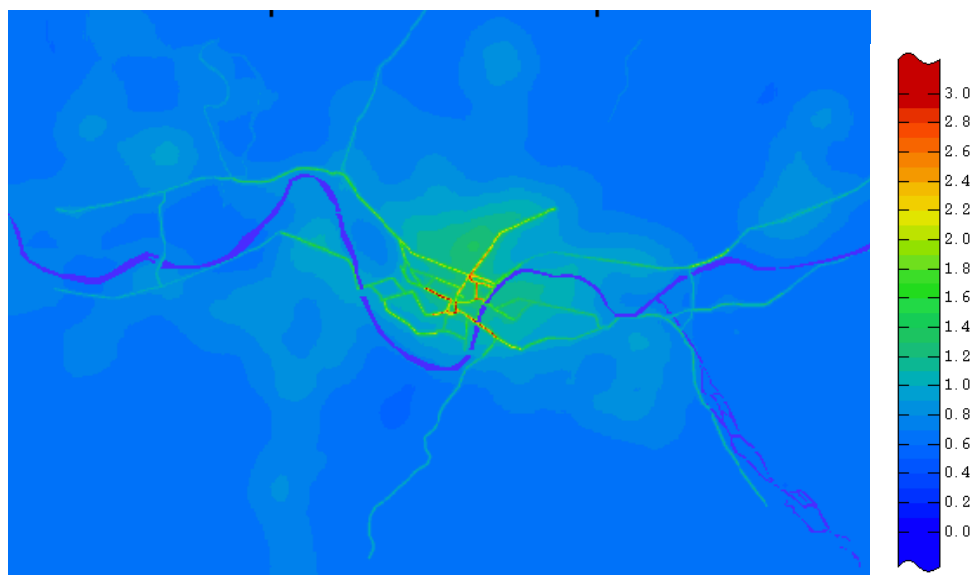


Figure n° 31 : Cartographie du benzène sur Périgueux

Sur Périgueux, cartographie obtenue avec une distance d'impact de 50 m et une portée pour la spatialisation des niveaux de polluants de 35 m :

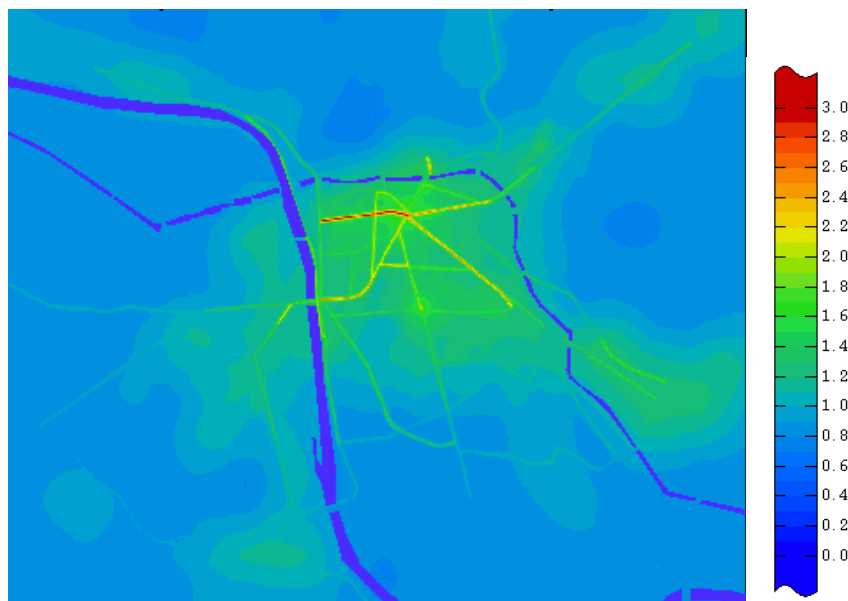


Figure n° 32 : Cartographie du benzène sur Agen

IV.2.3. Mode opératoire

Le stage s'est conclu par la **rédaction d'un mode opératoire**, dont les destinataires sont les membres du bureau d'études amenés à réaliser des cartographies. La finalité de ce document est de fournir des **indications assez précises pour la réalisation de cartes** des concentrations en NO_2 à l'échelle de l'agglomération, en intégrant à la fois phénomènes de fond et de proximité automobile.

