



LABORATOIRE de MECANIQUE des FLUIDES et d'ACOUSTIQUE
UMR 5509

Ecole Centrale de Lyon
Université Claude Bernard - LYON I
Centre National de la Recherche Scientifique

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

Juillet 2008

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

TITREModélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la
Croix-Rousse**Rapport final**

Rédacteur(s)	Vérification	Approbation scientifique	Date de diffusion	Confidentialité	Révision
B. Farges	L. Soulhac	L. Soulhac	2008		B

TABLE DES MATIERES

1	Objet de l'étude	5
2	Description générale du modèle SIRANE	6
2.1	Bases du modèle SIRANE	6
2.2	Principales évolutions du modèle SIRANE	7
3	Description des données d'entrée et de la méthodologie utilisée	7
3.1	Choix de la zone géographique	8
3.2	Constitution du réseau de rues	10
3.3	Calcul des émissions liées au trafic	15
3.3.1	Calcul des émissions sur le réseau trafic	15
3.3.2	Modulation du trafic	15
3.3.3	Projection sur le réseau SIRANE	17
3.4	Données météorologiques du modèle SIRANE 2008	19
3.5	Analyse des données de pollution de fond et de proximité	22
3.5.1	Localisation des stations de mesure	22
3.5.2	Comparaison des deux capteurs de fond	24
3.5.3	Choix d'un autre capteur de fond	25
4	Présentation et validation des résultats pour les campagnes 2007-2008 sur le quartier de la Croix-Rousse	28
4.1	Comparaison des simulations et des mesures de capteur de proximité	28
4.1.1	Comparaison des séries temporelles pour la période de mai 2007	28
4.1.1.1	Dioxyde d'azote	28
4.1.1.2	Particules	31
4.1.2	Comparaison des séries temporelles pour la période d'août 2007	33
4.1.2.1	Dioxyde d'azote	33
4.1.2.2	Particules	36
4.1.3	Comparaison des séries temporelles pour la période de novembre 2007	38
4.1.3.1	Dioxyde d'azote	38
4.1.3.2	Particules	41
4.1.4	Comparaison des séries temporelles pour la période de janvier 2008	42
4.1.4.1	Dioxyde d'azote	42
4.1.4.2	Particules	45
4.1.5	Comparaison sur des paramètres statistiques	47
4.2	Comparaison des simulations et des mesures de tubes passifs pour le dioxyde d'azote	54
5	Calcul des cartes de champs de concentration sur le quartier de la Croix-Rousse	56
5.1	Campagne de mai 2007	57
5.1.1	Dioxyde d'azote	57
5.1.2	Particules	60
5.2	Campagne d'août 2007	62
5.2.1	Dioxyde d'azote	62
5.2.2	Particules	63
5.3	Campagne de novembre 2007	65
5.3.1	Dioxyde d'azote	65
5.3.2	Particules	66

5.4	Campagne de janvier 2008	68
5.4.1	Dioxyde d'azote	68
5.4.2	Particules	70
5.5	Cartographies annuelles	72
5.5.1	Dioxyde d'azote	72
5.5.2	Particules	73
6	Conclusion	75
7	Bibliographie	76

1 OBJET DE L'ETUDE

Dans le cadre de la surveillance de la qualité de l'air sur la colline Croix-Rousse, COPARLY a sollicité l'Ecole Centrale de Lyon pour faire évoluer son logiciel de modélisation SIRANE afin de l'adapter aux spécificités de cette zone à relief. Ces travaux de modélisation ont été confiés au Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA).

L'objectif de cette étude est de modéliser heure par heure la pollution atmosphérique due au trafic routier à l'échelle de la rue dans le quartier à partir de données obtenues en 2007 et 2008, ainsi que sur une projection de l'évolution de ces données à l'horizon 2013. Les polluants traités comprennent le dioxyde d'azote et les particules. Les résultats de la modélisation seront comparés à des mesures de terrain réalisées par COPARLY.

Cette étude comprend trois grandes étapes :

- L'apport d'évolutions au modèle SIRANE, permettant de modéliser la pollution en présence de relief.
- La constitution d'une base de données d'entrée nécessaires au fonctionnement du modèle SIRANE et l'analyse des données de pollution de fond mesurées à proximité de l'agglomération ou au sein de celle-ci.
- L'application du modèle sur le quartier de la Croix-Rousse, la comparaison des résultats avec les données de terrain, et la production de cartographies de concentrations moyennes et de percentiles 98 sur les périodes d'étude concernées.

2 DESCRIPTION GENERALE DU MODELE SIRANE

2.1 BASES DU MODELE SIRANE

Le modèle SIRANE est développé au Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique de l'Ecole Centrale de Lyon. Les travaux de recherche qui ont conduit au développement de ce modèle ont été réalisés dans le cadre de la thèse de doctorat de Lionel Soulhac (2000). Nous ne présentons ici qu'une description générale du modèle et de ses applications.

Le modèle SIRANE est un modèle de dispersion atmosphérique en milieu urbain à l'échelle d'un quartier (échelle de l'ordre du kilomètre). Il permet de décrire les concentrations en polluants dans des zones constituées essentiellement de rues bordées de bâtiments. Le modèle SIRANE couvre une échelle spatiale située entre l'échelle de la rue, où l'on s'intéresse plutôt à la répartition des polluants à l'intérieur même de cette rue, et l'échelle de l'agglomération, où il n'est plus possible de modéliser explicitement l'effet de chaque bâtiment. Il permet donc de fournir une cartographie de la pollution à l'échelle d'un quartier.

D'un point de vue temporel, SIRANE est adapté à des échelles caractéristiques de l'ordre de l'heure. Le modèle SIRANE traite différents types d'émissions à l'aide de sources linéiques (représentant par exemple une voie de circulation) et de sources ponctuelles (par exemple une cheminée) ou encore surfaciques (issues d'un cadastre d'émissions).

Le modèle SIRANE permet de prendre en compte les principaux effets qui agissent sur la dispersion des polluants à l'échelle d'un quartier :

- Phénomènes de rue-canyon (confinement des polluants entre les bâtiments)
- Echange des polluants au niveau des carrefours
- Transport des polluants au dessus des toits
- Prise en compte des caractéristiques du vent extérieur (vitesse, direction, turbulence, stabilité thermique)
- Modélisation de transformations chimiques simples (cycle de Chapman NO, NO₂, O₃)
- Modélisation de la dispersion des particules
- Modélisation du lessivage par les précipitations

SIRANE utilise des modèles théoriques et des formulations simplifiées des différents phénomènes. Il est donc adapté au traitement d'un grand nombre de rues dans un temps de calcul très limité.

Les applications du modèle concernent l'étude des conséquences de la pollution atmosphérique en milieu urbain :

- Cartographie de la pollution à l'échelle d'un quartier, en complément des mesures
- Détermination de la représentativité des capteurs
- Evaluation de l'exposition de la population

- Impact de nouveaux aménagements urbains, de plans de déplacement ou de politiques de réduction des émissions
- Prévion de la pollution

2.2 PRINCIPALES EVOLUTIONS DU MODELE SIRANE

La colline de la Croix-Rousse est caractérisée par un relief marqué et, contrairement aux parties plates de la ville de Lyon précédemment modélisées, l'hypothèse d'un champ de vent homogène à l'échelle du domaine d'étude est ici difficilement applicable. Il en est de même dans le cas d'un domaine géographique plus étendu, à l'échelle d'une agglomération.

Le modèle SIRANE a donc été modifié afin de calculer la dispersion des polluants au sein d'un champ météorologique non uniforme, tout en conservant la prise en compte des phénomènes physiques énoncés précédemment.

3 DESCRIPTION DES DONNEES D'ENTREE ET DE LA METHODOLOGIE UTILISEE

Les données d'entrée nécessaires au fonctionnement du modèle peuvent être regroupées dans les catégories suivantes :

- Le réseau des rues interconnectées comprenant les caractéristiques géométriques de ces dernières (largeur et hauteur moyenne)
- L'évolution horaire et spatiale des variables météorologiques (vitesse et direction du vent, température, précipitations...)
- L'évolution horaire des données d'émissions provenant de sources surfaciques via le cadastre d'émissions, de sources linéiques comme les voies de circulation ou de sources ponctuelles
- L'évolution horaire du niveau de pollution de fond, après détermination d'un capteur de fond adéquat

Des mesures de pollution de proximité ont également été fournies. Ces dernières seront utilisées à des fins de comparaison avec les sorties du modèle. Ces différentes données sont décrites plus en détail dans les paragraphes suivants.

3.1 CHOIX DE LA ZONE GEOGRAPHIQUE

Dans le cadre d'une première étude SIRANE menée sur les parties "plates" de la ville de Lyon en juillet 2004, un premier réseau de rues a été constitué, recouvrant le 3^{ème} arrondissement, le 6^{ème}, le 7^{ème}, le 8^{ème}, la presqu'île jusqu'à la place des Terreaux, et Villeurbanne. Ce réseau a été pris comme base afin d'être étendu aux arrondissements restants, soit le 4^{ème}, le 5^{ème} et le 9^{ème}, ainsi que sur les communes limitrophes en tenant compte de la densité du bâti (cf. Figure 4). Cette zone d'étude générale est délimitée par le tracé noir sur la carte ci-dessous (Figure 1). Elle s'étend sur une zone de 15 km par 15 km et recouvre 32 communes du Grand Lyon, dont 8 communes dans leur intégralité.



Figure 1 : Domaine étendu choisi pour la construction du réseau SIRANE (contour noir). Les coordonnées du domaine en UTM31 sont $X_{min} = 636409$; $Y_{min} = 5060577$; $X_{max} = 651409$; $Y_{max} = 5075577$.



Figure 2 : Domaine d'étude de la figure précédente visualisé sous Google Earth

La portion du domaine correspondant à la colline de la Croix-Rousse a ensuite été sélectionnée comme domaine de travail (Figure 3).



Figure 3 : Visualisation de la zone d'étude restreinte au quartier Croix-Rousse sous Google Earth. Les coordonnées du domaine en UTM31 sont $X_{min} = 640066$; $Y_{min} = 5069611$; $X_{max} = 643566$; $Y_{max} = 5071611$, soit 3.5km par 2km.

3.2 CONSTITUTION DU RESEAU DE RUES

Le réseau de rues (appelé désormais réseau SIRANE 2008) a été constitué sur la zone d'étude générale présentée Figure 1, et couvrant un large domaine de l'agglomération lyonnaise. Il s'appuie naturellement sur le réseau SIRANE déjà constitué et utilisé au sein de COPARLY de manière opérationnelle (Figure 4).

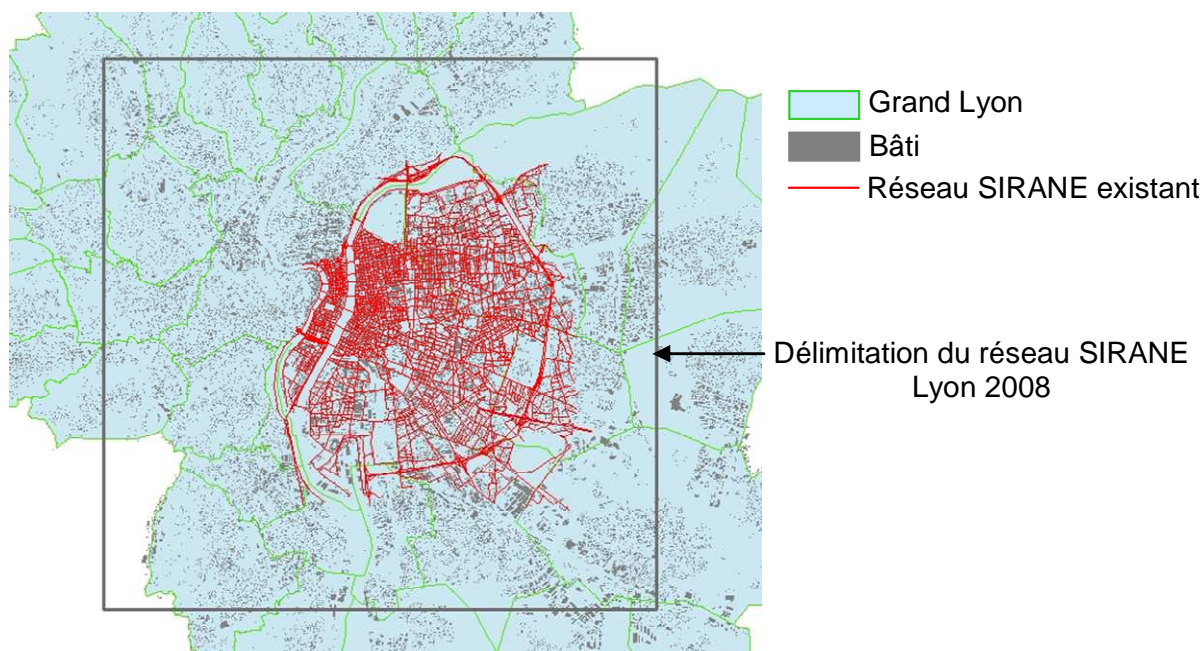


Figure 4 : Localisation du réseau SIRANE existant (2007) au sein du domaine d'étude 2008.

