



Qualité de l'air

Études

Juin 2010

Juin 2010



PLATE-FORME DE MODELISATION NO₂ CARTOGRAPHIES URBAINES

METHODOLOGIE

En collaboration avec
NUMTECH



Association pour la Surveillance de la Qualité de l'Air de la Région de l'Etang de Berre et de l'Ouest des Bouches-du-Rhône

Route de la Vierge - 13 500 Martigues - Tel. 04 42 13 01 20 - Fax. 04 42 13 01 29

Site internet: www.airfobep.org - e-mail : airfobep@airfobep.org

Serveur vocal 04 42 49 35 35 (selon tarification téléphonique en vigueur)



Plate-forme de modélisation NO₂ : Cartographie des zones urbaines

Résumé

Afin de compléter ses outils de surveillance de la pollution en dioxyde d'azote (NO₂), AIRFOBEP a développé une plate-forme de modélisation de ce polluant. Cette plate-forme produit quotidiennement, depuis 2009, des cartes de pollution en NO₂ pour l'ensemble de l'aire de surveillance d'AIRFOBEP. Une évolution, réalisée en 2010, permettra de compléter ces cartes « départementales » par des « zoom » sur les zones urbaines. L'objectif est de produire des cartographies des concentrations maximales journalières de la pollution NO₂ :

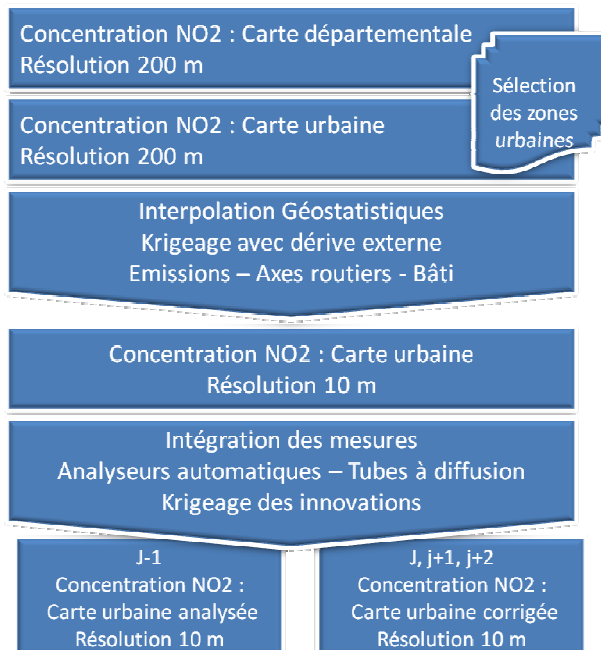
- ✓ pour les jours J, J+1 et J+2 (cartes prévues) et pour le jour J-1 (carte analysée),
- ✓ pour six villes : Arles, Istres, Marignane, Martigues, Salon de Provence et Vitrolles).

Méthodologie

Les données d'entrée pour l'élaboration des cartes NO₂ urbaines sont les résultats des simulations de la plate forme à l'échelle départementale, calculées avec une résolution de 200 m.

L'interpolation à l'échelle urbaine se fera grâce à la prise en compte d'une variable auxiliaire appropriée. La carte analysée pour la veille (j-1) est produite en assimilant les données des stations de mesure d'AIRFOBEP.

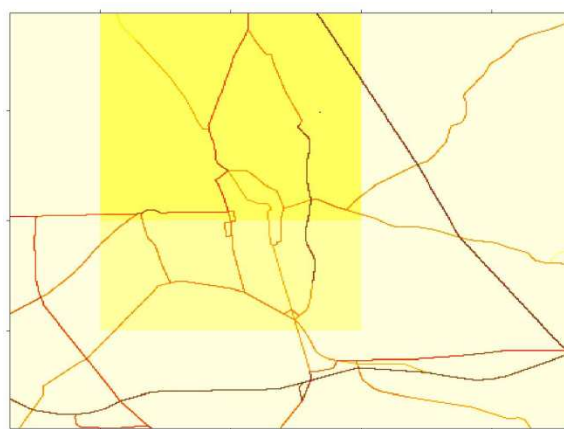
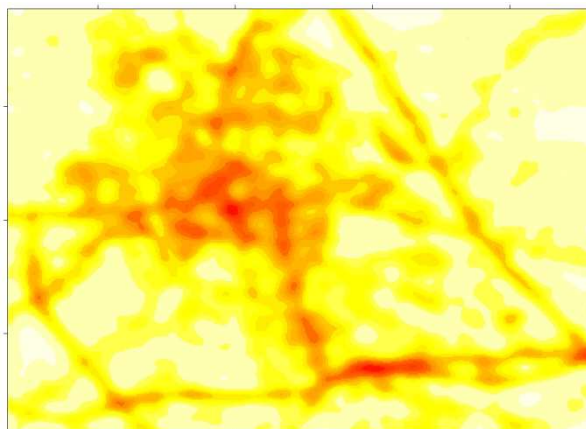
Concentration NO₂ à l'échelle urbaine :
Chronologie des étapes de production des cartes



Variables auxiliaires

La variable auxiliaire est intégrée comme dérive externe lors de l'interpollation par krigeage.

Plusieurs variables auxiliaires ont été testées. Les performances de la méthode de krigeage s'est avérée très peu sensible au choix de la variable auxiliaire. Le choix s'est porté sur une variable combinant « Bâti+Axes routiers » et « émissions NO_x ».



Données pour la production de la variable auxiliaire utilisée pour produire les cartes de pollution NO₂ urbaines
a- « Bâti+Axes routiers » et b- « émissions NO_x »
Exemple da la vielle de Salon de Provence

L'assimilation des données

Pour la production de cartes analysées de la veille (J-1), est utilisée une interpolation géostatistique qui intègre, en plus de la dérive externe (variable auxiliaire), les données d'observations issues des mesures d'AIRFOBEP.

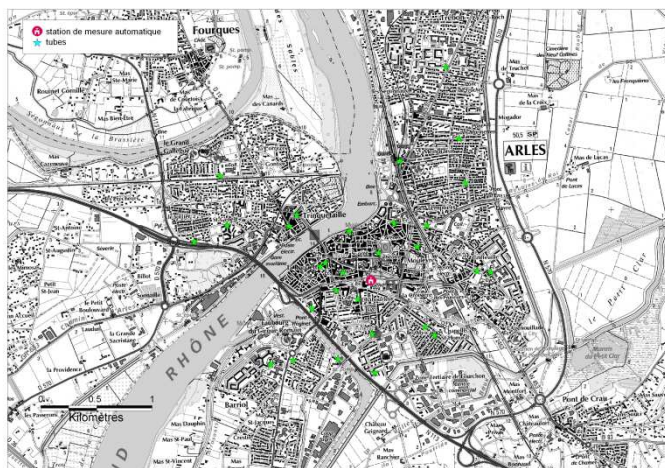
Cette technique géostatistique dite «krigeage des innovations avec dérive externe » permet d'obtenir une cartographie de la pollution en NO₂ la plus proche possible de la réalité.

Les données d'observation prises en compte sont celles issues :

- des analyseurs automatiques dans les stations de mesure d'AIRFOBEP,
- des mesures de stations virtuelles.

Pour palier au faible nombre d'analyseurs automatiques présents dans chacune des zones urbaines, les données de mesure par tube passif sont exploitées pour la réalisation de la carte analysée.

La méthode consiste à établir des corrélations entre la mesure d'un analyseur automatique et celles des tubes passifs. Ces derniers sont alors considérés comme des stations virtuelles. On suppose alors que l'on peut affecter à tout instant une valeur de NO₂ au tube, calculée à partir de la corrélation prédéfinie.

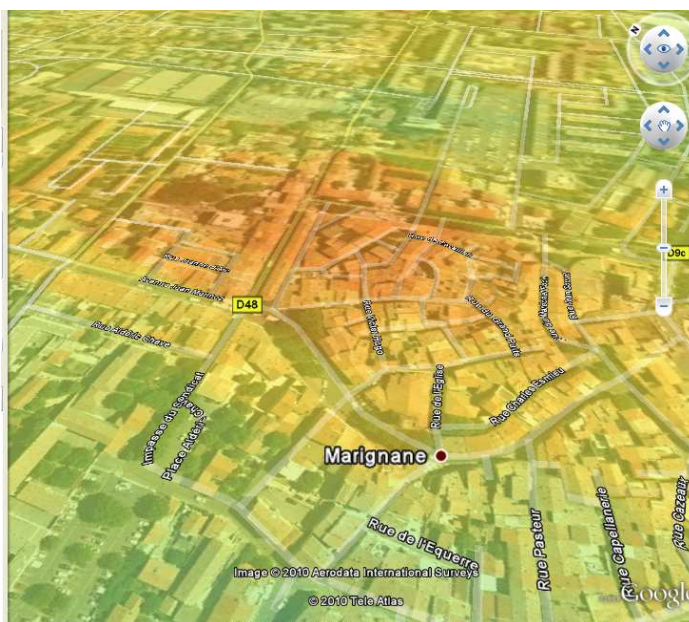


Points de mesures utilisés pour l'assimilation des données.
Exemple de la ville d'Arles

Les cartes urbaines de pollution NO₂

L'évolution 2010 de la plate-forme de modélisation NO₂, permet à AIRFOBEP de fournir quotidiennement, des cartographies de cette pollution dans six villes de la région de l'étang de Berre. Ces cartographies sont accessibles au public via le site VIGIPOL et représentent, pour chacune des villes, les concentrations maximales journalières pour :

- la veille : cartographie ajustée avec les données de mesures,
- le jour même, le lendemain et le surlendemain : cartographies en prévision.



Carte de la concentration en NO₂ (µg/m³).
Exemple dans la ville de Marignane

■ Table des matières

1. Objet de l'étude	6
2. Méthodologie de la cartographie urbaine	8
2.1. Simulations modèle	8
2.2. Variable auxiliaire	9
2.3. Relation entre la concentration en NO ₂ et la variable auxiliaire.....	16
2.4. Technique de krigeage.....	17
2.5. Résolution des cartographies.....	18
2.6. Cartes analysées.....	20
2.7. Schéma des étapes de production des cartes	26
3. Conclusion	28
Table des figures	29
Table des tableaux	30

Objet de l'étude



1. Objet de l'étude

Dans le cadre de ses missions de surveillance de la qualité de l'air, AIRFOBEP souhaite développer un outil de surveillance de la pollution en dioxyde d'azote (NO₂) sur son territoire d'intervention. Cet outil s'inscrit dans la gamme des applications AIRFOBEP mises en œuvre actuellement, ou en cours de développement, vis-à-vis de la surveillance et de la prévision de la qualité de l'air (applications concernant l'ozone, les PM et le SO₂).

Une première phase de mise en œuvre a déjà permis une cartographie du NO₂ au niveau départemental courant 2009. Le présent document décrit la méthodologie de la seconde phase de mise en œuvre, visant cette fois-ci une cartographie au niveau de 6 grandes villes de la zone AIRFOBEP (Arles, Istres, Marignane, Martigues, Salon de Provence et Vitrolles).

La plate-forme NO₂ urbain consiste à réaliser pour chacune des 6 zones urbaines l'interpolation des données modélisées par la plate-forme NO₂ départemental en intégrant une variable auxiliaire, puis à générer des fichiers qui pourront être utilisés pour visualiser des cartographies de concentration en NO₂. L'objectif de la plate forme NO₂ urbain est de générer chaque matin des cartographies des concentrations maximales journalières pour les jours J, J+1 et J+2 (cartes prévues) ainsi qu'une carte pour le jour J-1 intégrant les mesures aux stations (carte analysée) pour les 6 principales agglomérations du territoire AIRFOBEP.