IV.2.3.a. Description du rendu

Trois documents constituent le mode opératoire :

- La fiche descriptive;
- Le protocole d'utilisation;
- Le fonctionnement détaillé.

La fiche descriptive ne fait que décrire brièvement le "produit". Elle présente le type de résultat produit et renseigne les données d'entrée et les logiciels ou programmes utilisés. Ce premier document permet de rapidement appréhender le but du nouveau protocole, et les moyens à mettre en œuvre pour l'exécuter.

Le deuxième document détaille précisément le protocole. Les concepts importants de la méthode y sont expliqués. Le détail des différentes tâches permet une application simple de la méthode : but de la tâche, les principes à connaître et la démarche à suivre (logiciel à utiliser, commandes à exécuter, etc.).

Le fonctionnement détaillé a pour but de décrire de manière plus complète l'outil. En cas de problèmes de fonctionnement de la méthode, il permet idéalement de retrouver une utilisation normale. Ce document décrit la structure informatique de l'outil, en l'occurrence, les répertoires de stockage des études et les flux de données entre les trois logiciels. Les problèmes identifiés y sont également recensés.

IV.2.3.b. Le protocole d'utilisation

Le protocole d'utilisation est le principal document du rendu de ce stage. Il atteint un degré de précision tel qu'il doit permettre à un utilisateur maîtrisant les outils STREET, ISATIS et MAPINFO de réaliser une cartographie intégrant pollution de fond et phénomène de proximité automobile.

Le protocole d'utilisation décrit la méthode en 8 tâches, chacune de ces tâches se déclinant en plusieurs étapes.

Certaines étapes faisant appel à des commandes et notions connues ne sont pas détaillées. Il est alors demandé de se reporter aux **protocoles d'utilisation de l'outil "Cartographie géostatistique", de l'outil STREET ou de l'outil MAPINFO**.

Lorsque de nouvelles fonctionnalités des outils sont utilisées, des **démarches pour l'application de ces nouvelles commandes** ont été créées.

Les 8 tâches, déclinées en étapes et nouvelles démarches sont :

- **Choix des points non impactés**
 - Calcul de la distance entre chaque point et l'axe le plus proche sous MAPINFO
 - Création de la sélection sous ISATIS.
Démarche "Comment créer une sélection géographique?"
- **Interpolation, ajout de variables auxiliaires**
 - Création d'une nouvelle étude sous ISATIS.
Se reporter au protocole d'utilisation de l'outil "cartographie géostatistique"
- **Calcul des concentrations de fond moyennes par axe**
 - Discrétisation des données poly-lignes en un chapelet de points sous MAPINFO.
Démarche "Comment discrétiser des données?"
 - Import sous ISATIS du fichier de points.
Démarche "Comment importer un fichier de points ?"
 - Elimination des doublons (points distants de moins de 5 m) sous ISATIS.
Démarche "Comment éliminer les doublons d'un fichier de points?"
 - Interpolation de la pollution de fond sur chaque point du chapelet sous ISATIS.
Démarche "Comment interpoler une variable en un point?"
 - Après interpolation, export des données depuis ISATIS vers Excel
 - Calcul des moyennes par axe par lancement de la Macro sous Excel.
- **Estimation de la pollution de proximité automobile**
 - Création d'une nouvelle étude sous STREET.
Se reporter au protocole d'utilisation de l'outil STREET
- **Discrétisation des données STREET**
 - Association sous MAPINFO des données de concentration STREET à chaque axe modélisé.
 - Discrétisation sous MAPINFO.
- **Traitement des données de concentrations sur le chapelet de points**
 - Comparaison des concentrations STREET avec les concentrations de fond en chaque point, choix du maximum, sous ISATIS.
Démarche "Comment faire des opérations sur les variables?"
 - Affectation à certains points du chapelet des valeurs PA, sous ISATIS.
Démarche "Comment faire migrer un ensemble de points?"
 - Réévaluation des concentrations STREET sur l'ensemble des points par rapport aux données de mesures en proximité automobile. Krigeage avec Dérive Externe sur les mesures en PA avec comme variable auxiliaire les concentrations STREET et sans ajout de constante, sous ISATIS.
 - Ajout au chapelet de points des points définis comme impactés lors de la première étape et retirés de la cartographie de fond, sous ISATIS.
Démarche "Comment fusionner deux fichiers Points?"