La construction du réseau SIRANE 2008 s'est donc effectuée selon 3 critères :

- Conserver le réseau SIRANE existant (désormais appelé réseau SIRANE 2007)
- Créer un réseau "Extension" couvrant le reste du domaine d'étude
- Fusionner les deux réseaux

Tout comme pour le réseau SIRANE 2007, la construction du réseau Extension s'est faite à partir de deux systèmes de réseau : le réseau du modèle de trafic et le réseau viaire du Grand Lyon. Toutefois, étant donné l'étendue du réseau viaire sur le domaine d'étude, et le nombre important de brins engendrés, une nouvelle méthodologie a été retenue pour la création du réseau Extension. En effet, celui-ci consiste en un couplage entre le réseau viaire et le réseau trafic.

Le réseau trafic étant celui portant les émissions linéiques, l'objectif du réseau Extension est d'être le plus proche possible de ce réseau trafic afin de limiter au maximum les imprécisions dues à la projection des émissions sur le réseau final :

- Dans les zones de bâti dense, le réseau Extension se confond avec le réseau viaire afin de prendre en compte le détail des rues.
- Dans les zones de bâti diffus, dans lesquelles les rues ont peu tendance à confiner la pollution, le réseau Extension sera confondu avec le réseau trafic.

Une fois le réseau Extension construit, celui-ci est fusionné au réseau SIRANE 2007 par juxtaposition. Les liaisons à la frontière des deux réseaux ont été ajustées "à la main".

Le diagramme suivant présente les différentes étapes suivies pour construire le réseau de rues.

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

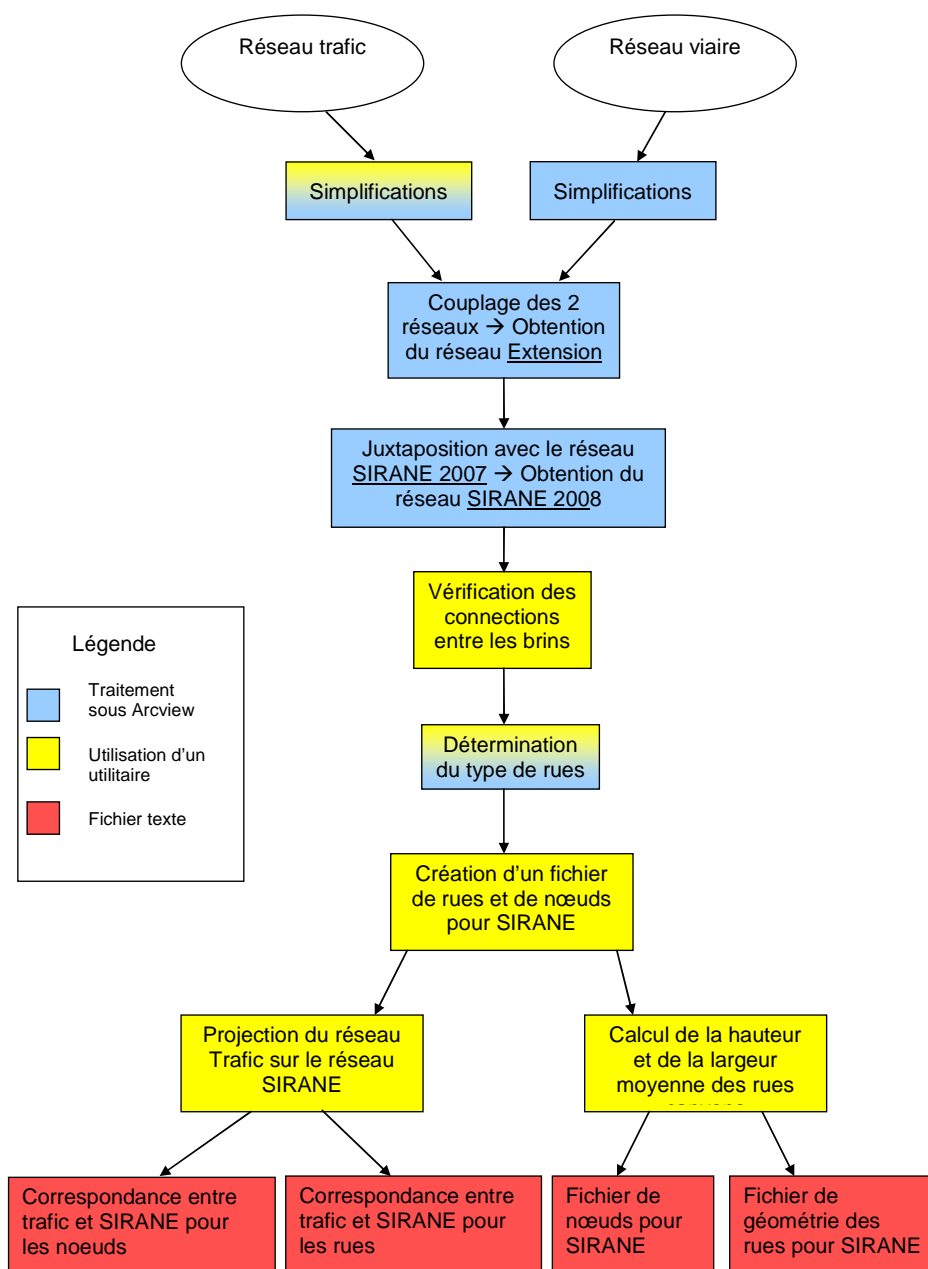


Figure 5 : Diagramme des étapes de la construction du réseau de noeuds et de rues pour SIRANE

Au cours de ces différentes étapes de création du réseau, les corrections nécessaires ou les difficultés rencontrées inhérentes à ces opérations (brins doubles, brins courbes, présence de terre-plein, de contre-allées) sont similaires à celles rencontrées au cours de l'étude SIRANE de juillet 2004 (Soulhac, Rios, 2004).

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

Une fois le réseau SIRANE constitué, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques géométriques de chaque rue afin de modéliser correctement le confinement des polluants entre les bâtiments. Deux types de géométrie sont distingués : le type « canyon » qui correspond à une situation de confinement et qui comprend nécessairement des brins bordés de bâtiments des 2 côtés, et le type « ouvert » qui regroupe les brins en zone dégagée (place larges, rues non bordées ou bordées d'un seul côté...).

Pour les rues bordées de bâtiments des deux côtés, une nouvelle sélection est effectuée à partir des caractéristiques géométriques des rues (largeur et hauteur moyenne...). La largeur moyenne est obtenue à partir de la distance moyenne qui sépare le brin symbolisant la rue de la façade des bâtiments. (On effectue ce calcul de part et d'autre du brin). La porosité moyenne, définie par la fraction de rue non bordée de bâtiments, est également calculée de chaque côté du brin. Ces différentes étapes sont réalisées principalement à l'aide d'utilitaires du logiciel SIRANE.

Finalement, le caractère « canyon » ou « ouvert » d'une rue est déterminé en fonction des critères suivants :

- Les rues présentant une hauteur moyenne nulle à gauche ou à droite seront considérées comme ouvertes (cas d'une rue semi-bordée).
- Les rues présentant une porosité supérieure à un certain seuil (ici pris égal à 0.6) à gauche ou à droite seront considérées comme ouvertes.
- Les rues présentant un rapport entre leur largeur et leur hauteur supérieur à un certain seuil (ici $W/H > 3.5$) seront considérées comme ouvertes.

On distingue également un troisième type de brin, appelé "brin tunnel", correspondant aux différents tunnels présents dans le domaine d'étude.

On obtient ainsi les fichiers d'entrée de données géographiques pour SIRANE. Cette sélection est alors validée et affinée par une comparaison des résultats (visualisés grâce à un logiciel SIG) avec les photos aériennes disponibles.

Le réseau obtenu compte finalement 10820 rues dont 3835 de type "canyon" (soit 35.5%) et 6985 de type "ouvert". On décompte également 38 brins de type "tunnel". Les Figure 6 et 7 montrent la répartition des rues du réseau. On notera que les rues de type "ouvert" prédominent largement dès que l'on s'éloigne du centre ville.



Figure 6 : Réseau de rues SIRANE, les brins bleus représentent les rues ouvertes, les brins rouges les rues canyons, et les brins verts les tunnels

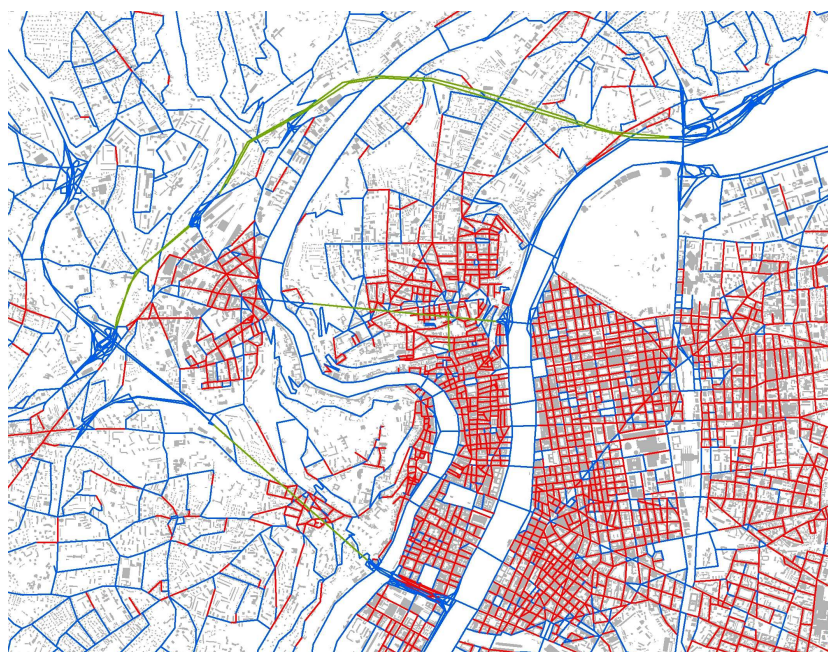


Figure 7: Vue du réseau de rues SIRANE sur le centre-ville lyonnais.

Enfin, un dernier utilitaire calcule la correspondance géométrique entre les rues du réseau de trafic et les rues du réseau SIRANE. En effet, les données d'émissions étant calculées sur le réseau de trafic, on a besoin de connaître les correspondances entre les deux réseaux pour avoir les émissions sur le réseau SIRANE. Pour chaque brin du réseau SIRANE, on attribue un coefficient lié à la projection géométrique du ou des brins trafic les plus proches. Par la suite, lors du calcul des émissions, les émissions sur le réseau trafic seront recalculées sur le réseau SIRANE via ces coefficients. Le détail de cette étape est donné au paragraphe 3.3.

3.3 CALCUL DES EMISSIONS LIEES AU TRAFIC

3.3.1 CALCUL DES EMISSIONS SUR LE RESEAU TRAFIC

Le calcul des émissions issues du trafic routier est un point essentiel de la mise en œuvre du modèle SIRANE. C'est aussi un des points les plus sensibles compte tenu de la difficulté à évaluer le trafic routier et le parc automobile.