Méthodologie de la cartographie urbaine

2.1. Simulations modèle

2.2. Variable auxiliaire

**2.3. Relation entre la concentration en NO₂ et la variable
auxiliaire**

2.4. Technique de krigeage

2.5. Résolution des cartographies

2.6. Cartes analysées

2.7. Schéma des étapes de production des cartes

2. Méthodologie de la cartographie urbaine

2.1. Simulations modèle

La cartographie à l'échelle urbaine de la concentration en NO₂ nécessite de disposer de simulations modèle de départ. Comme pour la cartographie à l'échelle départementale, il a été envisagé de prendre comme données d'entrée les simulations PREV'AIR NO₂ à l'échelle nationale (résolution 10km). Cependant, les zones urbaines que l'on souhaite cartographier correspondant à des domaines ne dépassant pas les 10km de côté, il ne sera pas possible de disposer de suffisamment de points de grille des simulations PREV'AIR sur ces zones urbaines (en moyenne 0 à 4 points de grille PREV'AIR coïncidant avec les zones urbaines). Par ailleurs, la technique de krigeage avec variable auxiliaire implique de disposer de la variable auxiliaire aux points modèle, afin de pouvoir calculer des corrélations entre variable auxiliaire et variable d'intérêt. Or il n'est pas possible de disposer des variables auxiliaires envisagées (émissions NO_x et variables fournies par AIRFOBEP) à l'ensemble des points PREV'AIR.

En conséquence, l'alternative qui a été choisie est de considérer comme données modèle d'entrée les simulations Vigipol NO₂ départemental (résolution 200m) pour les zones urbaines à cartographier. Ces données présentent l'avantage d'avoir déjà été corrigées par un biais correctif lors de l'étape de cartographie départementale (à travers la correction appliquée sur les données PREV'AIR et basée sur une étude des performances du modèle national), ce qui n'impliquera pas de réaliser cette correction à l'échelle urbaine.

La Figure 1 illustre les données d'entrée (concentration maximale journalière) issues de Vigipol NO₂ départemental pour l'agglomération Marignane sur une journée de l'année 2009.

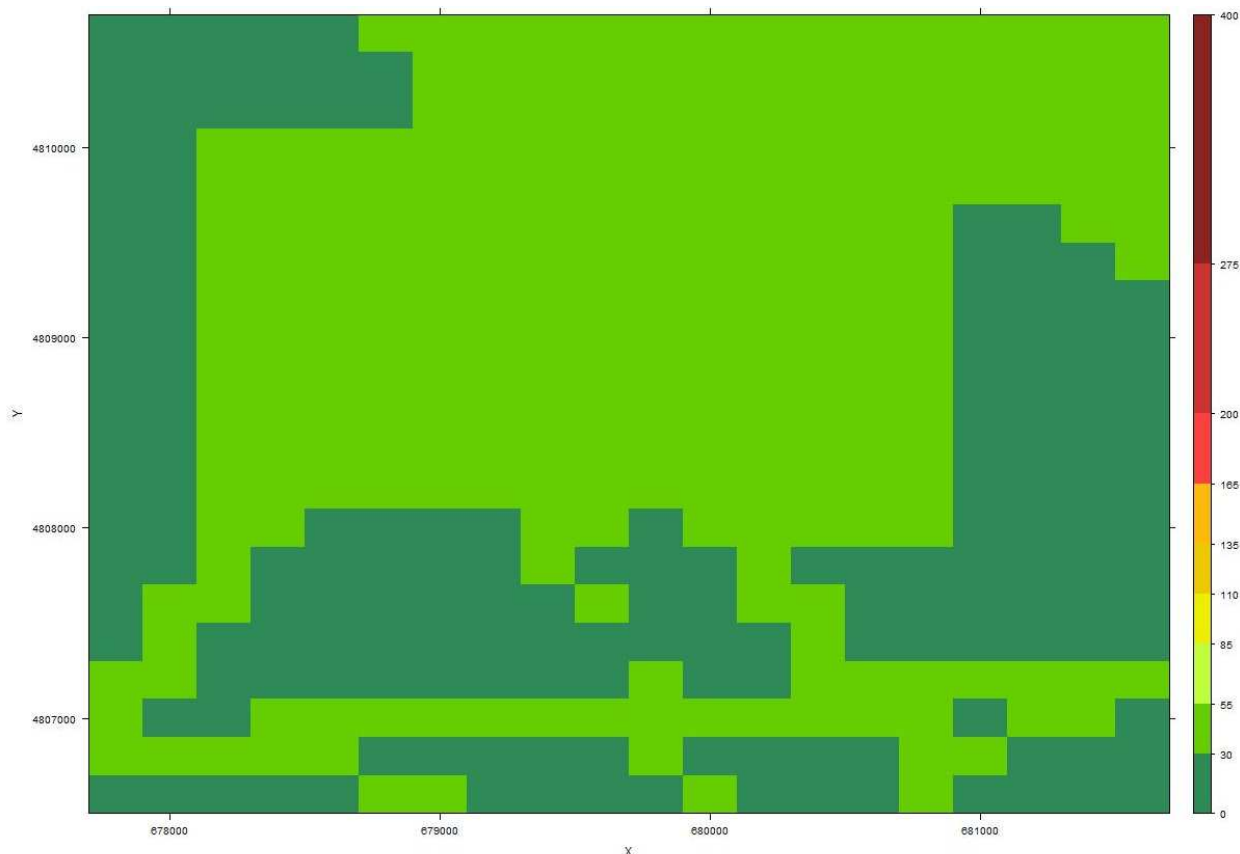


Figure 1 : Concentration maximale journalière (µg/m³) simulée par Vigipol NO₂ départemental (cycle J-1 avant analyse) sur la ville de Marignane pour la journée du 01/04/2009 (résolution 200m)

2.2. Variable auxiliaire

Afin de prendre en compte le caractère local du NO₂, les simulations Vigipol NO₂ départemental sont interpolées à l'échelle urbaine par une technique géostatistique intégrant une variable auxiliaire. Pour chaque ville, trois variables disponibles étaient susceptibles d'apporter un gain d'information pour la réalisation de cartographies à l'échelle urbaine :

- le cadastre des émissions en NO_x. Comme pour la cartographie à l'échelle départementale, les émissions disponibles correspondent à l'inventaire 2004 fourni par ATMO PACA, et correspondent à des données annuelles (exprimées en kg/an) disponibles par secteur d'activité SNAP et sur une grille de départ de résolution 1 km. Trois types d'émission ont été fournis : émissions linéiques, émissions ponctuelles, et émissions totales (intégrant sources linéiques, ponctuelles et surfaciques). Un traitement sous SIG permet de reconstituer pour chaque ville un cadastre des émissions totales à la résolution souhaitée. La Figure 2 représente le cadastre des émissions reconstruit sur Marignane à résolution 10m.
- la variable "Bâti+Axes routiers" intégrant le bâtiment et les principaux axes routiers, issue d'un scan25 IGN et traitée par AIRFOBEP afin de maximiser la corrélation avec la mesure. Afin d'en disposer sur une grille régulière, cette variable auxiliaire peut être interpolée (interpolation bilinéaire) pour chaque ville à la résolution souhaitée. La Figure 3 représente cette variable auxiliaire sur Marignane interpolée à résolution 10m.
- la variable "Bâti seul", également fournie par AIRFOBEP. Comme il a été suggéré par AIRFOBEP, seules les valeurs de bâtis supérieures à 0,4 sont retenues afin de gommer l'effet des bâtis isolés. Afin d'en disposer sur une grille régulière, cette variable auxiliaire peut être interpolée (interpolation bilinéaire) pour chaque ville à la résolution souhaitée. La Figure 4 représente cette variable auxiliaire sur Marignane interpolée à résolution 10m.

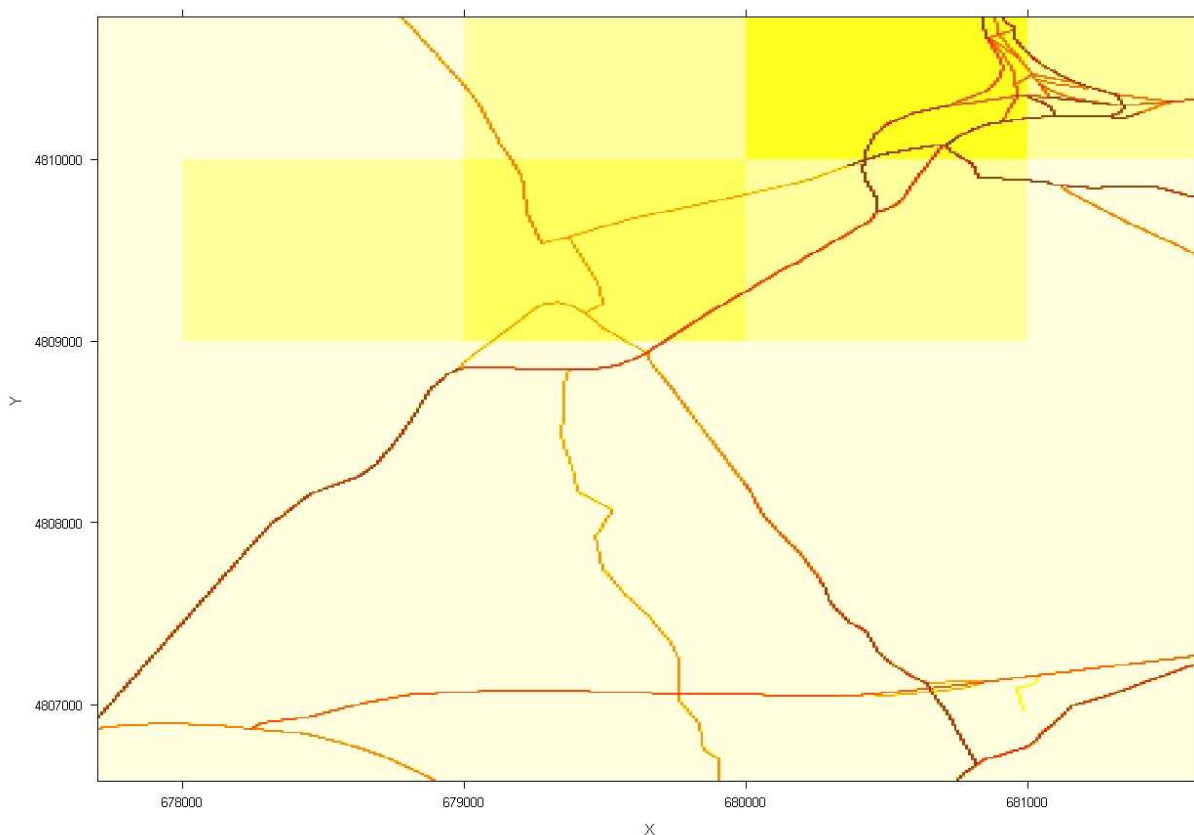


Figure 2 : Carte du cadastre des émissions brutes en NO_x (kg/an) par maille de 10m sur la ville de Marignane