- **Procédure d'interpolation: spatialisation des surconcentrations**
 - Calcul des surconcentrations sous ISATIS.
 - Division de l'ensemble des points en deux populations représentant les valeurs faibles de surconcentrations et les valeurs élevées, sous ISATIS.
 - Krigeage simple
 - Modèle de variogramme exponentiel de portée 50 m
 - Krigeage simple à moyenne constante connue mise à 0
- **Somme de la cartographie de fond et de la cartographie des surconcentrations**
 - Remplissage des grilles de résultat au-delà de la portée des axes: mise à 0 des nœuds de la grille non impactés par les axes
Démarche "Comment remplacer sur une grille les points indéfinis par des 0?"
 - Choix du maximum entre les faibles et fortes concentrations aux intersections des axes
 - Somme de la concentration de fond et des surconcentrations

9 démarches sont ainsi recensées en annexe, sous forme d'index des démarches :

<i>Sous ISATIS: Comment créer une sélection géographique?</i>	6
<i>Sous ISATIS: Comment éliminer les doublons d'un fichier de points</i>	7
<i>Sous ISATIS: Comment faire des opérations sur les variables?</i>	12
<i>Sous ISATIS: Comment faire migrer un ensemble de points?</i>	12
<i>Sous ISATIS: Comment fusionner deux fichiers points?</i>	14
<i>Sous ISATIS: Comment importer un fichier de points?</i>	7
<i>Sous ISATIS: Comment interpoler une variable en un point?</i>	8
<i>Sous ISATIS: Comment remplacer sur une grille les points indéfinis par des 0?</i>	16
<i>Sous MAPINFO: Comment discrétiser des données?</i>	7

Cet index des démarches a été créé afin de faciliter la lecture et l'utilisation future du document.

Des protocoles d'utilisation existent séparément pour les trois outils. Le protocole rédigé lors de ce stage correspond lui à une méthode globale de cartographie. Cependant, la mise en place de cette méthode a amené à une meilleure connaissance des trois outils et à l'utilisation de nouvelles commandes. L'existence de cet index des nouvelles démarches permet d'avoir accès rapidement aux nouvelles fonctionnalités rencontrées sous les trois logiciels.

D'autre part, si une extension d'un des logiciels est achetée, ou encore si une nouvelle version apparaît, certaines de ces démarches ne seront plus adaptées et pourront être facilement remplacées par de nouvelles fonctionnalités.

Exemple de démarche à suivre :

Sous MAPINFO: Comment discrétiser des données?

Nous disposons sous MAPINFO d'un fichier de données de type poly-lignes représentant l'ensemble des axes qui seront modélisés sous STREET. A chaque axe, on associe un identifiant, qui permettra par la suite de faire le lien entre STREET et MAPINFO.

Il faut disposer du logiciel MAPINFO muni de l'extension "Vertical Mapper".

Fenêtre principale:

Vertical Mapper>Create Grid>Poly-to-point

- Sélectionner la table à discrétiser
- Vérifier que l'extraction s'effectue à partir de données de type poly-lignes et lignes
- Mettre la distance entre les points à 10 m au maximum les uns des autres

Une table de points nom_de_la_table_ptp.tab est alors créée. Pour rendre ce fichier lisible sous ISATIS, une dernière étape est nécessaire sous MAPINFO.

Outils>Traducteur universel>Traducteur universel...

- Pour le fichier source sélectionner le format "*Mapinfo TAB*", et le fichier à traduire

- Pour le fichier destination sélectionner le format "**ESRI Shape**", et le répertoire qui recevra le fichier

Un ensemble de fichier est généré, et c'est le fichier `nom_de_la_table_ptp.shp` qui sera lu sous ISATIS comme un fichier de points.

Toutes les étapes et démarches décrites dans le protocole d'utilisation sont ainsi rédigées, expliquant point par point les commandes à utiliser sous les différents environnements.

Le protocole d'utilisation présente également les lignes de code de la Macro Excel permettant de faire le calcul des moyennes à partir de l'ensemble des données.