Le calcul des émissions du trafic moyen journalier annuel a été réalisé par COPARLY en utilisant la méthodologie COPERT IV qui repose sur l'utilisation de lois empiriques d'évolution des émissions en fonction de la vitesse des véhicules. Ces lois sont spécifiées pour un grand nombre de classes, correspondant à différents types de véhicules, de carburants, de motorisations, de générations technologiques. Le parc automobile utilisé dans l'implémentation de la méthodologie COPERT IV correspond à l'année 2007 (ou à une projection sur l'année 2013 pour les scénarios prospectifs).

3.3.2 MODULATION DU TRAFIC

Le trafic routier évolue suivant l'heure de la journée, le jour de la semaine et le mois de l'année. Il faut donc considérer le débit de véhicules adéquat à chaque pas de temps simulé par SIRANE. La Figure 8 présente la courbe de la modulation journalière qui s'applique au trafic. Les Figures 9 et 10 représentent les courbes de modulation hebdomadaire et mensuelle.

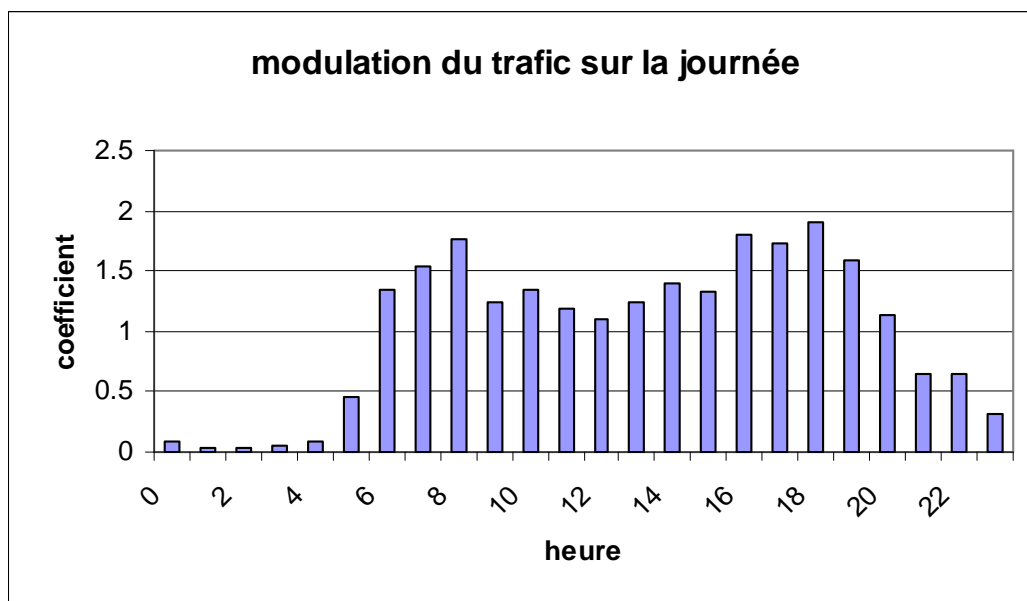


Figure 8 : Modulation horaire du trafic.

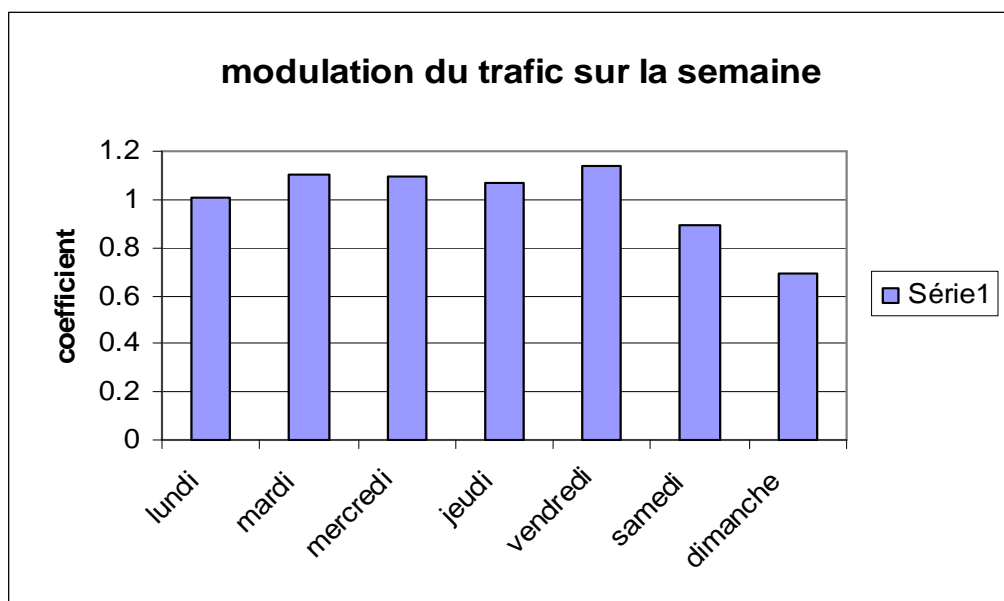


Figure 9 : Modulation hebdomadaire du trafic

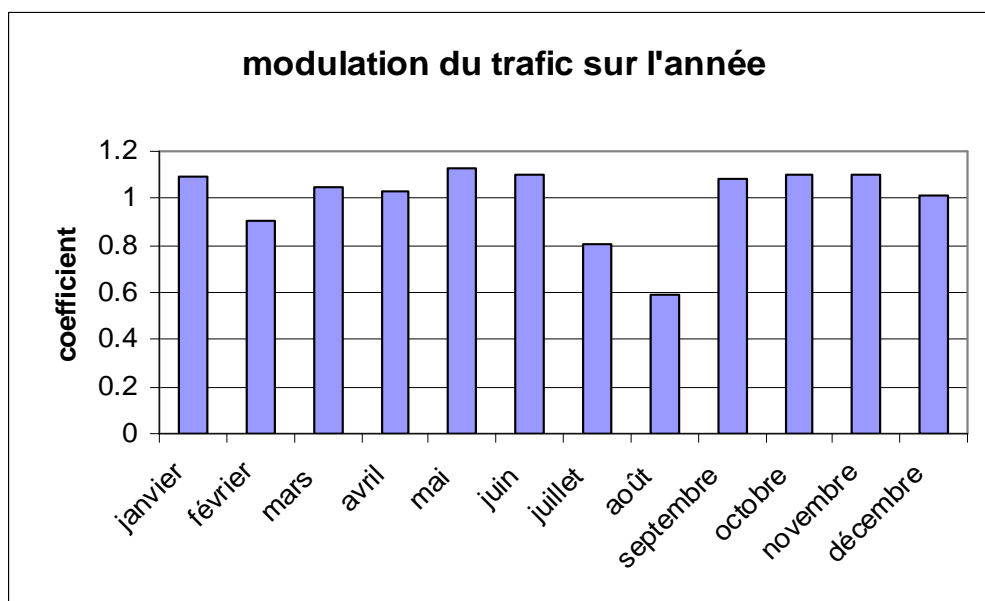


Figure 10 : Modulation mensuelle du trafic

Pour toutes les heures de l'année, on calcule donc un coefficient de modulation qui est le produit de convolution des trois modulations. Le coefficient de modulation à l'heure h , pour le jour de la semaine j , du mois m , est donné par :

$$C(j,m,h)=c(j)*c(m)*c(h), \text{ } j \text{ étant compris entre } 1 \text{ et } 7, m \text{ entre } 1 \text{ et } 12 \text{ et } h \text{ entre } 0 \text{ et } 23.$$

Ainsi, il est possible de reconstruire le trafic d'une année entière (débit de véhicule) à partir de la répartition du trafic à une heure donnée (débit de véhicule sur chaque brin à une heure de référence pour un des jours-type) et des coefficients de modulation précédemment déterminés.

Cependant, ce calcul de la modulation implique deux fortes hypothèses :

- La modulation appliquée est la même sur tous les brins. Pour être plus proche de la réalité, une modulation par brin aurait été plus adaptée afin de tenir compte des effets locaux de la circulation ou d'éventuels reports de trafic. Mais une modulation horaire sur chacun des brins du réseau se serait avérée trop lourde à mettre en place.
- La modulation est appliquée directement aux émissions, sans tenir compte de l'effet sur la vitesse des véhicules (une baisse de trafic pouvant engendrer une augmentation de la vitesse moyenne des véhicules, par exemple).

3.3.3 PROJECTION SUR LE RESEAU SIRANE

Les émissions ont été calculées sur le réseau trafic. Pour projeter ces émissions sur le réseau SIRANE, on utilise deux utilitaires :

- Le premier utilitaire crée un fichier de correspondance entre le réseau de trafic et le réseau SIRANE (comme présenté Figure 5).
- Le deuxième utilitaire projette les émissions sur le réseau SIRANE à partir du fichier de correspondance entre le réseau de trafic et le réseau SIRANE et des émissions sur les brins trafic.

Le résultat de ces utilitaires est un ensemble de fichiers, contenant les émissions sur chacun des brins SIRANE pour chaque polluant.

A titre d'illustration, les répartitions des émissions de NO_x normalisées par la longueur des rues sont représentées sur les figures suivantes (11 et 12). Ces émissions sont présentées dans le cas d'un tunnel ouvert.

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

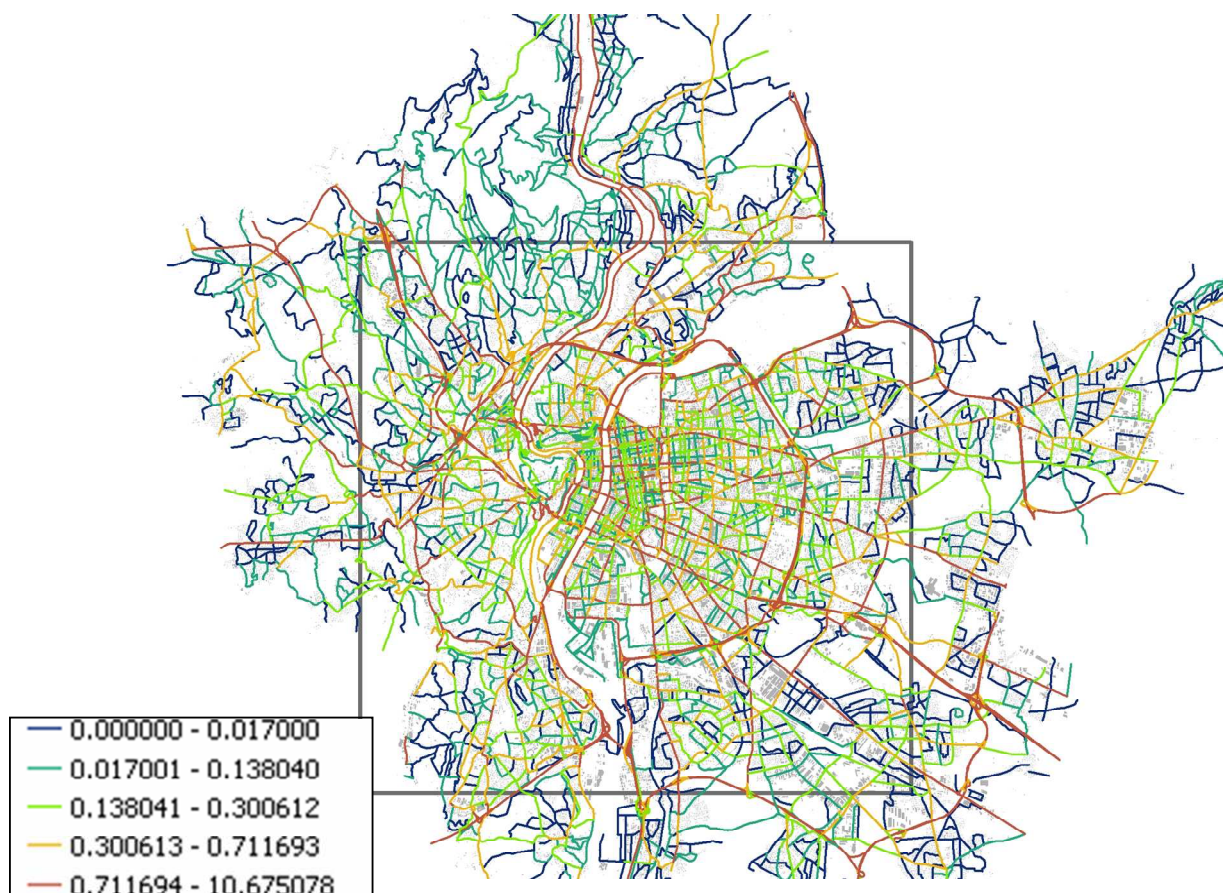


Figure 11 : Carte des émissions moyennes annuelles de NO_x en g.h⁻¹.m⁻¹.