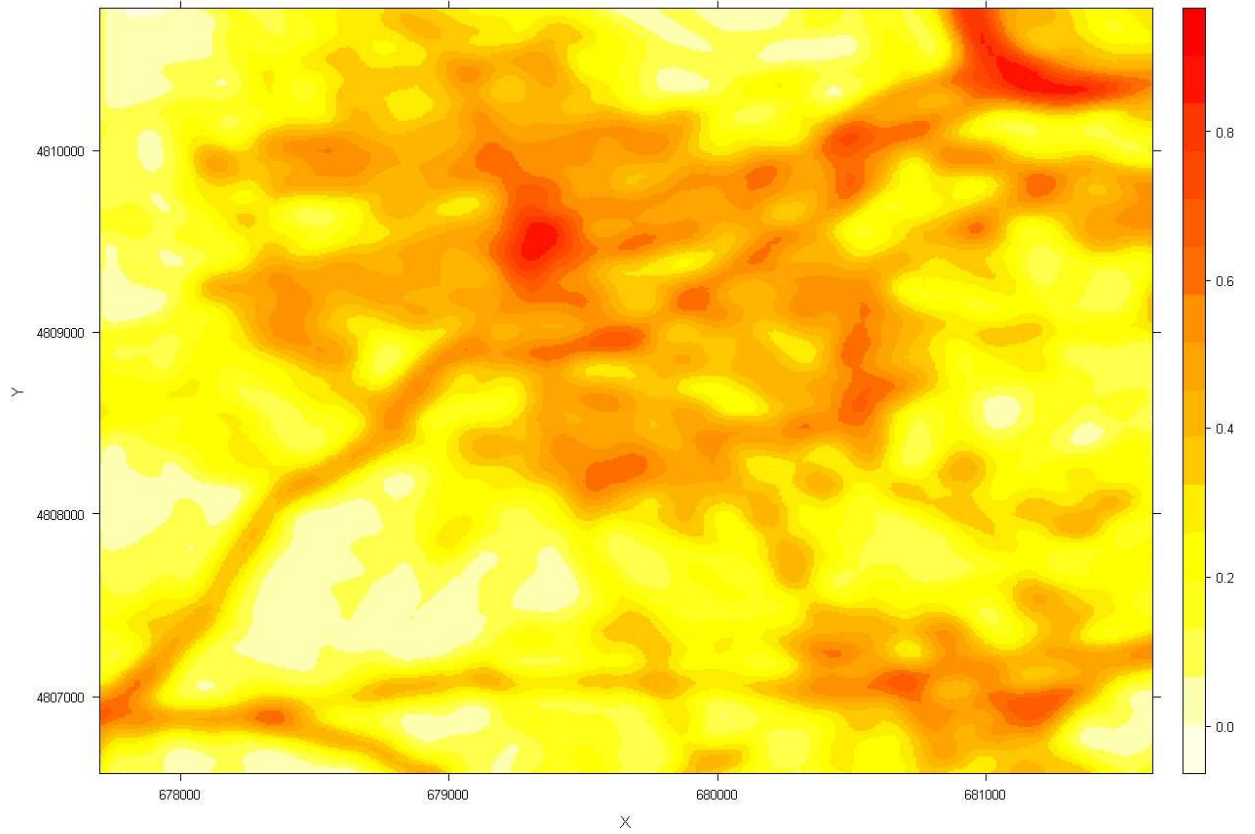


Figure 3 : Carte de la variable "Bâti+Axes routiers" (résolution 10m) sur la ville de Marignane

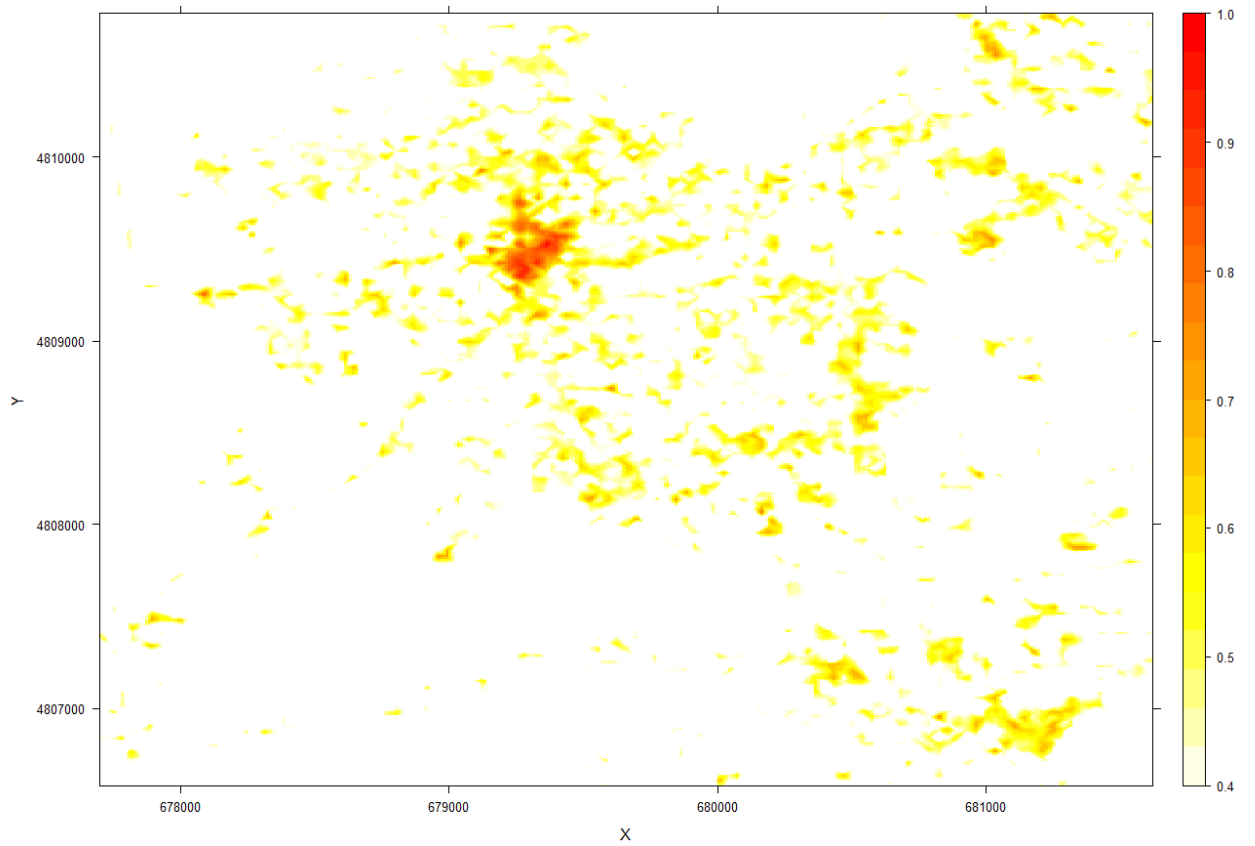


Figure 4 : Carte de la variable "Bâti seul" (résolution 10m) sur la ville de Marignane

Le cadastre des émissions étant porteur d'une information complémentaire de celle apportée par les variables "Bâti+Axes routiers" et "Bâti seul" (notamment prise en compte des sources ponctuelles dans le cadastre des émissions), nous avons évalué la possibilité de combiner ces variables afin de créer une nouvelle variable auxiliaire.

Afin de déterminer la combinaison la plus appropriée de ces variables, trois variables auxiliaires ont été étudiées à partir des trois variables initiales :

- variable auxiliaire "Bâti+Axes routiers",
- variable auxiliaire "Bâti+Axes routiers" combinée au cadastre des émissions NO_x,
- variable auxiliaire "Bâti seul" combinée au cadastre des émissions NO_x.

Dans le cas des deux dernières variables auxiliaires, c'est à dire lorsque deux variables initiales sont combinées, pour ne pas accorder un poids plus fort à l'une ou à l'autre des variables, et étant donné la différence d'ordre de grandeur entre ces variables, chaque variable a été transformée ainsi :

$$\text{var}_{\text{transformée}} = \frac{\text{var}_{\text{origine}} - \min(\text{var})}{\max(\text{var}) - \min(\text{var})}$$

Chaque variable explicative transformée est donc comprise entre 0 et 1. La nouvelle variable auxiliaire finalement obtenue à partir des deux variables explicatives est la somme des deux variables explicatives transformées.

Les Figure 5 et Figure 6 illustrent les nouvelles variables auxiliaires ainsi obtenues sur la ville de Marignane (à résolution 10m) en combinant le cadastre des émissions NO_x soit avec la variable "Bâti+Axes routiers" soit avec la variable "Bâti seul".

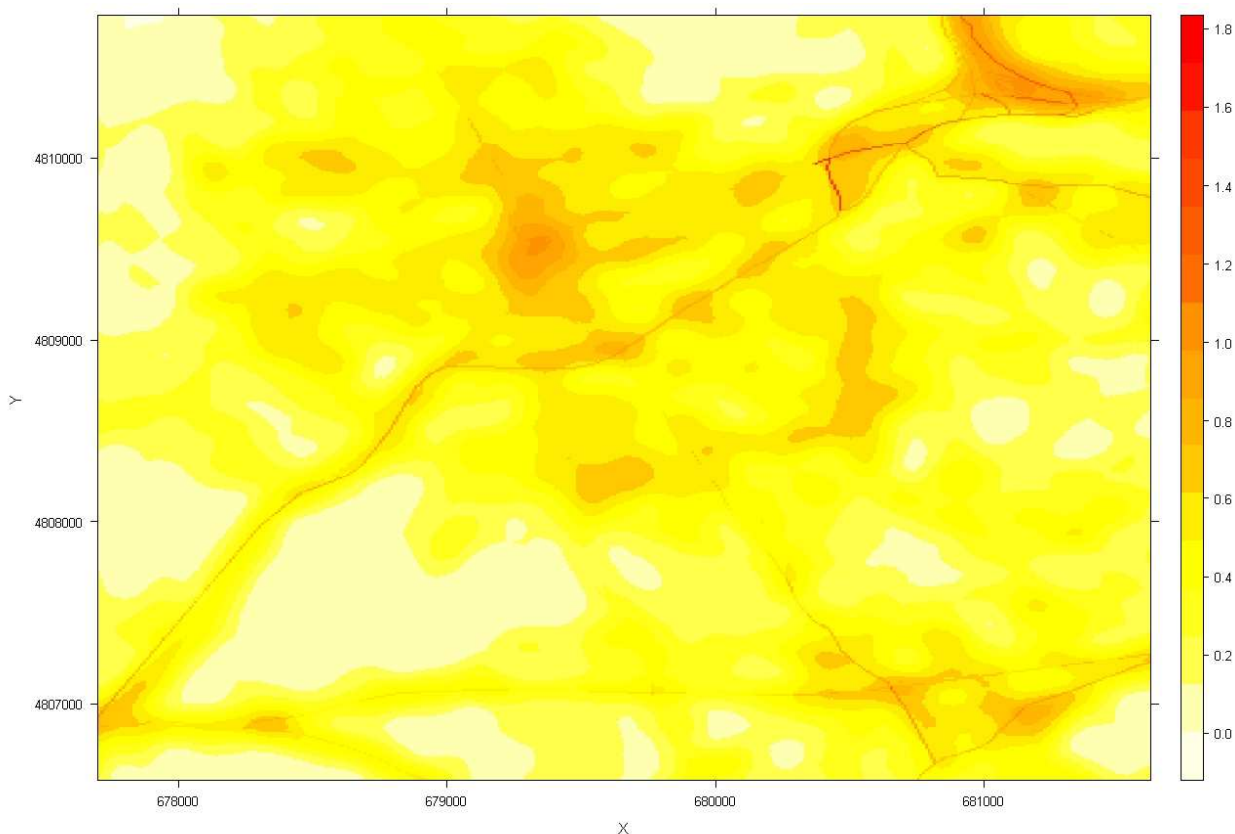


Figure 5 : Carte de la variable auxiliaire combinant cadastre d'émissions NO_x et variable "Bâti+Axes routiers" (résolution 10m) sur la ville de Marignane