IV.2.3.c. Démarche pour paramétrer au mieux

Le but initial du stage était la cartographie du dioxyde d'azote. Une fois la méthodologie mise en place, les outils maîtrisés, et les paramètres optimaux fixés, le temps restant a permis de s'intéresser au polluant benzène. La démarche pour cartographier en intégrant pollution de fond et pollution de proximité automobile restant la même, le travail supplémentaire n'a concerné que le choix du paramétrage optimal adapté au polluant benzène.

Ainsi, le protocole d'utilisation est entièrement rédigé pour permettre la cartographie du dioxyde d'azote. Pour réaliser la cartographie du benzène, l'idée est de reprendre le protocole d'utilisation en changeant les deux paramètres : distance d'impact et portée de la spatialisation. Les changements intervenant dans la démarche sont expliqués en annexe du protocole d'utilisation. Le paramétrage choisi est celui qui donne les meilleurs résultats en moyenne.

Pour les deux polluants, l'étape de validation de la méthode (choix des paramètres optimaux) a montré que sur un cas particulier, il est possible la meilleure solution ne soit pas obtenue à partir des paramètres fournissant en moyenne les meilleurs résultats. Une démarche de test des paramètres (la démarche même qui a servi sur Périgueux et Agen) est donc présentée dans le mode opératoire. La possibilité est donc laissée à l'utilisateur de tester lui-même les paramètres.

V. Conclusion

Les objectifs fixés au début du stage ont été atteints :

- Mise en place d'une nouvelle méthode de cartographie : adaptation de la méthode, maîtrise des outils, choix des paramètres;
- Rédaction du mode opératoire de la cartographie intégrant pollution de fond et proximité automobile pour le NO₂ et le benzène.

Ce mode opératoire répond à des besoins d'AIRAQ : la réalisation de cartographies illustrant de manière plus complète le phénomène de pollution dans les agglomérations. Les cartographies obtenues permettent également une meilleure communication.

D'un point de vue personnel, ce stage a été enrichissant sur plusieurs niveaux :

- Il m'a permis de découvrir le travail dans le milieu associatif et dans une petite structure.
- J'ai eu l'occasion de découvrir et d'étudier **le domaine de la géostatistique**. Ces nouvelles connaissances ont été appliquées lors de la mise en place de la méthodologie ou lors de l'utilisation du logiciel ISATIS. Les applications de la géostatistique, notamment dans la cartographie, se révèlent être très intéressantes. La réalisation de cartes tient à la fois de la rigueur de la théorie géostatistique, et de

l'expérience ou de l'instinct du géostatisticien qui conditionne la justesse des cartes lorsqu'il approche le variogramme expérimental par un modèle.

Les cartes sont un outil de communication qui peut se révéler quelques fois dangereux, car mal interprété. Il est important de considérer que les cartes ne sont qu'une indication de la réalité, une très bonne illustration. En aucun cas la technique de krigeage ne peut servir à prévoir des dépassements de seuils.

- J'ai également pu lors de ce stage manipuler différents outils. J'ai notamment beaucoup travaillé sous MAPINFO. Ce **travail sous SIG**, ainsi que la découverte et l'appropriation de l'outil de géostatistique ISATIS ont été très enrichissants.

- Enfin, j'ai apprécié dans mon stage la partie concernant de **développement d'une méthode**. Le développement s'est déroulé en plusieurs étapes. Dans un premier temps, il a fallu comprendre, s'approprier méthode et outils. Puis, l'étape d'adaptation, de recherche de nouvelles fonctionnalités s'est révélée très importante et motivante. Enfin, l'étape d'application de la méthode et de recherche des meilleurs paramètres m'ont permis de finaliser avec rigueur la validation de la méthode.

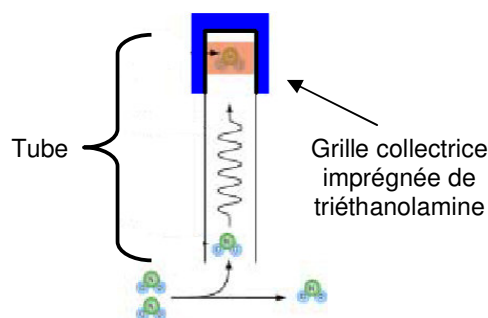
VI. Annexe I : Mesures du NO₂ et du Benzène

Mesure du NO₂ :

Les mesures de dioxyde d'azote sont assurées par des tubes de Palmes fournis puis analysés par l'AASQA de Poitou-Charentes, ATMO PC.