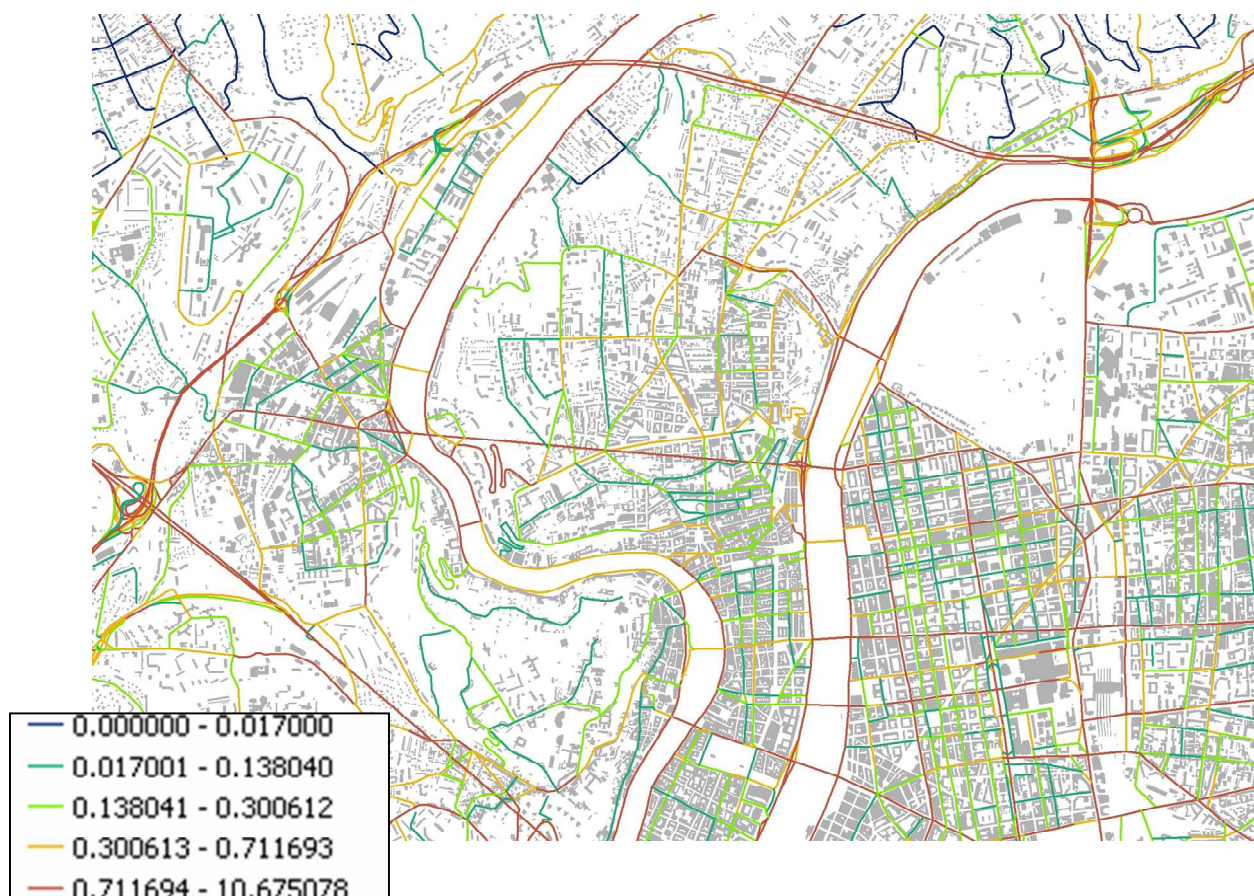


Figure 12 : Carte des émissions moyennes annuelles de NO_x en $\text{g.h}^{-1}.\text{m}^{-1}$, détail du centre ville.

3.4 DONNEES METEOROLOGIQUES DU MODELE SIRANE 2008

La modélisation de la dispersion atmosphérique en milieu urbain nécessite la connaissance de différents paramètres météorologiques, notamment la vitesse du vent à l'extérieur de la canopée urbaine et les conditions de stratification thermique de l'atmosphère (température, nébulosité...). Ces paramètres sont fournis par des mesures ponctuelles de terrain. Cependant, comme il a été précisé, l'hypothèse d'un champ météorologique homogène, applicable à l'échelle d'un quartier, devient limitante sur un domaine étendu comme notre domaine d'étude, particulièrement quand celui-ci est caractérisé par la présence de relief (Figure 13).

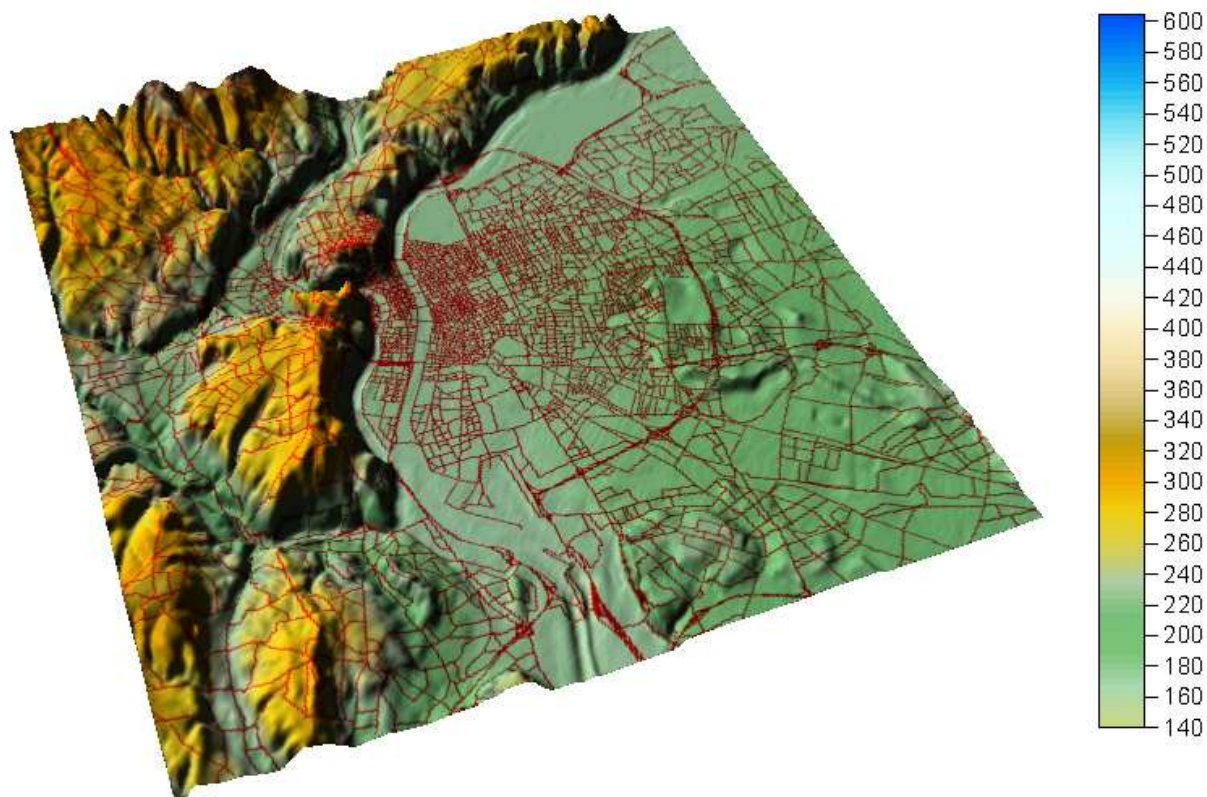


Figure 13 : Visualisation des variations de relief au sein du domaine d'étude

Il a donc été décidé que COPARLY fournirait au LMFA un champ de données météorologiques sur l'ensemble du domaine, issues du modèle CALMET. Ce champ, constitué de mailles de 300m de côté, sur quatre altitudes (0m, 20m, 25m, 30m) (comme illustré Figure 14 et 15) permet d'obtenir une variation à la fois spatiale et temporelle des données.

Les données météorologiques par mailles utilisées dans SIRANE et communiquées via CALMET sont :

- Les composantes U_x et U_y du champ de vitesse à une altitude $z = 30\text{m}$
- La température T
- La longueur de Monin-Obukhov L_{MO}
- La hauteur de couche limite H_{CLA}
- La classe de stabilité
- La vitesse de frottement u_*

On dispose également des données de précipitation et de nébulosité issues du capteur météorologique de Bron. Ces données varient peu sur les distances caractéristiques de l'étude, on peut les considérer comme homogènes sur le domaine.

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

A partir de ces données, le calcul d'autres grandeurs météorologiques ou turbulentes est possible, tels les écarts-type de vitesse (σ_u , σ_v , σ_w), le temps lagrangien T_{Lz} , l'échelle de vitesse des mouvements de convection thermique w^* , et la fréquence N de flottabilité de Brunt-Väisälä.

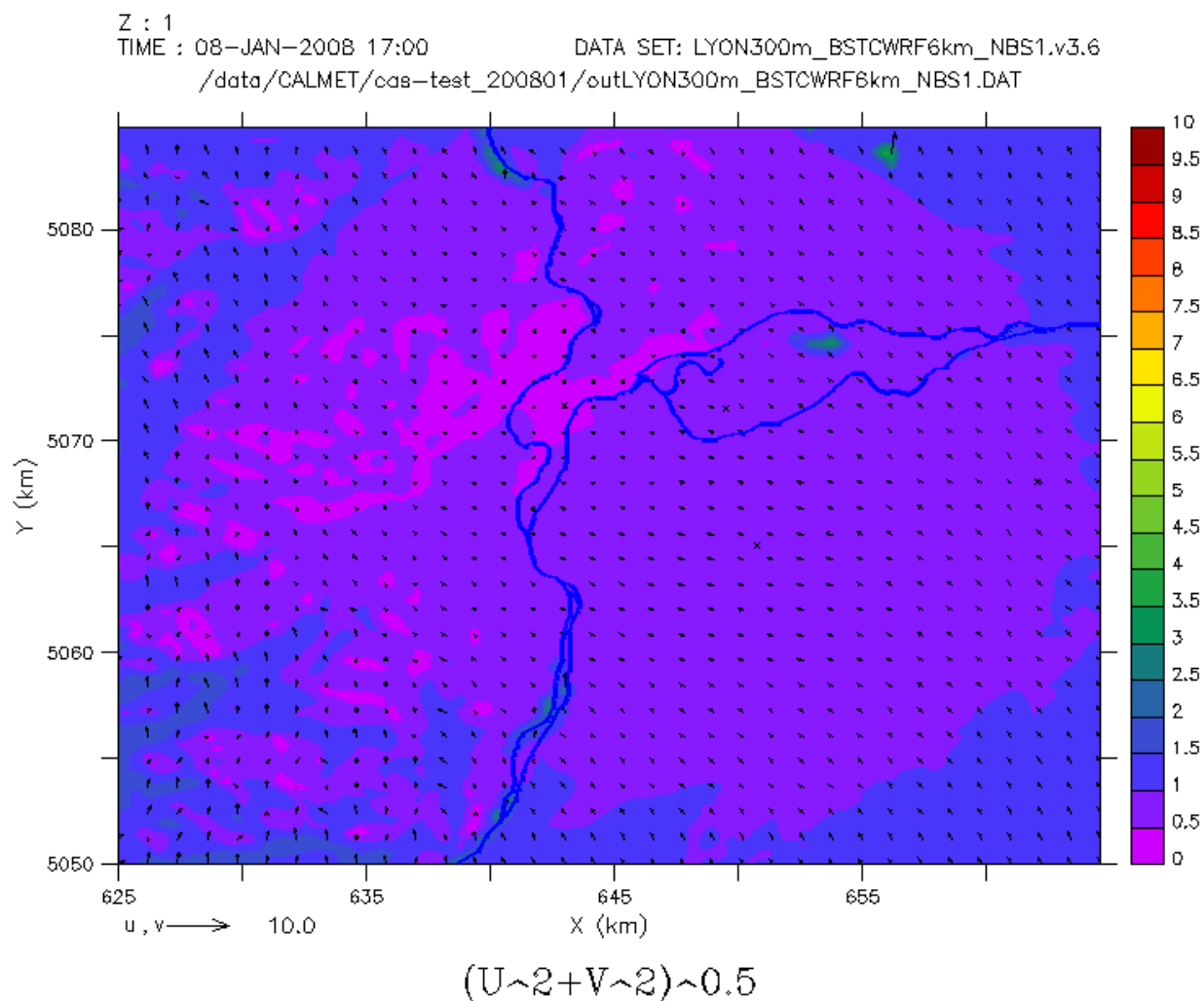


Figure 14 : Exemple de cartographie du champ de vitesse à $z = 20m$ issu du modèle CALMET. La date de simulation est le 08 janvier 2008 à 17h.