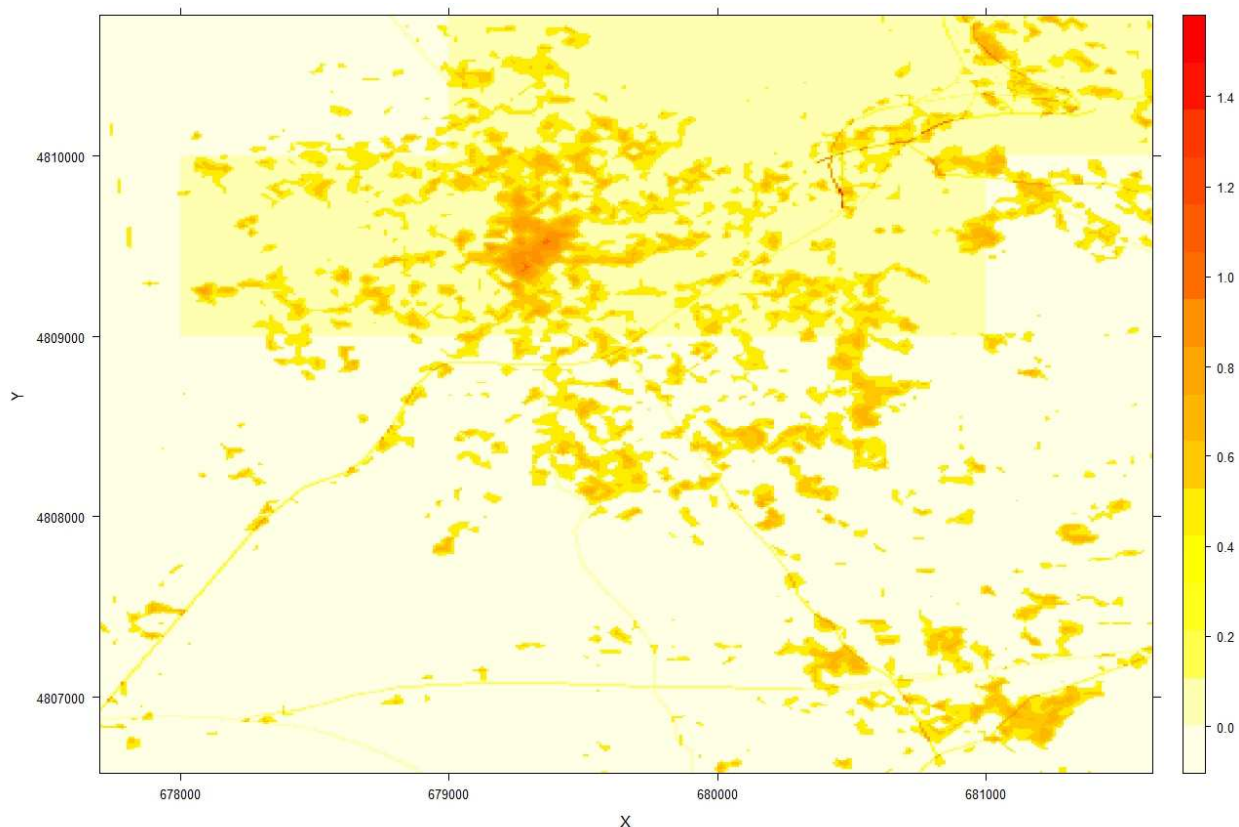


Figure 6 : Carte de la variable auxiliaire combinant cadastre d'émissions NOx et variable "Bâti seul" (résolution 10m) sur la ville de Marignane

Les variables explicatives initiales étant disponibles sur des domaines ne coïncidant pas tout à fait entre eux (le domaine sur lequel on dispose du cadastre des émissions NOx étant plus large que celui sur lequel on dispose des variables "Bâti+Axes routiers" et "Bâti seul"), un périmètre géographique commun aux variables a été défini pour chaque zone urbaine. Cette zone d'étude correspond au domaine sur lequel on dispose simultanément de toutes les variables. Pour chacune des six zones urbaines, cette zone contient à la fois la ville étudiée, ainsi que les emplacements des stations de mesure du NO₂ et des tubes d'échantillonnage passif.

Afin de déterminer la variable auxiliaire à conserver, différents tests d'interpolation ont été réalisés sur l'agglomération de Marignane, sur la période du 1^{er} au 15 avril 2009. Pour chacune des 15 journées, trois cartes de prévision ont été réalisées par une méthode de krigeage avec dérive externe à partir des simulations Vigipol NO₂ départemental (une cartographie par variable auxiliaire). Les simulations Vigipol NO₂ prises en compte sont des simulations prévues par Vigipol NO₂ (non analysées), l'objectif étant ici de réaliser des cartes de prévision à l'échelle urbaine. Les Tableau 1 et Tableau 2 présentent la comparaison modèle¹/mesure sur les deux stations de mesure de la ville pour lesquelles on dispose de mesures (station fixe MRGV et moyen mobile MCIQ).

¹ Affectation du point modèle le plus proche de la station de mesure

Date	Mesure à la station MRGV	Vigipol NO ₂ départemental (résolution 200m)		Krigeage à l'échelle urbaine avec variable auxiliaire Bâti+Axes routiers (résolution 10m)		Krigeage à l'échelle urbaine avec variable auxiliaire intégrant variable Bâti+Axes routiers et cadastre d'émissions NOx (résolution 10m)		Krigeage à l'échelle urbaine avec variable auxiliaire intégrant variable Bâti et cadastre d'émissions NOx (résolution 10m)	
		Prévision	Biais	Prévision	Biais	Prévision	Biais	Prévision	Biais
01/04/09	60.00	35.99	24.01	35.96	24.04	35.95	24.05	36.17	23.83
02/04/09	88.00	46.98	41.02	46.98	41.02	46.97	41.03	47.25	40.75
03/04/09	99.00	44.80	54.20	44.78	54.22	44.77	54.23	45.00	54.00
04/04/09	57.00	45.61	11.39	45.62	11.38	45.62	11.38	45.85	11.15
05/04/09	62.00	46.51	15.49	46.56	15.44	46.54	15.46	46.83	15.17
06/04/09	83.00	47.40	35.60	47.42	35.58	47.41	35.59	47.67	35.33
07/04/09	94.00	46.83	47.17	46.78	47.22	46.77	47.23	47.01	46.99
08/04/09	84.00	46.75	37.25	46.81	37.19	46.81	37.19	47.09	36.91
09/04/09	96.00	46.40	49.60	46.41	49.59	46.40	49.60	46.66	49.34
10/04/09	94.00	36.77	57.23	36.73	57.27	36.72	57.28	36.95	57.05
11/04/09	39.00	30.29	8.71	30.33	8.67	30.32	8.68	30.62	8.38
12/04/09	57.00	37.33	19.67	37.30	19.70	37.29	19.71	37.51	19.49
13/04/09	59.00	37.50	21.50	37.50	21.50	37.48	21.52	37.72	21.28
14/04/09	69.00	48.30	20.70	48.27	20.73	48.26	20.74	48.54	20.46
15/04/09	35.00	29.52	5.48	29.49	5.51	29.48	5.52	29.70	5.30
Moyenne	71.73	41.80	29.93	41.80	29.94	41.79	29.95	42.04	29.70

Tableau 1 : Comparaison modèle/mesure pour la prévision de la concentration maximale journalière en NO₂ (µg/m³) par différents modèles à la station fixe MRGV sur une période de 15 jours

Date	Mesure à la station MCIQ	Vigipol NO ₂ départemental (résolution 200m)		Krigeage à l'échelle urbaine avec variable auxiliaire Bâti+Axes routiers (résolution 10m)		Krigeage à l'échelle urbaine avec variable auxiliaire intégrant variable Bâti+Axes routiers et cadastre d'émissions NOx (résolution 10m)		Krigeage à l'échelle urbaine avec variable auxiliaire intégrant variable Bâti et cadastre d'émissions NOx (résolution 10m)	
		Prévision	Biais	Prévision	Biais	Prévision	Biais	Prévision	Biais
01/04/09	43.00	30.92	12.08	30.40	12.60	30.36	12.64	32.52	10.48
02/04/09	85.00	40.38	44.62	39.73	45.27	39.69	45.31	42.54	42.46
03/04/09	91.00	39.65	51.35	39.03	51.97	39.00	52.00	41.34	49.66
04/04/09	53.00	39.47	13.53	38.91	14.09	38.88	14.12	41.36	11.64
05/04/09	84.00	40.48	43.52	39.89	44.11	39.84	44.16	42.70	41.30
06/04/09	90.00	41.52	48.48	40.90	49.10	40.86	49.14	43.45	46.55
07/04/09	105.00	40.65	64.35	40.00	65.00	39.96	65.04	42.48	62.52
08/04/09	79.00	40.95	38.05	40.60	38.40	40.56	38.44	42.97	36.03
09/04/09	130.00	40.62	89.38	40.14	89.86	40.11	89.89	42.53	87.47
10/04/09	89.00	31.48	57.52	30.86	58.14	30.82	58.18	33.14	55.86
11/04/09	32.00	23.50	8.50	23.03	8.97	22.99	9.01	25.78	6.22
12/04/09	63.00	32.07	30.93	31.51	31.49	31.47	31.53	33.71	29.29
13/04/09	75.00	32.53	42.47	31.97	43.03	31.94	43.06	34.23	40.77
14/04/09	71.00	41.61	29.39	40.92	30.08	40.87	30.13	43.73	27.27
15/04/09	39.00	24.29	14.71	23.74	15.26	23.70	15.30	25.93	13.07
Moyenne	75.27	36.01	39.26	35.44	39.82	35.40	39.86	37.89	37.37

Tableau 2 : Comparaison modèle/mesure pour la prévision de la concentration maximale journalière en NO₂ (µg/m³) par différents modèles au moyen mobile MCIQ sur une période de 15 jours

Globalement, le choix de la variable auxiliaire ne semble pas avoir de grande influence au niveau de la comparaison modèle/mesure aux stations. On note tout de même une très légère amélioration du biais lorsque la variable "Bâti seul" combinée aux émissions NOx est utilisée, notamment concernant les performances au moyen mobile MCIQ. Concernant les cartographies correspondantes, on n'observe pas de nette différence entre les cartographies obtenues par krigeage avec la variable auxiliaire "Bâti+Axes routiers" et celles obtenues par krigeage avec la variable auxiliaire "Bâti+Axes routiers" combinée aux émissions NOx (Figure 7 et Figure 8). L'utilisation de la variable auxiliaire "Bâti seul" combinée aux émissions NOx (Figure 9) conduit à un rendu différent, sur lequel l'effet des bâtiments est nettement visible. Ce rendu ne nous paraît pas opportun par rapport à une publication des cartes pour le grand public en risquant de pointer et amener des questions qui n'ont pas lieu d'être sur des zones très précises.

Finalement, il a paru recommandé de conserver la variable auxiliaire combinant le cadastre des émissions NOx et la variable "Bâti+Axes routiers", puisqu'elle permet de prendre en compte une information complémentaire à celle fournie par la variable "Bâti+Axes routiers" prise seule (sources ponctuelles, routes supplémentaires...) tout en ne modifiant pas les résultats dans les zones où les deux informations existent.

La variable auxiliaire prise en compte est donc la seconde variable : variable "Bâti+Axes routiers" combinée aux émissions NOx.

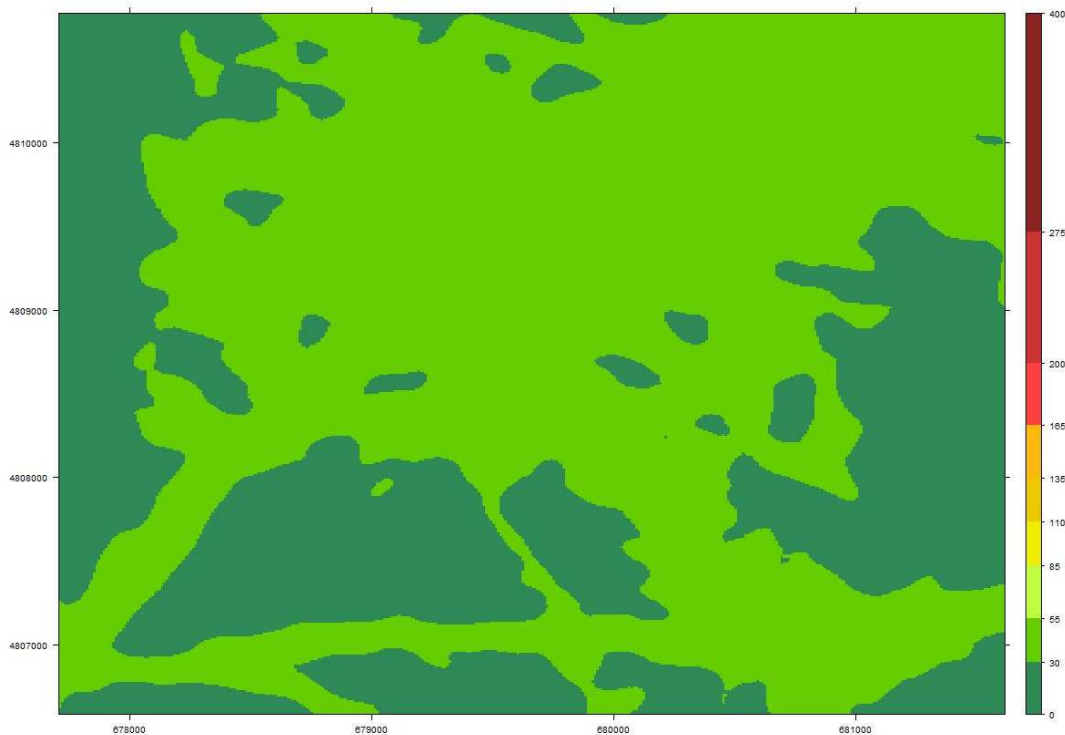


Figure 7 : Concentration maximale journalière en NO₂ (µg/m³) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009, interpolée par krigeage avec dérive externe avec la variable auxiliaire Bâti+Axes routiers