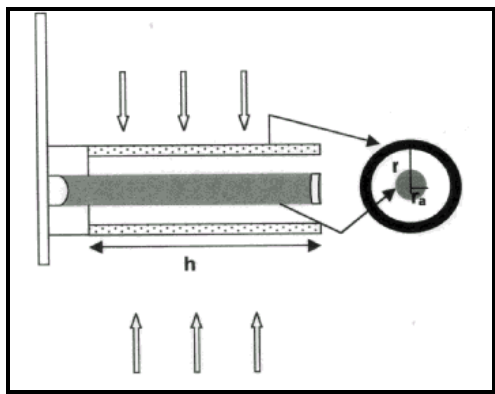
Pour ce type de capteur, la diffusion s'exerce le long d'un tube contenant deux grilles en acier inoxydable positionnées à l'extrémité supérieure et enduites d'un produit absorbant : la triéthanolamine.

En fin d'échantillonnage, le dosage chimique du dioxyde d'azote échantillonné sous forme de nitrites est réalisé par spectrophotométrie à 542 nm.



Mesure du benzène :

Les capteurs passifs destinés à la mesure du benzène sont des capteurs « Radiello », fournis par la fondation Salvatore MAUGERI, qui assure également l'analyse de ces tubes après exposition.



Les tubes « Radiello » sont des tubes à diffusion radiale, ce qui permet d'obtenir une surface de diffusion plus grande. Selon Radiello, cette technologie assure une meilleure sensibilité des mesures grâce à une augmentation de la masse captée.

Les tubes Radiello sont ainsi constitués par 2 tubes cylindriques concentriques :

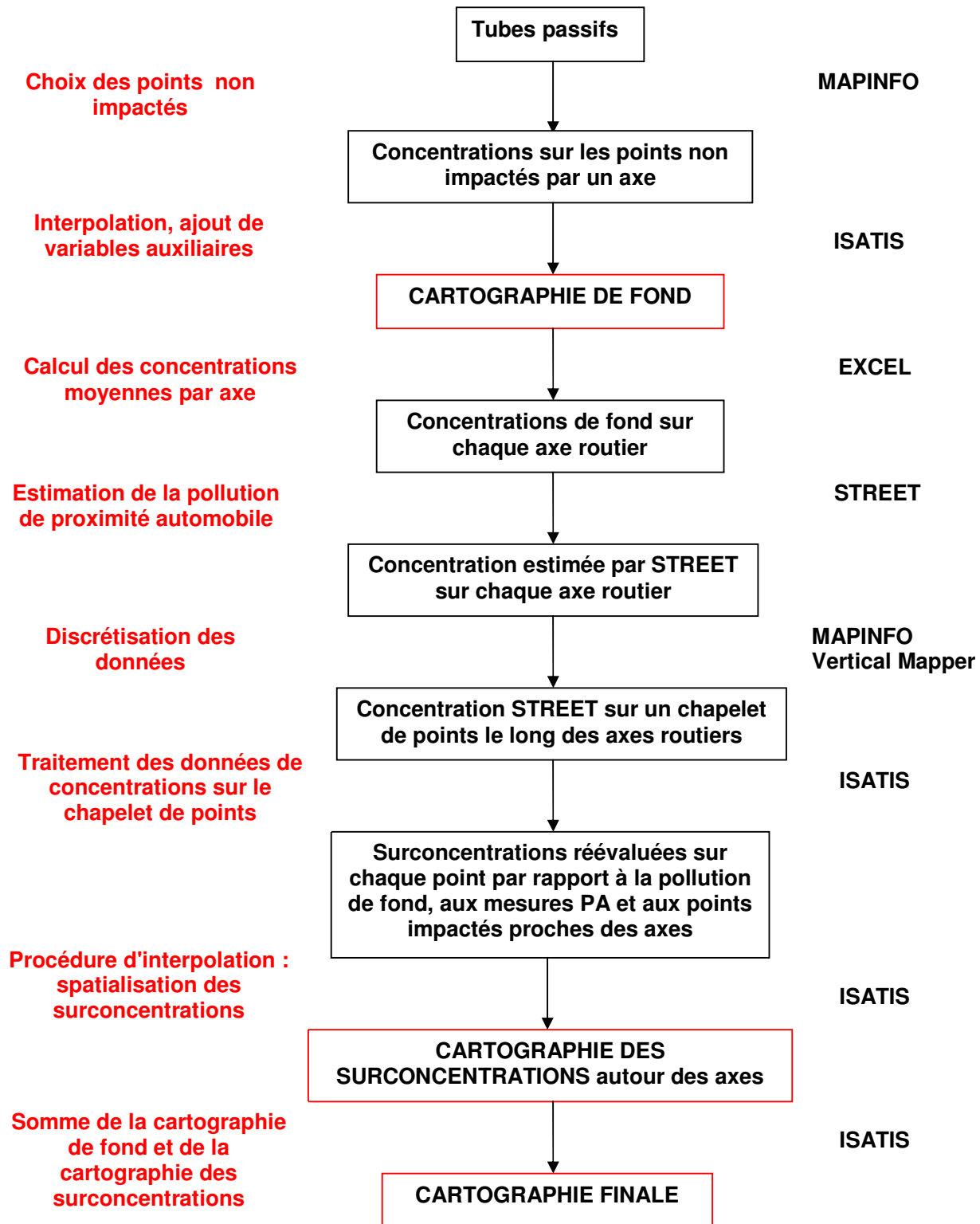
- Un tube externe en polyéthylène micro poreux, appelé corps diffusif, au travers duquel diffusent les composés gazeux. Ce tube externe fait office de filtre en arrêtant les poussières et autres impuretés.