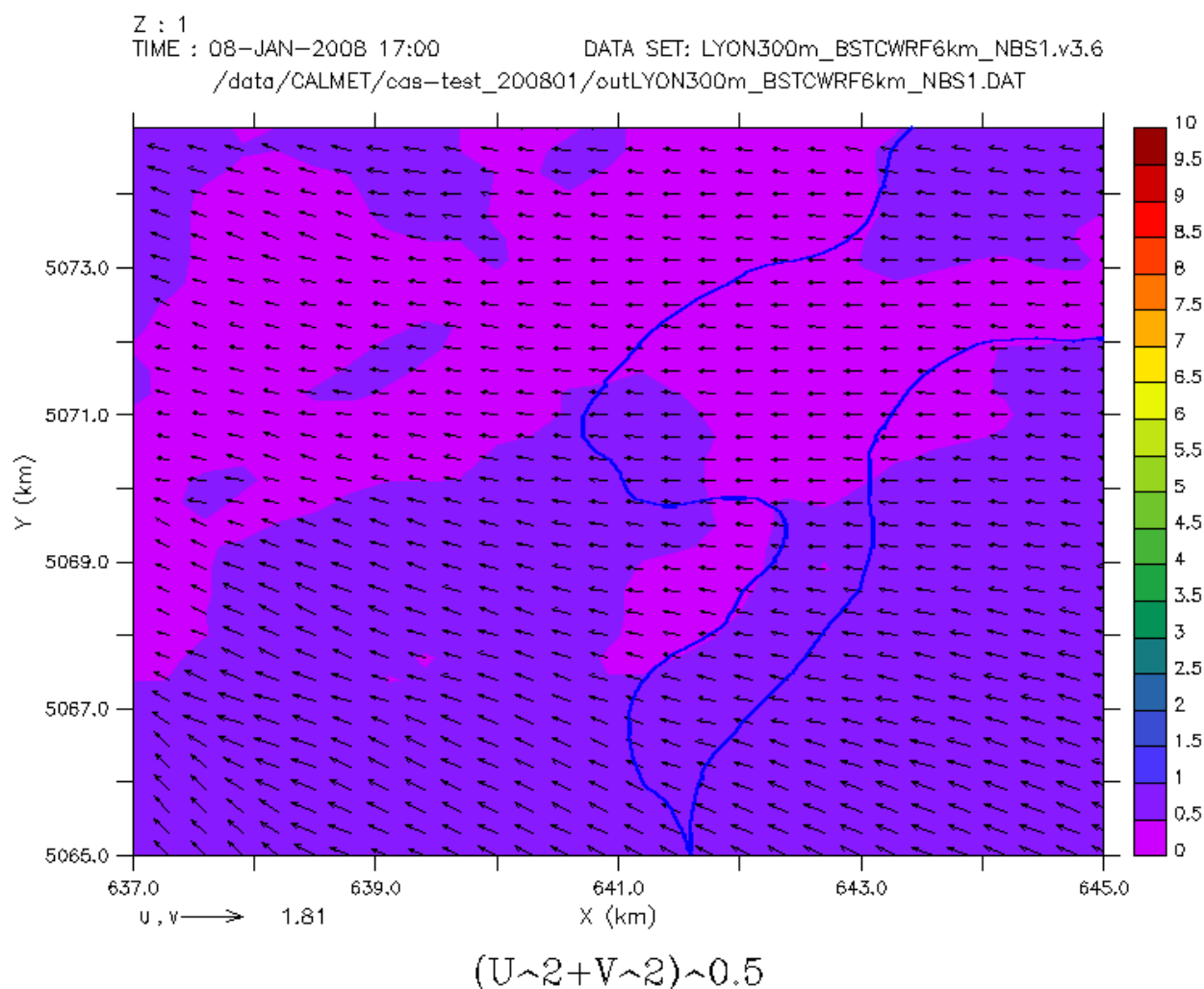


Figure 15 : Zoom du champ de vitesse à $z = 20\text{m}$ sur la ville de Lyon.

3.5 ANALYSE DES DONNEES DE POLLUTION DE FOND ET DE PROXIMITE

3.5.1 LOCALISATION DES STATIONS DE MESURE

Afin de connaître l'impact du trafic routier sur une zone particulière, il est nécessaire de déterminer le niveau de pollution de fond qui lui est propre. La pollution de fond peut être générée par le trafic à l'extérieur de la zone ou provenir d'autres sources (industries, etc...). Les niveaux de pollution de fond sont estimés à partir de mesures effectuées par des capteurs positionnés de manière spécifiques. En général, leur emplacement est choisi de façon à ce qu'ils soient situés en zone urbaine tout en restant éloignés du trafic. Des cours d'immeubles ou d'école constituent des lieux privilégiés pour leur implantation.

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

Les données mises à notre disposition proviennent de 2 stations de fond, située à Lyon Centre et Vaulx-en-Velin. La Figure 16 mentionne la position des différents capteurs, la nature des mesures effectuées et les polluants concernés en rapport avec notre étude.

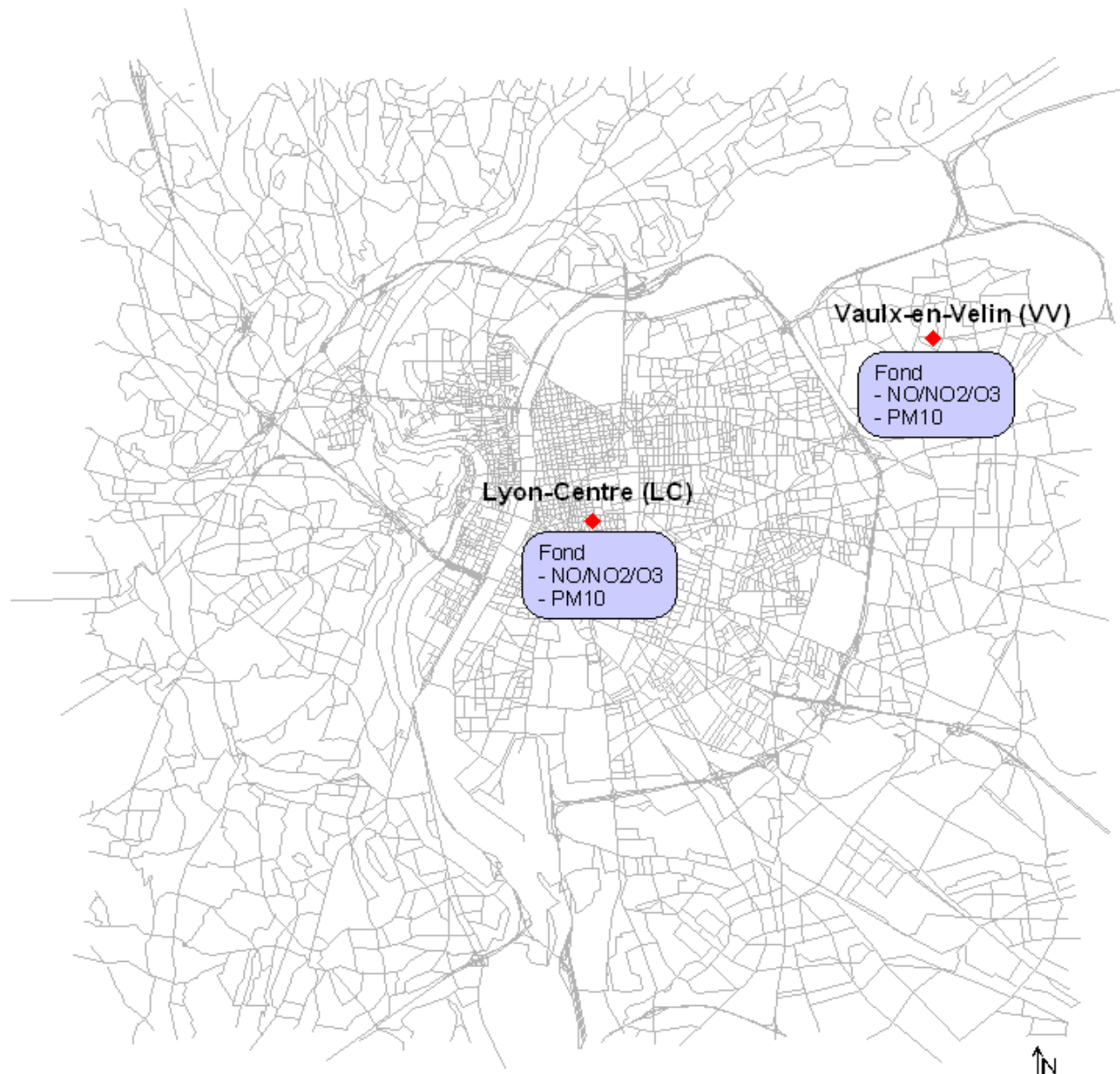


Figure 16 : Position et caractéristiques des capteurs de fond

Les mesures de proximité proviennent de trois moyens mobiles situés dans le quartier de la Croix-Rousse sur les sites IUFM Nord, IUFM Sud et Providence. Les mesures sont effectuées à 3m au-dessus du niveau du sol. Elles sont complétées par une station de proximité située à l'emplacement Vaise-Marietton.

En outre, les observations permanentes ont été complétées par des campagnes de mesures ponctuelles par tubes concernant les concentrations de NO_2 et de C_6H_6 . L'ensemble des données de proximité fera l'objet d'un traitement ultérieur.

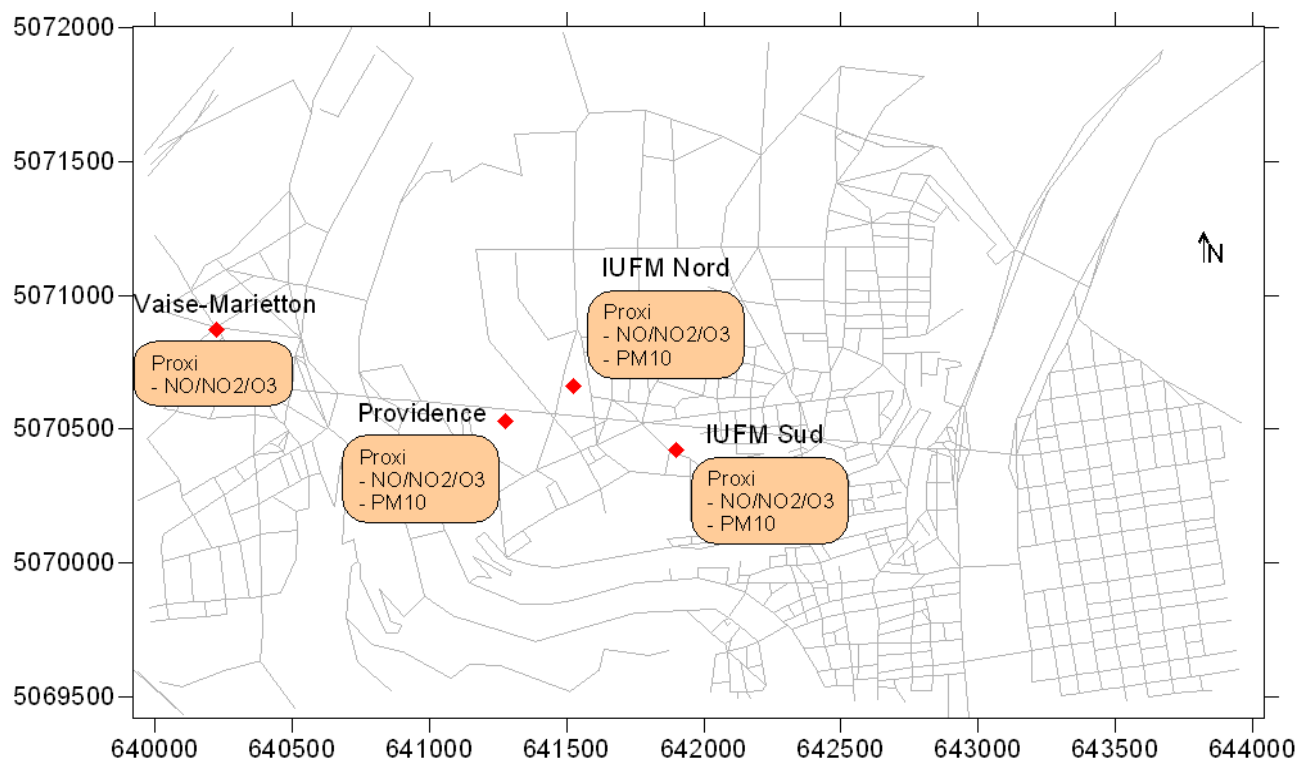


Figure 17 : Localisation des quatre stations de mesure de proximité

3.5.2 COMPARAISON DES DEUX CAPTEURS DE FOND

Le calcul de la concentration effectué par le modèle SIRANE prend en compte la concentration de fond, et ajoute la contribution due à la dispersion des émissions (ponctuelles, linéiques et surfaciques), cette concentration de fond étant supposée uniforme sur l'ensemble du domaine d'étude. Il est donc nécessaire de choisir un capteur de fond comme représentatif de la concentration de fond à l'échelle du domaine étudié.