Figure 8 : Concentration maximale journalière en NO₂ (µg/m³) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009, interpolée par krigeage avec dérive externe avec la variable auxiliaire Bâti+Axes routiers combinée aux émissions NOx

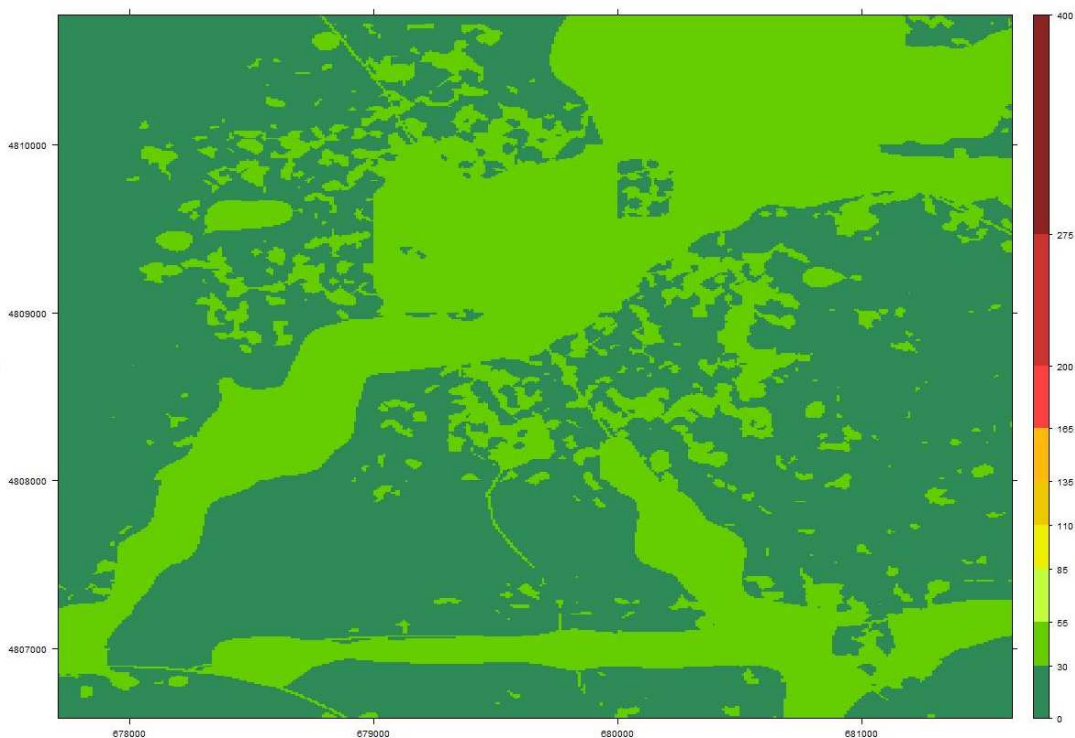


Figure 9 : Concentration maximale journalière en NO₂ (µg/m³) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009, interpolée par krigeage avec dérive externe avec la variable auxiliaire Bâti combinée aux émissions NOx

2.3. Relation entre la concentration en NO₂ et la variable auxiliaire

La prise en compte d'une variable auxiliaire dans un krigeage nécessite que la variable auxiliaire soit très fortement corrélée à la concentration à estimer. La corrélation entre la variable auxiliaire et la concentration en NO₂ a donc été étudiée. Pour cela, il a fallu attribuer une valeur de variable auxiliaire à chaque point de simulation modèle Vigipol NO₂ départemental. La valeur de variable auxiliaire attribuée correspond à la moyenne de la variable auxiliaire sur la maille de 200m de la simulation.

La recherche d'une variable explicative corrélée à la concentration de NO₂ exige le plus souvent une étape de transformation mathématique de la variable (passage au logarithme, racine carrée...) et de détermination de l'unité à prendre en compte (kg/an, kg/m²/an, ...). La corrélation a été étudiée entre la concentration en NO₂ et les valeurs de variable auxiliaire prises en compte sous différentes formes (logarithme, logarithme rapporté à la moyenne, racine carrée, ...). Pour chacune des villes considérées, la concentration en NO₂ s'est montrée plus étroitement corrélée avec la racine 6^{ème} de la variable auxiliaire, qui a pour effet de linéariser la relation avec la concentration en NO₂ (Figure 10).

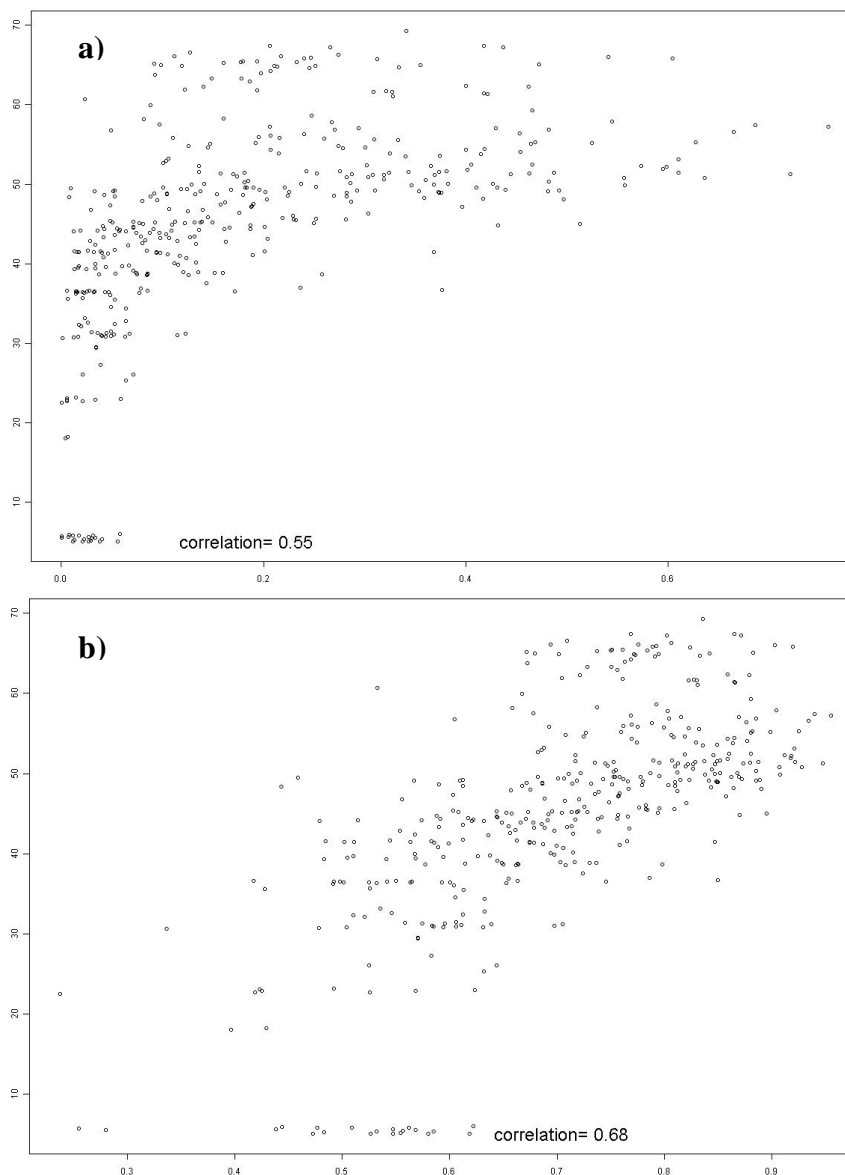


Figure 10 : Concentration maximale journalière en NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) simulée par Vigipol NO₂ départemental sur la ville de Salon de Provence pour la journée du 20/01/2009, en fonction de : **a)** la variable auxiliaire non transformée, et **b)** la racine 6^{ème} de la variable auxiliaire

2.4. Technique de krigeage

La technique utilisée afin de réaliser l'interpolation à l'échelle urbaine est celle du krigeage. Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale qui permet une estimation linéaire basée sur l'espérance mathématique et aussi sur la variance de la donnée spatialisée. A ce titre, le krigeage se base sur le calcul, l'interprétation et la modélisation du variogramme, qui est un outil fondamental en géostatistique pour analyser et modéliser la structure spatiale de la variable régionalisée.

Tout comme à l'échelle départementale, la variable auxiliaire étant disponible sur une grille fine et régulière, deux méthodes de krigeage s'avèrent adéquates dans ce cas précis : le krigeage avec dérive externe et le cokrigeage colocalisé.

Pour des raisons de contraintes de calcul liées à une mise en place de la méthode en opérationnel, la technique de krigeage retenue est celle du krigeage avec dérive externe.

Cette technique conduit à se placer dans le cadre non stationnaire (c'est à dire que la moyenne ou la covariance de la concentration du polluant noté Z et de ses accroissements n'existe pas ou n'est pas stationnaire). Cette technique repose sur la connaissance d'une ou plusieurs variables auxiliaires supposées mesurer indirectement le même phénomène que celui qui est étudié. La non stationnarité est alors totalement prise en compte dans la dérive externe.

On suppose donc que les variables auxiliaires expliquent les concentrations du polluant (cette hypothèse doit être vérifiée au préalable) :

$$Z(x) = a_1.f_1(x) + a_2.f_2(x) + \dots + a_N.f_N(x) + b + R(x)$$

- avec
- Z la concentration du polluant
 - $f_1, f_2 \dots f_N$ les variables auxiliaires, connues en tout point de la grille d'estimation
 - R le résidu aléatoire de la régression

On suppose que les coefficients a_k et b de la régression ne sont pas fixés : ils sont ajustés pour chaque point lors du krigeage.

En un point p de la grille, la concentration Z est considérée comme une variable aléatoire et estimée par une combinaison linéaire des concentrations voisines :

$$\hat{Z}(p) = \sum_i \lambda_i Z(x_i)$$

- avec
- \hat{Z} l'estimation de la concentration du polluant
 - x_i les points d'observation de Z

Les pondérateurs λ_i sont calculés de telle façon que l'estimateur soit sans biais et de variance d'erreur minimale. Ces poids sont solutions d'un système linéaire d'équations faisant intervenir le modèle de variogramme. Ils doivent de plus remplir la condition supplémentaire de dérive externe : $\sum_i \lambda_i f_k(x_i) = f_k(p) \quad \forall k \in [1; N]$

Dans le cas du krigeage avec dérive externe, le variogramme est construit sur les résidus de la régression entre la concentration en NO₂ et la variable auxiliaire. Il a été choisi d'ajuster le variogramme expérimental par un modèle exponentiel sans effet de pépité. Les autres paramètres du variogramme (distance de calcul du variogramme, pas de calcul, portée et palier) sont ajustés automatiquement lors de chaque krigeage.

2.5. Résolution des cartographies

Pour chacune des six villes, les cartographies sont réalisées sur la zone géographique sur laquelle on dispose de la variable auxiliaire. Deux résolutions ont été envisagées pour les cartographies : 10m et 40m. Comme le krigeage avec dérive externe implique de disposer des variables auxiliaires sur la grille d'estimation (donc à la résolution d'estimation), l'ensemble du travail concernant le traitement des variables auxiliaires a été effectué à l'identique pour ces deux résolutions (reconstitution du cadastre des émissions, interpolation de la variable "Bati+Axes routiers" et de la variable "Bâti seul", transformation des variables explicatives, calcul de nouvelles variables auxiliaires combinant les variables explicatives).

Dans un premier temps, il a été testé d'interpoler les simulations Vigipol NO₂ départemental (Figure 11) à la résolution de 10m (Figure 12). Cependant, les tests de krigeage ont montré que la résolution particulièrement fine de 10m conduisait à des temps de calculs relativement importants. Aussi, dans un second temps, de nouveaux tests ont été réalisés à résolution 40m, dans le but d'alléger les temps de calcul des étapes de krigeage. Cependant les cartographies obtenues à résolution 40m manquaient de précision qualitativement (Figure 13). Puisque la réalisation de cartographies porte finalement uniquement sur les maxima journaliers (et non plus sur les concentrations horaires comme prévu initialement), et que cela n'impose donc finalement que 4 cartes à réaliser chaque jour (une carte par échéance de prévision), il semble réalisable de conserver la résolution de 10m du point de vue des temps de calcul.