-
- PINCE
- SUPPORT
- TUBE INTERNE
- CORPS DIFFUSIF

[illegible]

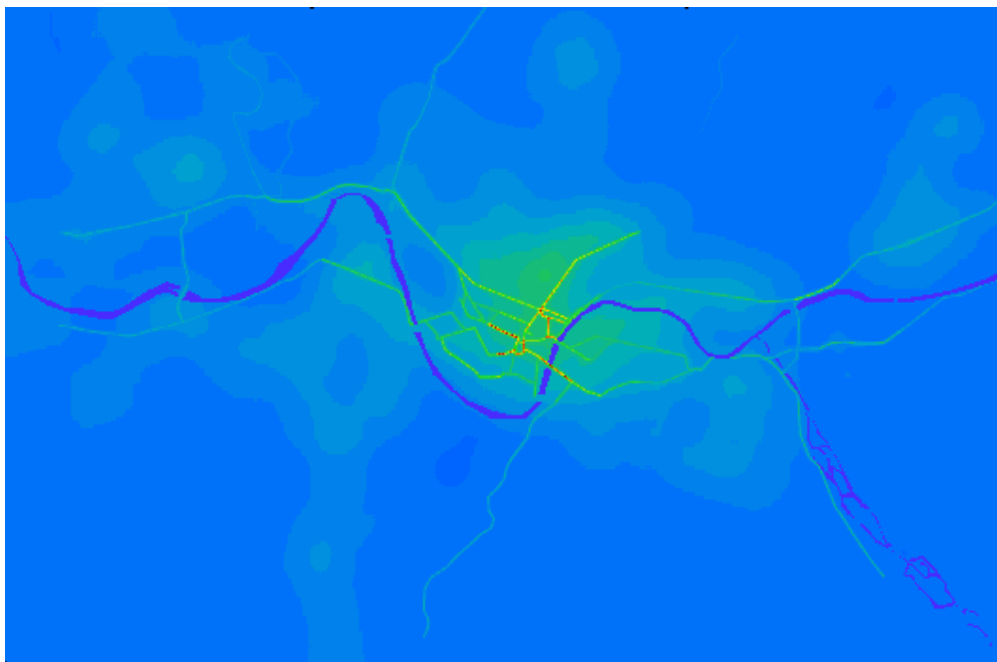
Page 63 sur 65

VII. Annexe II : Schéma général de la méthode de cartographie



VIII. Annexe III : Comparaison sur la cartographie du benzène de l'influence de la portée

Première cartographie : paramètre de la portée fixé à 35 m.



Deuxième cartographie : paramètre de la portée fixé à 25 m.