La comparaison des deux capteurs Lyon-Centre et Vaulx-en-Velin montre une nette différence entre les valeurs moyennes de concentration. En effet, le capteur Lyon-Centre mesure une concentration moyenne sur les quatre campagnes supérieure ($38.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) à celle de Vaulx-en-Velin ($27.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), et supérieure 72.3% du temps en valeurs horaires (exemple pris pour le NO_2). La Figure 18 illustre cette différence. Le choix s'est donc initialement porté sur le capteur Vaulx-en-Velin, semblant moins influencé par les effets de trafic, et déjà utilisé pour les précédentes études SIRANE.

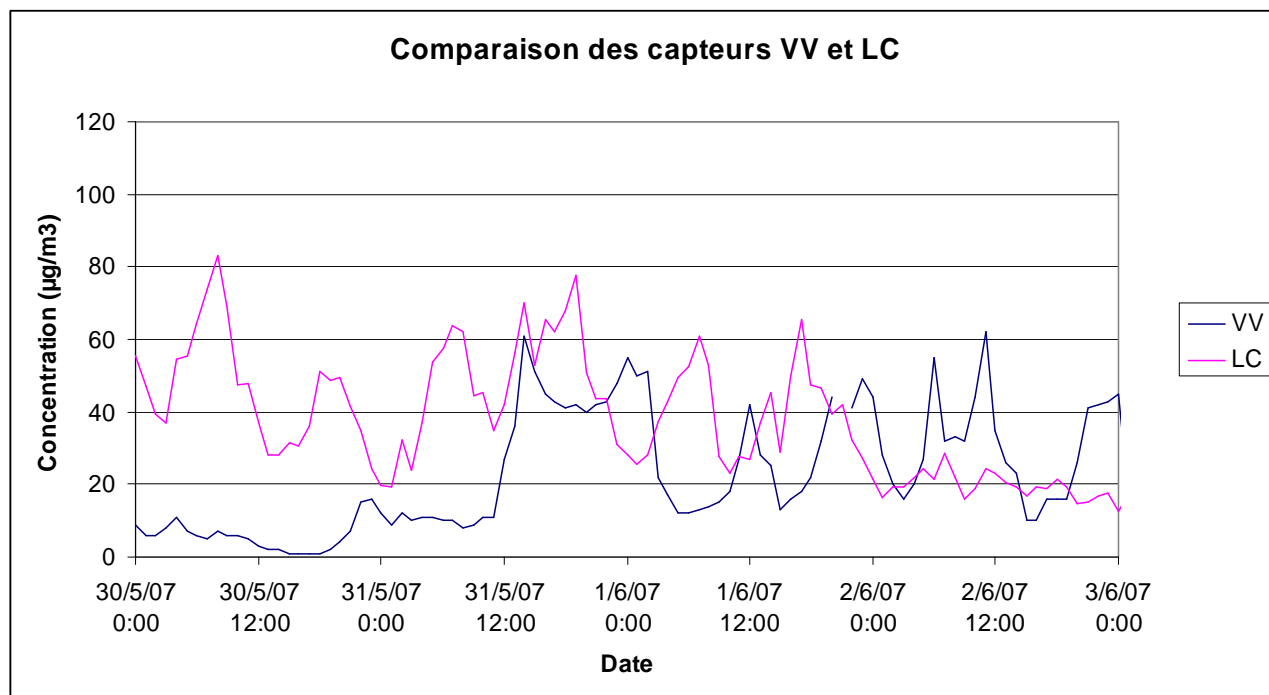


Figure 18 : Comparaison des valeurs mesurées aux capteurs de fond Vaulx-en-Velin (VV) et Lyon-Centre (LC) dans la période du 30 mai 2007 au 03 juin 2007 pour le NO_2

3.5.3 CHOIX D'UN AUTRE CAPTEUR DE FOND

Comme il a été dit précédemment, le modèle SIRANE s'appuie sur la donnée de concentration de fond fournie par le capteur adéquat, et y ajoute la contribution des émissions après dispersion de celles-ci. Il est donc crucial que la donnée de concentration de fond choisie soit bien représentative de la situation sur le domaine étudié.

Or la comparaison des valeurs de fond de Vaulx-en-Velin et des mesures de proximité obtenues par les moyens mobiles sur le plateau de la Croix-Rousse montre un dépassement fréquent et conséquent de la mesure par le fond. La Figure 19 montre ce dépassement sur une période d'une douzaine d'heures, et le Tableau 1 synthétise les moyennes aux deux capteurs ainsi que le taux de dépassement de la mesure par le fond sur l'année pour le NO_2 .

On remarque que les valeurs de fond urbain à Vaulx-en-Velin et de proximité sur le plateau de la Croix-Rousse sont assez proches (10% d'écart sur l'année pour les moyennes, avec un minimum de 1.5% d'écart pour les moyennes de mai 2007) alors qu'en toute rigueur, le fond devrait être significativement inférieur aux mesures. De même, le taux de dépassement de la mesure par le fond est de 38.8% sur l'ensemble des campagnes, soit plus d'un tiers du temps.

Il ressort de cette comparaison que le capteur de fond de Vaulx-en-Velin (et a fortiori celui de Lyon-Centre d'après le paragraphe 3.5.2) n'est pas représentatif de la pollution de fond sur le plateau de la Croix-Rousse. Les résultats du modèle SIRANE étant toujours strictement supérieurs à la concentration de fond choisie, utiliser l'un ou l'autre de ces capteurs pour notre étude reviendrait à introduire une forte erreur de surestimation des mesures avant même le début du calcul.

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

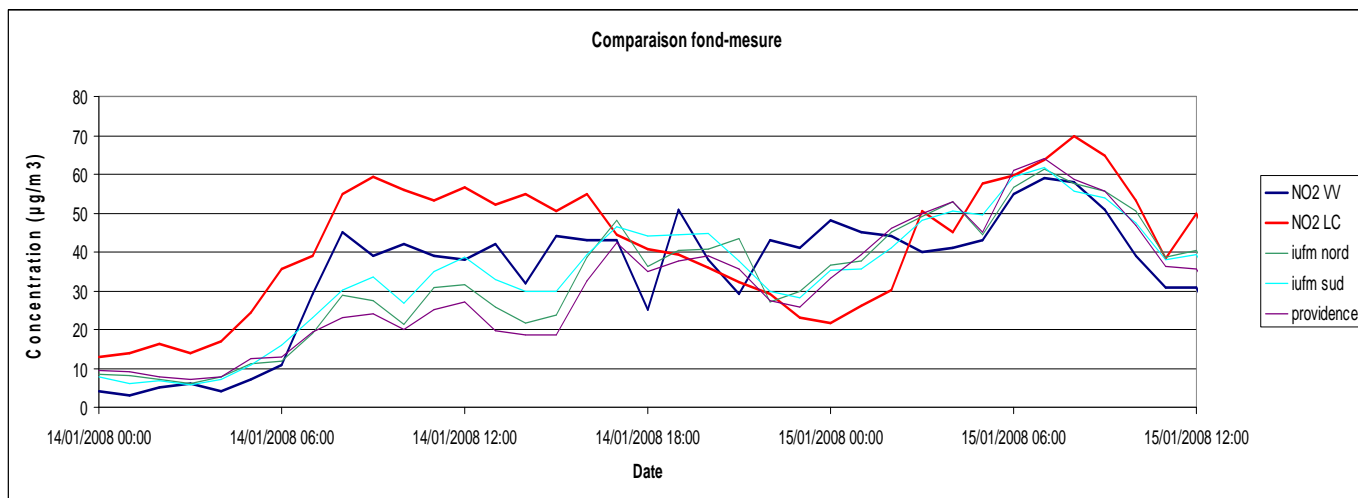


Figure 19 : Comparaison des données de concentration de fond issues des deux capteurs VV et LC par rapport aux mesures de proximité issues des moyens mobiles pour le NO₂, sur une période de 36h.

	Fond VV NO ₂	Mesure IUFM_nord NO ₂	Taux de dépassement
Moyenne 05-2007	21.18	21.54	46.75
Moyenne 08-2007	18.20	18.37	40.47
Moyenne 11-2007	33.30	37.53	40.74
Moyenne 01-2008	34.87	42.24	29.55
Année	28.22	31.48	38.86

Tableau 1: Comparaison de la mesure de fond à Vaulx-en-Velin avec les données de proximité mesurées à IUFM Nord pour le NO₂ (en µg/m³) sur les quatre campagnes de l'année 2007-2008

La présence d'une donnée de concentration de fond étant indispensable pour la suite de l'étude, les données des quatre capteurs de proximité ont été étudiées. Pour cela une simulation à été menée à l'aide du logiciel SIRANE en utilisant un fond arbitraire (en l'occurrence celui de Vaulx-en-Velin). Le but de cette simulation n'étant pas une évaluation de la pollution, mais seulement de déterminer graphiquement lequel des quatre capteurs de proximité pourrait éventuellement être utilisé comme un capteur de fond, autrement dit lequel subit le moins l'influence du trafic et des autres sources d'émissions.

Comme la Figure 20 le montre, les trois capteurs situés sur le plateau de la Croix-Rousse, ont des valeurs très proches du fond employé et semblent peu perturbés par le trafic ambiant (on ne tiendra pas ici compte du capteur Vaise-Marietton, de typologie trafic, qui ne mesure donc pas des concentrations caractéristiques du fond urbain). Cependant, le choix d'implantation par COPARLY des capteurs Providence des Trinitaires et IUFM Sud, à proximité des cheminées d'extraction, a été fait expressément pour étudier des influences locales potentiellement liées au tunnel. Par contre, le site IUFM Nord a été implanté sur un terrain suffisamment isolé pour pouvoir être considéré comme site de référence pour la mesure du fond urbain sur la Croix-Rousse. C'est donc ce site qui a été utilisé comme capteur de fond pour la modélisation.