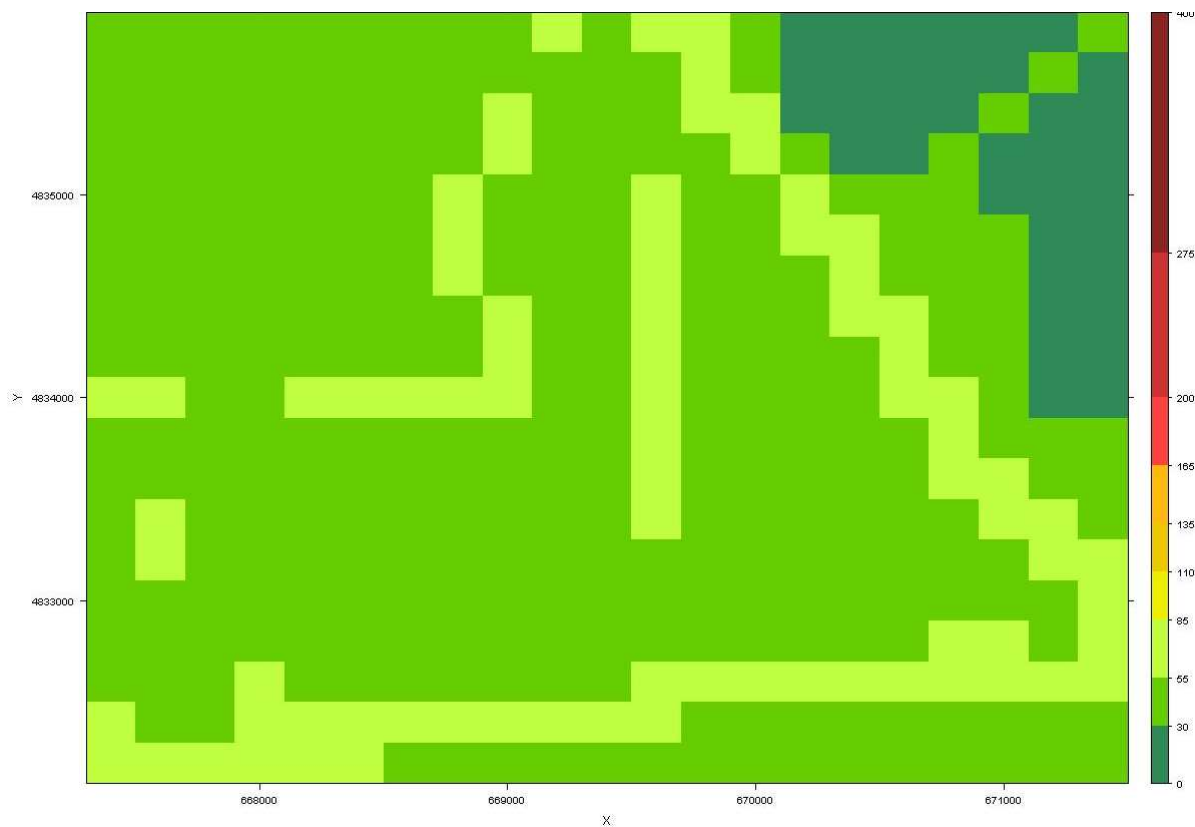


Figure 11 : Concentration maximale journalière ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) simulée par Vigipol NO₂ départemental (cycle J-1 avant analyse) sur la ville de Salon de Provence pour la journée du 20/01/2009 (résolution 200m)

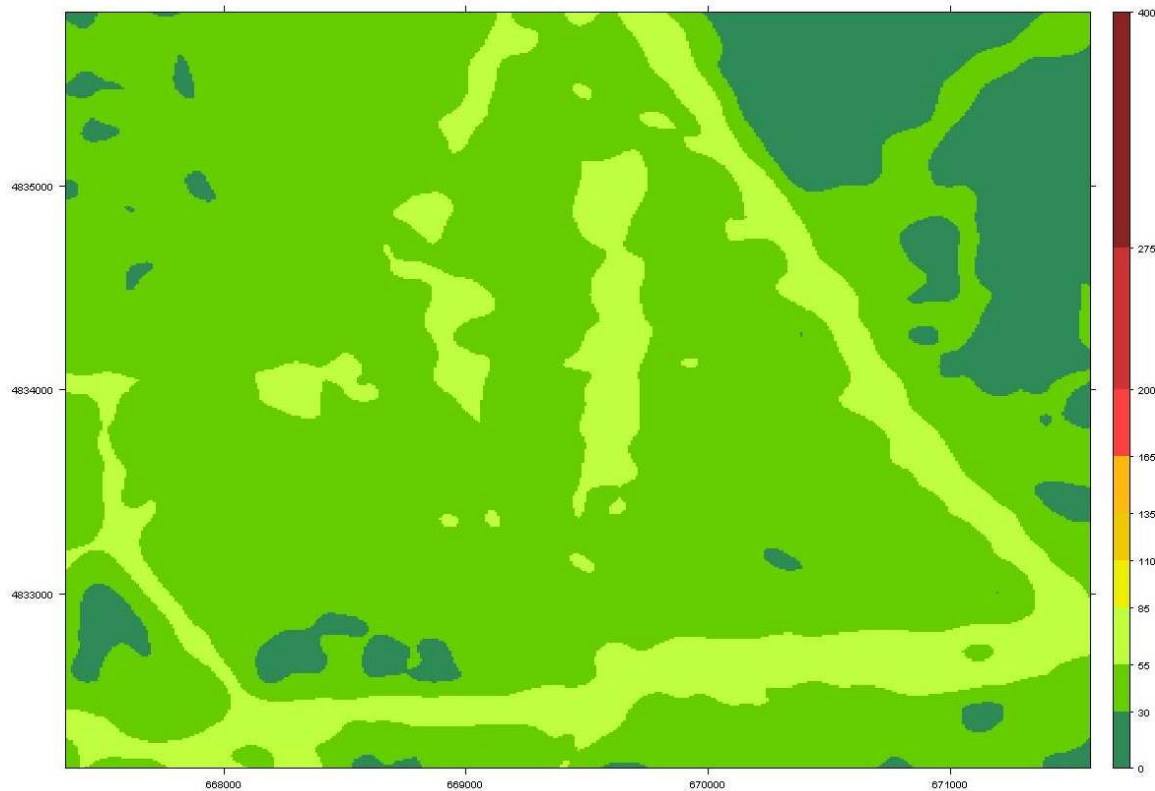


Figure 12 : Concentration maximale journalière en NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) issue du krigeage avec dérive externe sur la ville de Salon de Provence pour la journée du 20/01/2009 (résolution 10m)

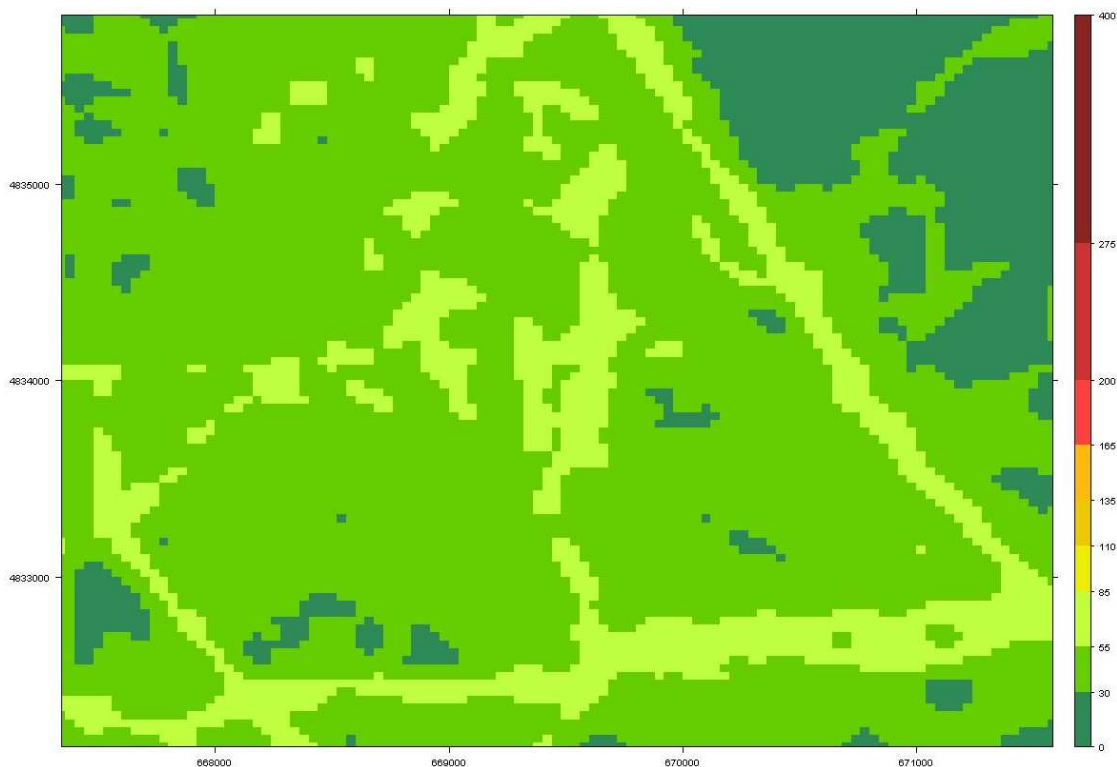


Figure 13 : Concentration maximale journalière en NO₂ (µg/m³) issue du krigeage avec dérive externe sur la ville de Salon de Provence pour la journée du 20/01/2009 (résolution 40m)

2.6. Cartes analysées

□ Création des stations virtuelles

La production d'une carte analysée consiste à corriger les simulations modèle grâce aux mesures aux stations. Etant donné le faible nombre de stations de mesure sur les six agglomérations (une station de mesure par agglomération), il est nécessaire d'exploiter les données des tubes d'échantillonnage passif afin de réaliser les cartes analysées.

La méthode retenue pour l'élaboration des cartes analysées est la création de "stations virtuelles", par un recours aux mesures obtenues par échantillonnage passif lors de précédentes campagnes. La méthode consiste à déterminer des corrélations linéaires entre les mesures à la station automatique et les mesures obtenues par échantillonnage passif en un site donné. Les sites passifs corrélés à la station fixe de référence sont considérés comme des stations virtuelles auxquelles on fait l'hypothèse qu'on peut affecter à n'importe quel moment (fréquence hebdomadaire ou journalière) une valeur de NO₂ calculée à partir de la corrélation existant avec la station automatique. Dans notre cas, les corrélations entre tubes et stations fixes ont été fournies par Airfobep et sont issues de campagnes de mesure mises en place sur les différentes villes.

□ Simulations Vigipol NO₂ départemental pour la carte analysée J-1

Concernant la réalisation de la carte analysée J-1, deux simulations Vigipol NO₂ à l'échelle départementale sont disponibles pour J-1 : simulation avec analyse et simulation après analyse (Figure 14). Les simulations utilisées en vue de réaliser la carte analysée seront logiquement les simulations Vigipol NO₂ analysées.

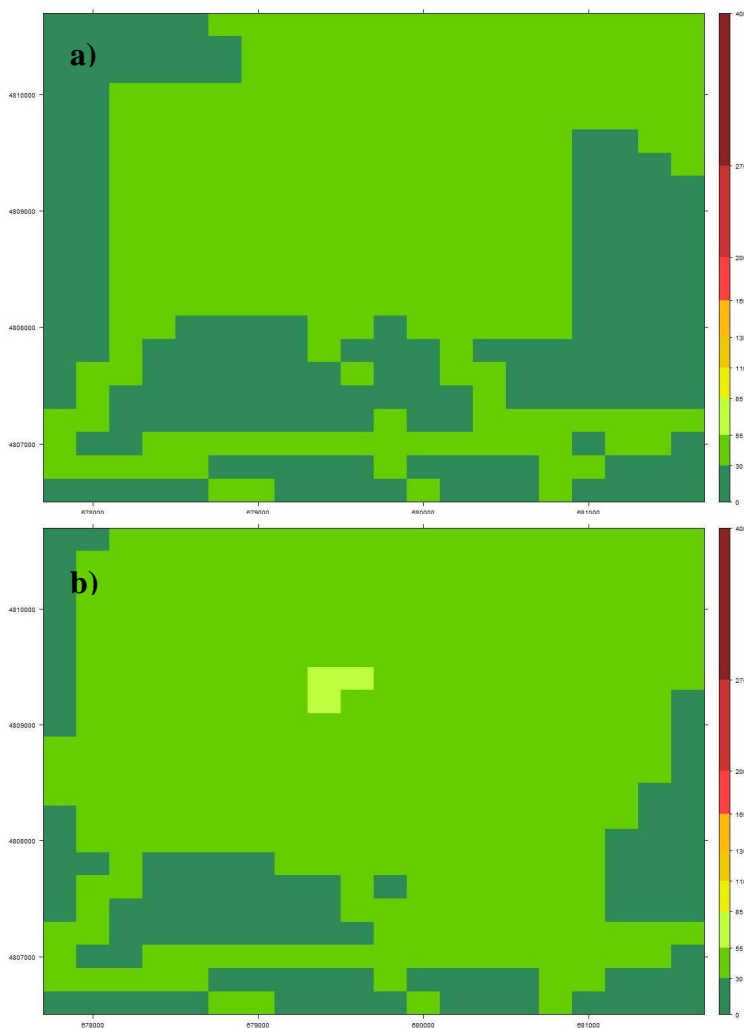


Figure 14 : Concentration maximale journalière en NO₂ (µg/m³) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009 simulée par Vigipol NO₂ départemental (cycle J-1) **a)** avant analyse et **b)** après analyse

□ Méthode de génération des cartes analysées J-1

Plusieurs techniques pour la réalisation de la carte analysée de J-1 ont été testées :

- Méthode 1 : Interpolation des simulations Vigipol NO₂ départemental à la résolution de 10m par krigeage avec dérive externe, puis krigeage des innovations pour assimiler les observations

Ici, les simulations J-1 de Vigipol NO₂ départemental (résolution 200m) sont tout d'abord interpolées par krigeage avec dérive externe à l'échelle urbaine (résolution 10m) en intégrant la variable auxiliaire, comme c'est le cas pour le mode prévision. Les mesures aux stations (station fixe et tubes) sont prises en compte dans un second temps. Pour cela, les écarts entre mesures aux stations et simulations Vigipol NO₂ urbain sont interpolés sur le domaine par krigeage des innovations. La portée est soit calculée automatiquement lors du krigeage soit fixée à un seuil tel que 100m.

Pour rappel c'est l'approche qui a été retenue pour les simulations Vigipol NO₂ départemental à partir des simulations PREV'AIR.

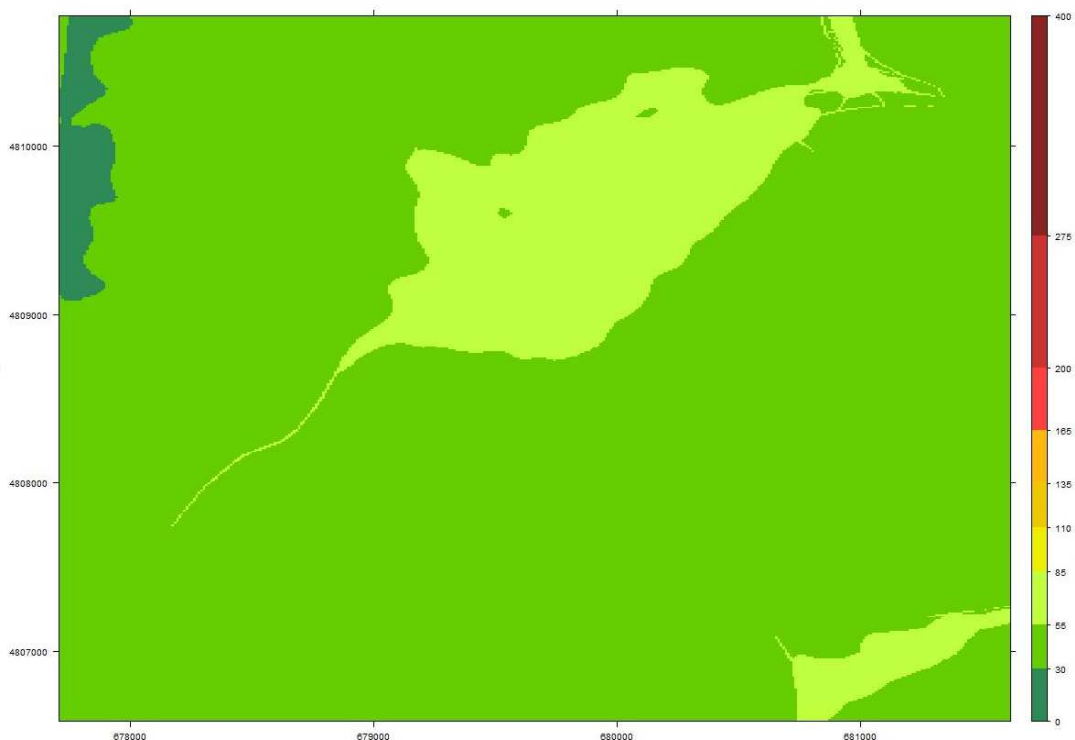


Figure 15 : Concentration maximale journalière en NO₂ (µg/m³) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009, interpolée par krigeage avec dérive externe, puis analysée par krigeage des innovations (avec portée calculée automatiquement)

- Méthode 2 : krigeage des innovations avec dérive externe sur les simulations Vigipol NO₂ départemental

Ici, les simulations J-1 de Vigipol NO₂ départemental (résolution 200m) sont directement interpolées à l'échelle urbaine (résolution 10m) par krigeage des innovations avec dérive externe : la variable auxiliaire et les mesures aux stations sont intégrées dans une seule et même étape. Pour cela, les écarts entre mesures aux stations et simulations Vigipol NO₂ départemental sont interpolés sur le domaine par krigeage des innovations en tenant compte de la variable auxiliaire.

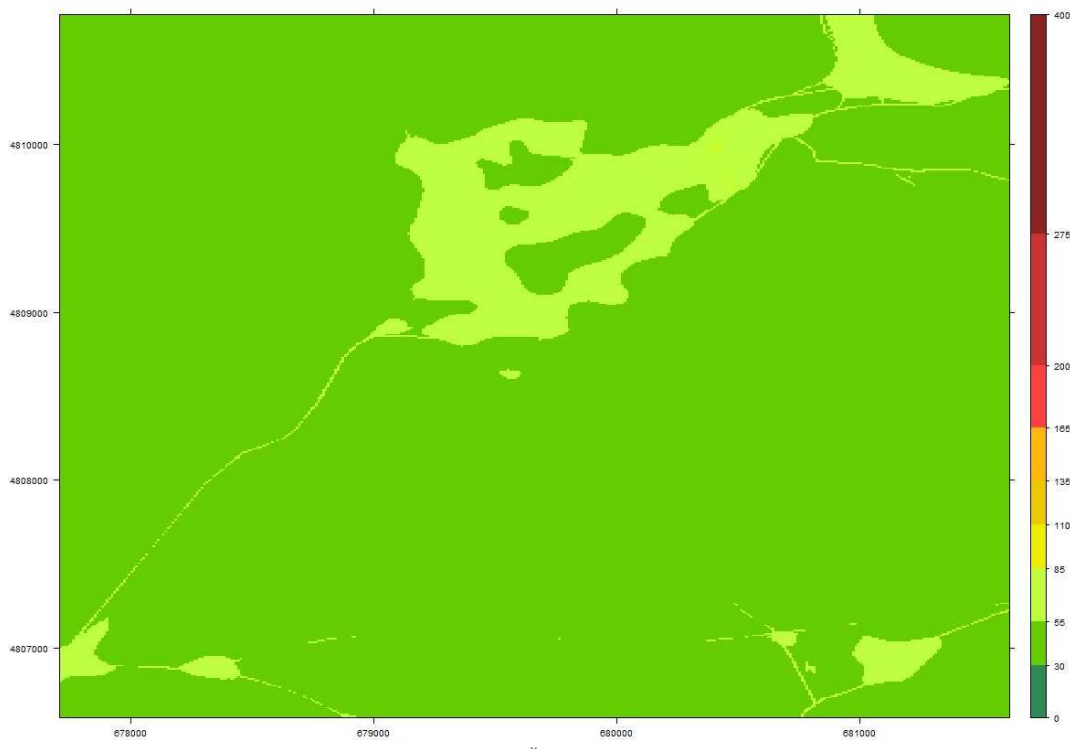
Cette technique a l'avantage d'apporter une information complémentaire à travers la variable auxiliaire afin d'interpoler les écarts modèle/mesure, cependant elle nécessite que les écarts modèle/mesure soient fortement corrélés à la variable auxiliaire, ce qui ne s'est pas avéré vérifié lors des tests réalisés (et comme cela fut également le cas pour Vigipol NO₂ départemental). Cela est visible sur les cartes obtenues, pour lesquelles on semble perdre l'information liée à la variable auxiliaire (routes nettement moins visibles).



Figure 16 : Concentration maximale journalière en NO₂ (µg/m³) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009, analysée par krigeage des innovations avec dérive externe

- Méthode 3 : krigeage des observations avec dérive externe

Ici, ce sont les mesures aux stations qui sont directement interpolées à l'échelle urbaine (résolution 10m) en intégrant la variable auxiliaire. Cette approche a été évaluée à la demande d'AIRFOBEP. Cette technique présente l'inconvénient de n'exploiter à aucun moment les simulations modèle issues de Vigipol NO₂ départemental. En outre, cette technique n'est pas applicable en prévision sauf si on s'appuie sur les prévisions de concentration de Vigipol NO₂ départemental et qu'on en déduit les concentrations prévues au niveau des tubes passifs par corrélation, ce qui ne semble pas une approche robuste.



- Conclusion :

Ces trois méthodes d'analyse ont été testées sur l'agglomération de Marignane, toujours sur la période du 1^{er} au 15 avril 2009. Pour chacune des 15 journées, trois cartographies ont donc été réalisées. Dans le cas des méthodes 1 et 2, les simulations modèle de départ utilisées sont les simulations J-1 analysées de Vigipol NO₂ départemental et la variable auxiliaire est la variable "Bâti+Axes routiers" combinée au cadastre des émissions NO_x. L'évaluation des techniques d'analyse n'étant pas possible à la station fixe MRGV de Marignane (celle-ci servant à la réalisation de la carte analysée), le Tableau 3 présente la comparaison modèle²/mesure au moyen mobile MCIQ, non pris en compte pour corriger les cartes.