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

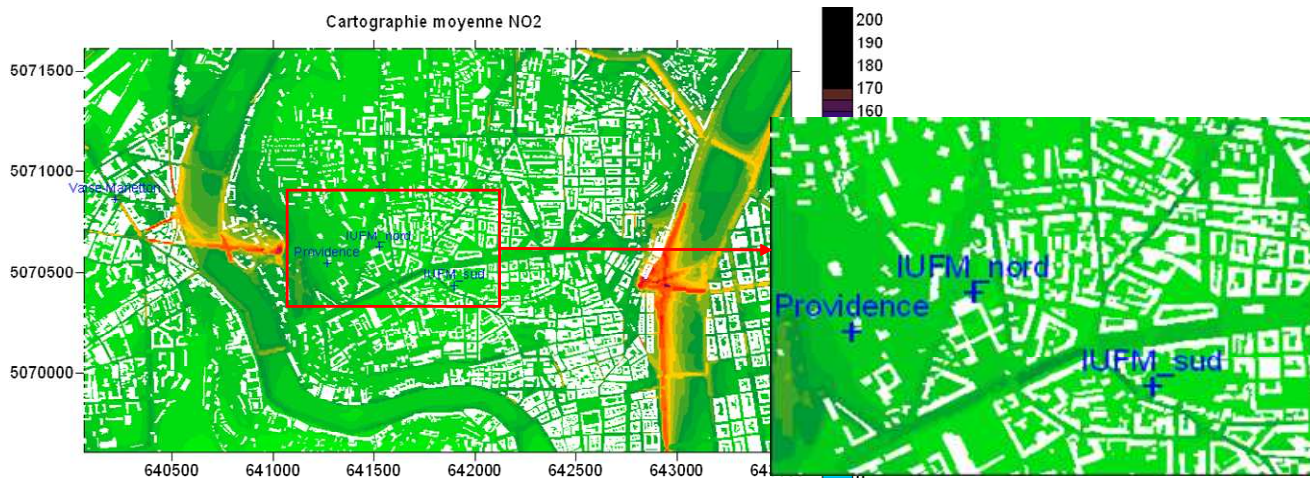


Figure 20: Cartographie de la concentration en NO₂ sur le quartier de la Croix-Rousse. Un zoom effectué sur le plateau permet de distinguer les influences subies par chaque capteur.

Les données de fond étant dorénavant recalées sur celles du capteur IUFM Nord, le modèle SIRANE sera particulièrement proche de la mesure en ce point précis et ce spécialement pour les polluants passifs (PM₁₀ ou benzène).

La détermination de la concentration de fond ajustée $C_{\text{fond_ajusté}}$ introduite dans le modèle s'est faite de la façon suivante :

$$C_{\text{fond_ajusté}} = C_{\text{Mesure_IUFM_Nord}} - C_{\text{Sirane_sans_fond}}$$

où $C_{\text{Mesure_IUFM_Nord}}$ représente la concentration mesurée au capteur IUFM Nord,

et $C_{\text{Sirane_sans_fond}}$ représente la concentration calculée par le modèle SIRANE sans utilisation d'une concentration de fond.

4 PRESENTATION ET VALIDATION DES RESULTATS POUR LES CAMPAGNES 2007-2008 SUR LE QUARTIER DE LA CROIX-ROUSSE

4.1 COMPARAISON DES SIMULATIONS ET DES MESURES DE CAPTEUR DE PROXIMITE

Afin d'évaluer la qualité des simulations effectuées avec le modèle SIRANE, les concentrations calculées ont été comparées avec les mesures des quatre capteurs de proximité des sites IUFM Nord, IUFM Sud, Providence et Vaise-Marietton (cf. Figure 17). Cependant, il est à noter que le capteur Vaise-Marietton n'effectue pas de mesure de particules.

Le modèle SIRANE a été utilisé sur quatre périodes de deux semaines correspondant aux quatre campagnes de mesures menées à l'aide de moyens mobiles de mesure et de tubes passifs. Ces quatre périodes sont :

- du 23 mai 2007 à 14:00 au 03 juin 2007 à 23:00, soit 274 heures
- du 21 août 2007 à 01:00 au 03 septembre 2007 à 23:00, soit 335 heures
- du 05 novembre 2007 à 00:00 au 22 novembre 2007 à 23:00, soit 432 heures
- du 09 janvier 2008 à 01:00 au 22 janvier 2008 à 23:00, soit 335 heures

Pour chaque période, deux types de comparaison sont effectués entre le modèle et les mesures : des comparaisons sur les séries temporelles et des comparaisons sur les paramètres statistiques. Les résultats de ces comparaisons sont présentés dans les paragraphes suivants.

Les résultats du modèle ont également été comparés aux mesures effectuées par tubes passifs (pour le NO₂) durant les quatre périodes.

4.1.1 COMPARAISON DES SERIES TEMPORELLES POUR LA PERIODE DE MAI 2007

4.1.1.1 *Dioxyde d'azote*

Evolution heure par heure de la concentration

Pour évaluer le comportement du modèle, les évolutions heure par heure de la concentration mesurée et de la concentration calculée sont représentées (Figure 21 et suivantes).

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

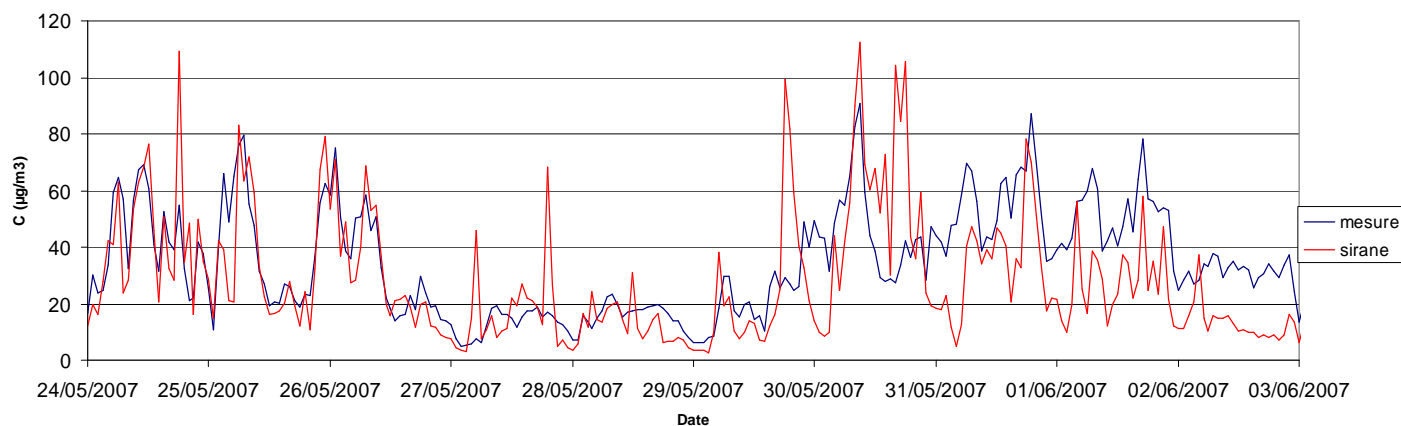


Figure 21 : Evolution de la concentration en NO₂ au capteur IUFM Sud

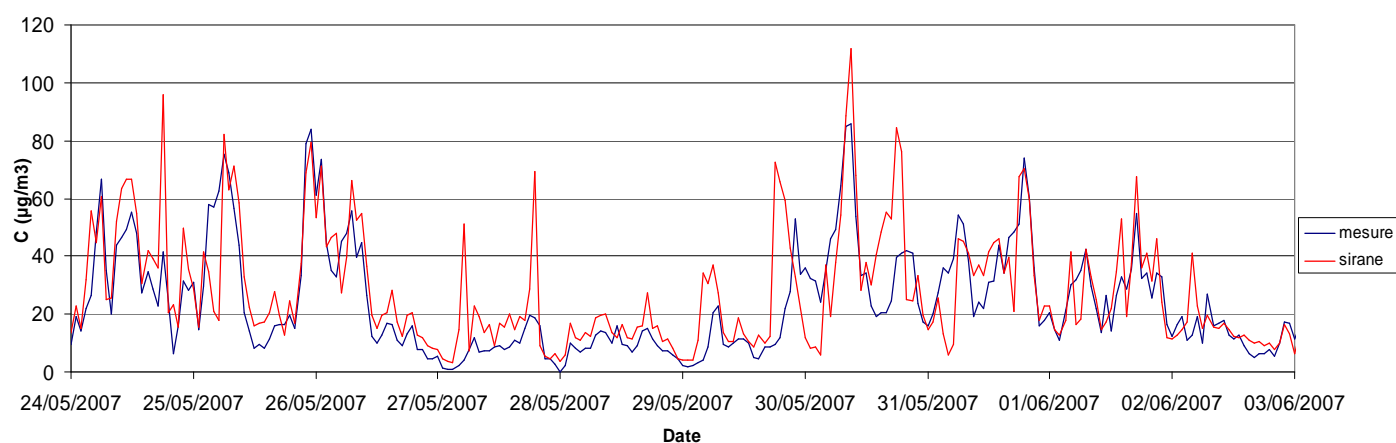


Figure 22 : Evolution de la concentration en NO₂ au capteur Providence

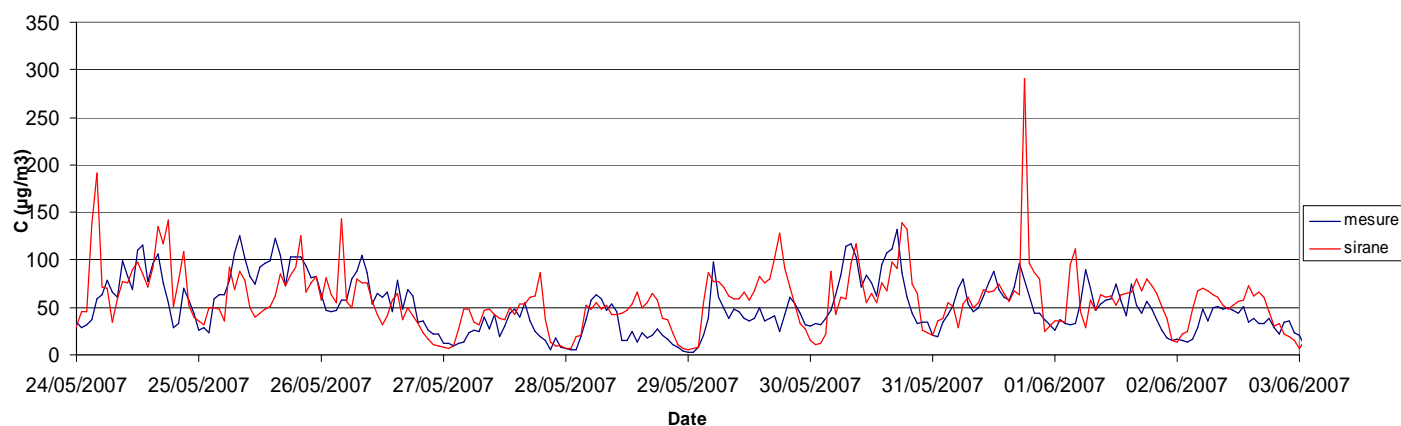


Figure 23 : Evolution de la concentration en NO₂ au capteur Vaise-Marietton

Evolution journalière de la concentration

Afin d'observer le comportement du modèle sur des durées journalières, on moyenne la concentration modélisée (courbe rouge) et la concentration mesurée (courbe bleue) pour chaque jour de la période. On obtient les évolutions suivantes (Figure 24 à Figure 26) :