² Affectation du point modèle le plus proche de la station de mesure

Date	Mesure à la station MCIQ	Vigipol NO ₂ départemental analysé (résolution 200m)		Méthode d'analyse 1		Méthode d'analyse 2		Méthode d'analyse 3	
		Prévision	Biais	Prévision	Biais	Prévision	Biais	Prévision	Biais
01/04/09	43.00	36.63	6.37	41.30	1.70	46.77	-3.77	40.77	2.23
02/04/09	85.00	44.34	40.66	61.70	23.30	65.9	19.10	59.53	25.47
03/04/09	91.00	45.99	45.01	69.84	21.16	73.93	17.07	66.91	24.09
04/04/09	53.00	36.92	16.08	40.18	12.82	41.92	11.08	38.77	14.23
05/04/09	84.00	42.68	41.32	42.04	41.96	47.47	36.53	42.11	41.89
06/04/09	90.00	48.51	41.49	59.52	30.48	64.73	25.27	56.18	33.82
07/04/09	105.00	40.81	64.19	65.41	39.59	68.78	36.22	63.55	41.45
08/04/09	79.00	49.81	29.19	60.84	18.16	65.86	13.14	56.85	22.15
09/04/09	130.00	48.59	81.41	68.98	61.02	72.41	57.59	64.9	65.1
10/04/09	89.00	43.52	45.48	64.98	24.02	71.29	17.71	63.55	25.45
11/04/09	32.00	25.7	6.3	22.99	9.01	29.45	2.55	26.78	5.22
12/04/09	63.00	31.99	31.01	39.99	23.01	42.22	20.78	38.77	24.23
13/04/09	75.00	35.31	39.69	40.70	34.30	45.81	29.19	40.11	34.89
14/04/09	71.00	43.3	27.7	48.31	22.69	52.78	18.22	46.79	24.21
15/04/09	39.00	25.17	13.83	22.06	16.94	26.64	12.36	24.12	14.88
Moyenne	75.27	39.95	35.32	49.92	25.34	54.40	20.87	48.65	26.62

Tableau 3 : Comparaison modèle/mesure pour l'analyse de la concentration maximale journalière en NO₂ (µg/m³) par différents modèles au moyen mobile MCIQ sur une période de 15 jours

Ces résultats montrent que quelle que soit la méthode d'analyse employée, celle-ci améliore les performances au niveau du moyen mobile MCIQ par rapport aux performances obtenues avant analyse (biais de 35,32 µg/m³). Bien que le biais soit plus faible pour la méthode d'analyse 2 (krigeage des innovations avec dérive externe sur les simulations Vigipol NO₂ départemental), cette méthode reste toutefois peu appropriée étant donné que la corrélation entre innovations et variable auxiliaire n'a pas été vérifiée sur le jeu test utilisé ici, et ne le sera probablement pas pour de nombreuses journées. Pour rappel, l'impact sur les cartographies produites peut alors être très négatif comme cela avait été visualisé lors du développement de Vigipol NO₂ départemental.

La méthode finalement employée en opérationnel est la méthode 1 : le krigeage des innovations. Cette technique est celle déjà mise en œuvre pour la réalisation des cartes analysées des plate-formes Vigipol PM, O₃, SO₂ et NO₂ départemental. Ici, la correction autour des stations est fixée automatiquement lors du krigeage.

□ Extension de la méthode pour les cartes J, J+1 et J+2

Tout comme les simulations modèle J-1 sont corrigées par les mesures observées aux stations (observation à la station fixe et estimations aux tubes par corrélation avec l'observation à la station fixe), il pourrait être envisagé de corriger les cartes de prévision par les estimations aux tubes (estimées par corrélation avec la prévision modèle à la station fixe).

Cependant, cette technique suppose que la prévision modèle aux emplacements des tubes est moins fiable que l'estimation de la concentration aux tubes par corrélation avec la prévision à la station fixe. Cela revient finalement à

faire l'hypothèse que la prévision modèle à la station fixe est meilleure que la prévision modèle aux tubes. Cette hypothèse étant difficilement vérifiable, il ne semble pas vraiment recommandé de mettre en place une telle technique. De plus, ne disposant pas des mesures aux tubes, il n'est pas possible de vérifier la pertinence de cette méthode de correction des cartes de prévision et aucune statistique de performance de cette méthode n'a pu être établie. Une option permettant d'appliquer cette technique en opérationnel restera toutefois à disposition.

2.7. Schéma des étapes de production des cartes

La Figure 18 récapitule les différentes étapes mises en œuvre pour la réalisation des cartes de NO₂ à l'échelle urbaine. La succession d'étapes présentée est réalisée pour chacune des 6 zones urbaines à cartographier.

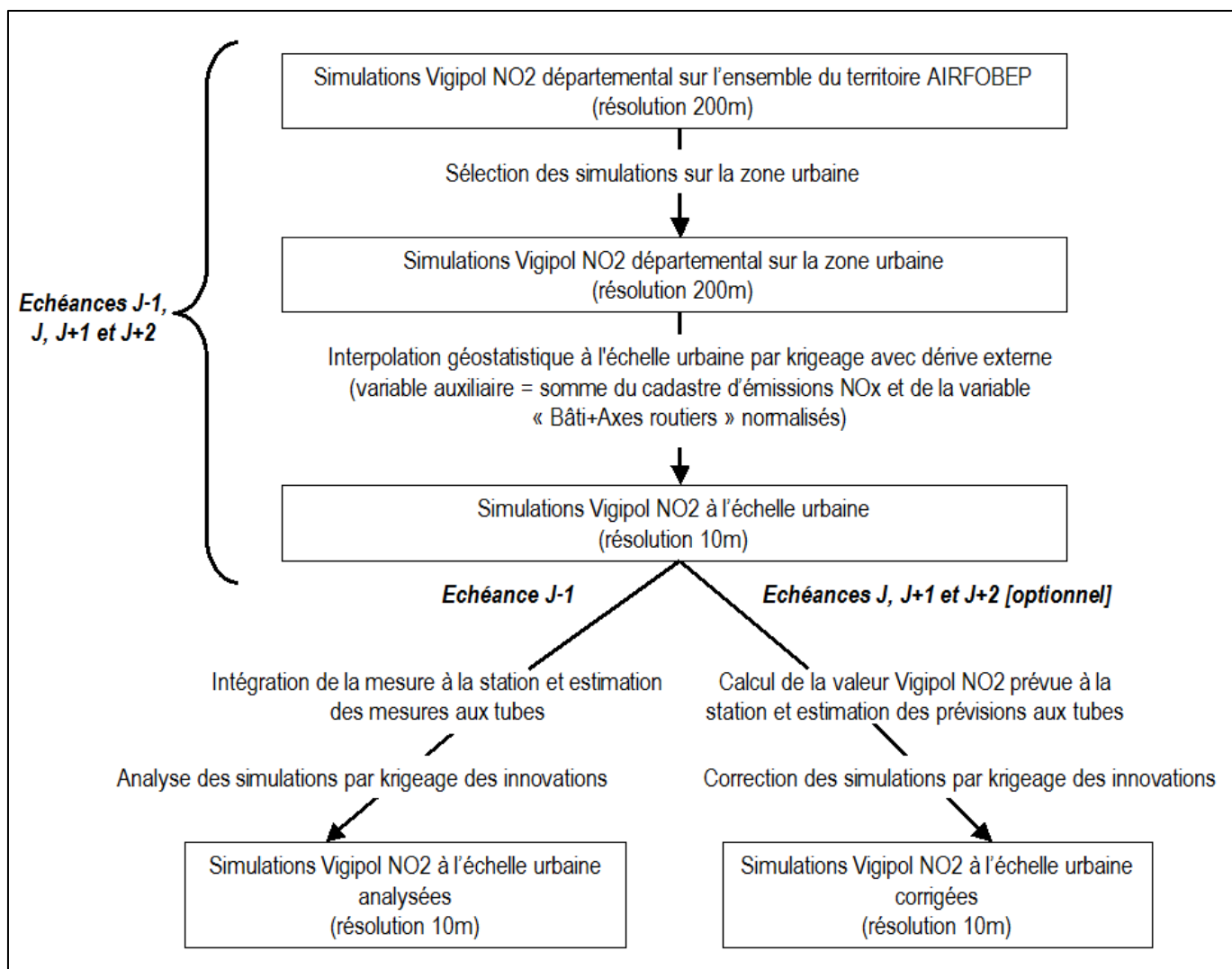


Figure 18 : Etapes de production des cartes de NO₂ à l'échelle urbaine

Conclusion



3. Conclusion

Ce présent document visait la description, d'un point de vue méthodologique, de la plate-forme concernant l'élaboration de cartographies urbaines du NO₂ sur 6 grandes villes du domaine d'intervention d'AIRFOBEP. La plate-forme a pour but de permettre un suivi quotidien et automatisé de la pollution, pour les jours J, J+1 et J+2 (cartes prévues) ainsi qu'une carte pour le jour J-1 (carte analysée). Cette plate-forme fait suite à la plate-forme concernant la cartographie du NO₂ au niveau départemental.

Le fonctionnement de la plate-forme consiste en une interpolation géostatistique des simulations de Vigipol NO₂ départemental en intégrant une variable auxiliaire. Différentes variables auxiliaires ont été testées avant de retenir une variable auxiliaire à l'issue des tests : il s'agit d'une variable combinaison du cadastre des émissions NO_x et de la variable "Bâti+Axes routiers" fournie par AIRFOBEP. La technique de krigeage mise en œuvre est celle du krigeage avec dérive externe et la résolution choisie pour les cartographies a été fixée à 10m.

La plate-forme opérationnelle, son fonctionnement informatique, ainsi que les calculs statistiques qu'elle fournit, seront décrits ultérieurement.

■ Table des figures

Figure 1 : Concentration maximale journalière ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) simulée par Vigipol NO ₂ départemental (cycle J-1 avant analyse) sur la ville de Marignane pour la journée du 01/04/2009 (résolution 200m)	8
Figure 2 : Carte du cadastre des émissions brutes en NO _x (kg/an) par maille de 10m sur la ville de Marignane	9
Figure 3 : Carte de la variable "Bâti+Axes routiers" (résolution 10m) sur la ville de Marignane	10
Figure 4 : Carte de la variable "Bâti seul" (résolution 10m) sur la ville de Marignane	10
Figure 5 : Carte de la variable auxiliaire combinant cadastre d'émissions NO _x et variable "Bâti+Axes routiers" (résolution 10m) sur la ville de Marignane	11
Figure 6 : Carte de la variable auxiliaire combinant cadastre d'émissions NO _x et variable "Bâti seul" (résolution 10m) sur la ville de Marignane	12
Figure 7 : Concentration maximale journalière en NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009, interpolée par krigeage avec dérive externe avec la variable auxiliaire Bâti+Axes routiers	15
Figure 8 : Concentration maximale journalière en NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009, interpolée par krigeage avec dérive externe avec la variable auxiliaire Bâti+Axes routiers combinée aux émissions NO _x	15
Figure 9 : Concentration maximale journalière en NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009, interpolée par krigeage avec dérive externe avec la variable auxiliaire Bâti combinée aux émissions NO _x	16
Figure 10 : Concentration maximale journalière en NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) simulée par Vigipol NO ₂ départemental sur la ville de Salon de Provence pour la journée du 15/01/2009, en fonction de : a) la variable auxiliaire non transformée, et b) la racine 6 ^{ème} de la variable auxiliaire	17
Figure 11 : Concentration maximale journalière ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) simulée par Vigipol NO ₂ départemental (cycle J-1 avant analyse) sur la ville de Salon de Provence pour la journée du 20/01/2009 (résolution 200m)	19
Figure 12 : Concentration maximale journalière en NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) issue du krigeage avec dérive externe sur la ville de Salon de Provence pour la journée du 20/01/2009 (résolution 10m)	19
Figure 13 : Concentration maximale journalière en NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) issue du krigeage avec dérive externe sur la ville de Salon de Provence pour la journée du 20/01/2009 (résolution 40m)	20
Figure 14 : Concentration maximale journalière en NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009 simulée par Vigipol NO ₂ départemental (cycle J-1) a) avant analyse et b) après analyse	21
Figure 15 : Concentration maximale journalière en NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009, interpolée par krigeage avec dérive externe, puis analysée par krigeage des innovations (avec portée calculée automatiquement)	22
Figure 16 : Concentration maximale journalière en NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009, analysée par krigeage des innovations avec dérive externe	23
Figure 17 : Concentration maximale journalière en NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur l'agglomération de Marignane pour la journée du 01/04/2009, réalisée par krigeage des observations avec dérive externe	24
Figure 18 : Etapes de production des cartes de NO ₂ à l'échelle urbaine	26

■ Table des tableaux

Tableau 1 : Comparaison modèle/mesure pour la prévision de la concentration maximale journalière en NO ₂ (µg/m ³) par différents modèles à la station fixe MRGV sur une période de 15 jours	13
Tableau 2 : Comparaison modèle/mesure pour la prévision de la concentration maximale journalière en NO ₂ (µg/m ³) par différents modèles au moyen mobile MCIQ sur une période de 15 jours	14
Tableau 3 : Comparaison modèle/mesure pour l'analyse de la concentration maximale journalière en NO ₂ (µg/m ³) par différents modèles au moyen mobile MCIQ sur une période de 15 jours	25