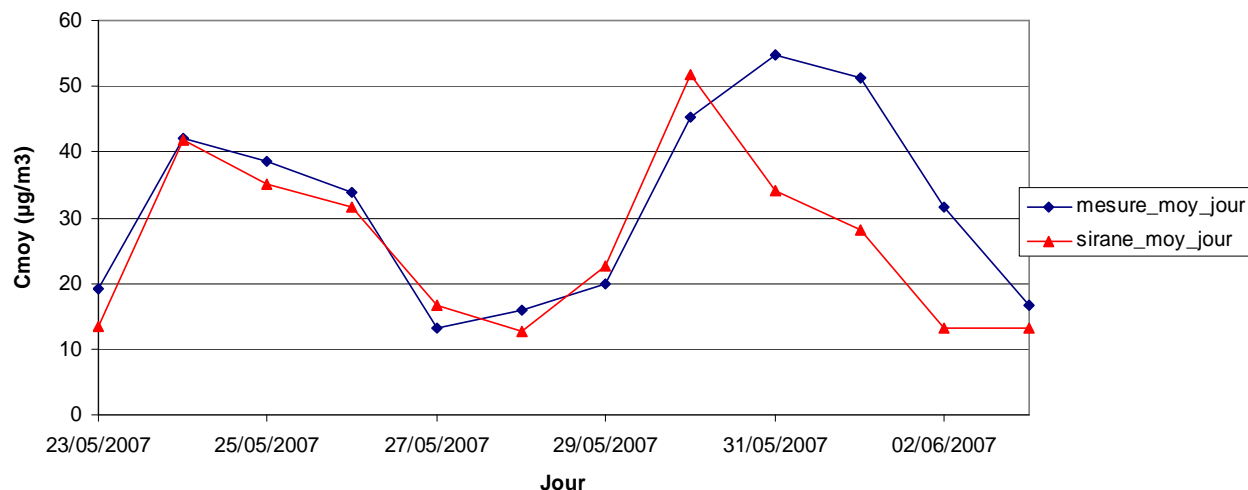


Figure 24 : Concentration moyenne journalière en NO₂ au capteur IUFM Sud

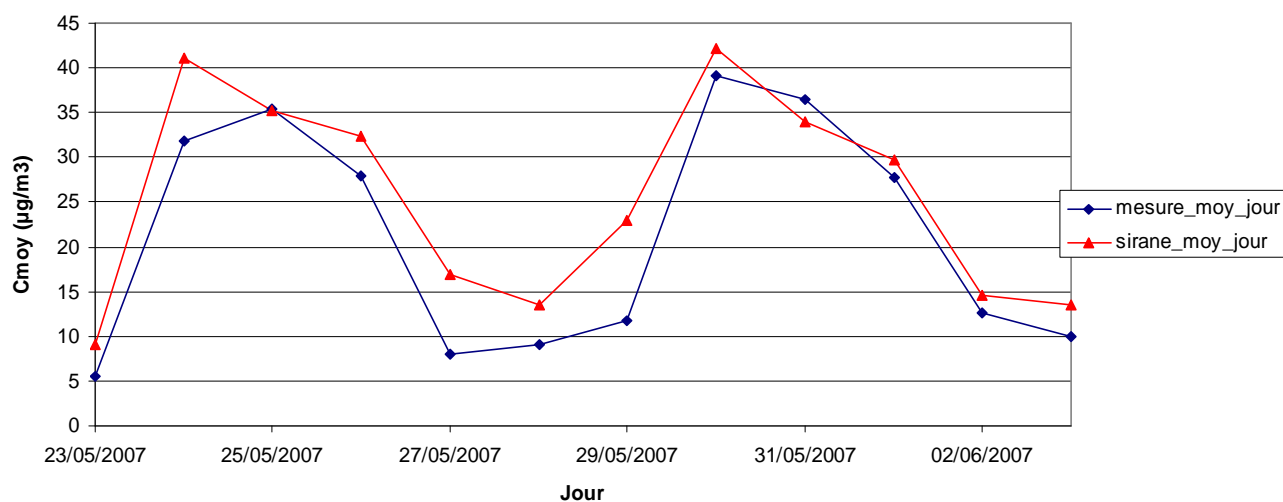


Figure 25 : Concentration moyenne journalière en NO₂ au capteur Providence

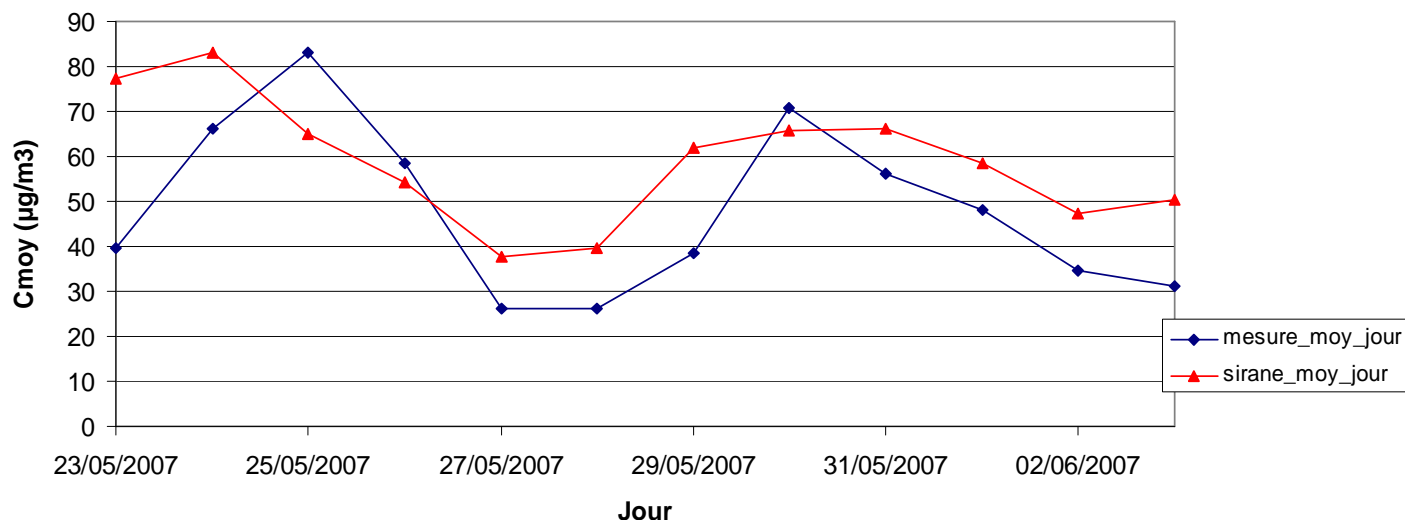


Figure 26 : Concentration moyenne journalière en NO_2 au capteur Vaise-Marietton

On remarque que les comparaisons en moyenne journalière reflètent mieux les tendances générales de la modélisation que les comparaisons horaires. Le modèle donne des résultats de meilleure qualité au capteur Providence, avec cependant une tendance générale à une légère surestimation des données, que l'on retrouve au capteur Vaise-Marietton.

Les comparaisons heure par heure montrent que le modèle SIRANE reproduit convenablement les tendances journalières les premiers jours (du 24 au 27 mai), tous capteurs confondus. Hors de cette période, le modèle tend à surestimer les pics de concentration, voire à générer des pics étrangers aux tendances de la mesure.

4.1.1.2 Particules

Evolution heure par heure de la concentration

Pour évaluer le comportement du modèle, les évolutions heure par heure de la concentration mesurée et de la concentration calculée sont représentées (Figure 27 et suivante).

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

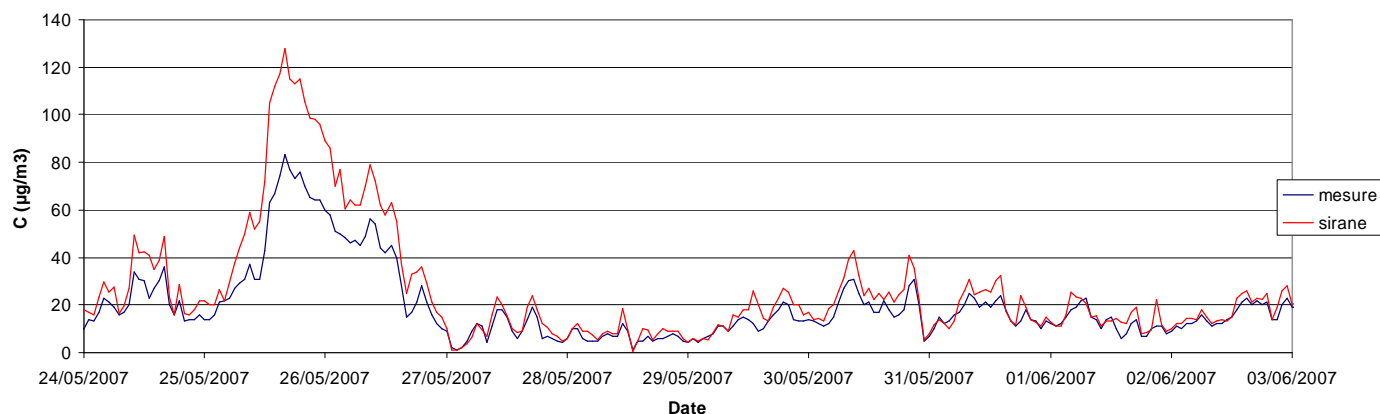


Figure 27 : Evolution de la concentration en PM_{10} au capteur IUFM Sud

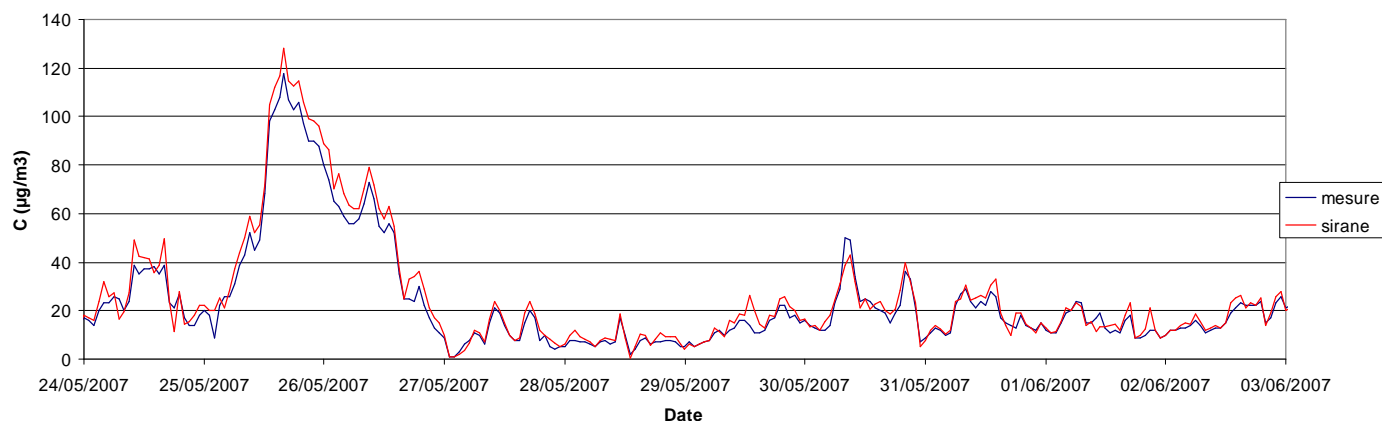


Figure 28 : Evolution de la concentration en PM_{10} au capteur Providence

Evolution journalière de la concentration

Afin d'observer le comportement du modèle sur des durées journalières, on moyenne la concentration modélisée (courbe rouge) et la concentration mesurée (courbe bleue) pour chaque jour de la période. On obtient les évolutions suivantes (Figure 29 et Figure 30) :

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

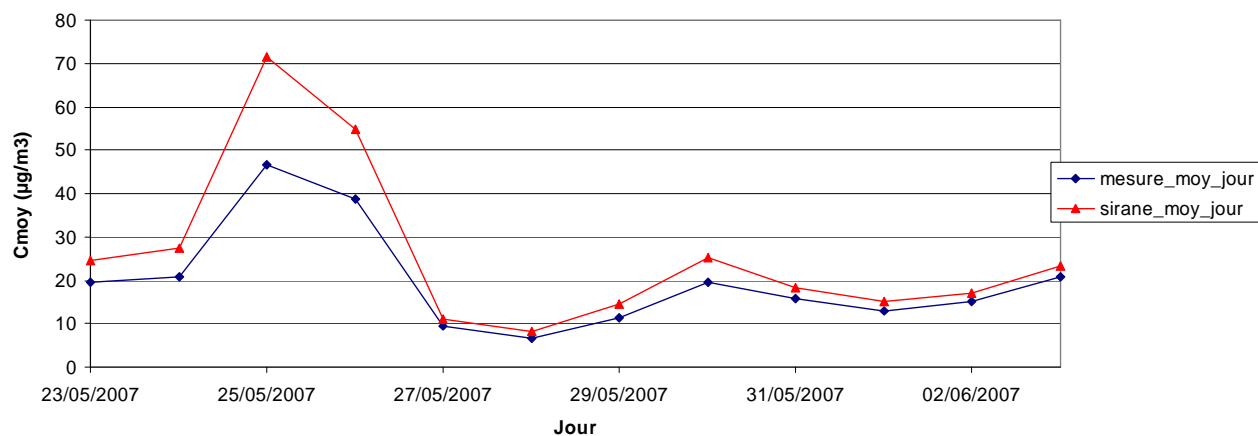


Figure 29 : Concentration moyenne journalière en PM_{10} au capteur IUFM Sud

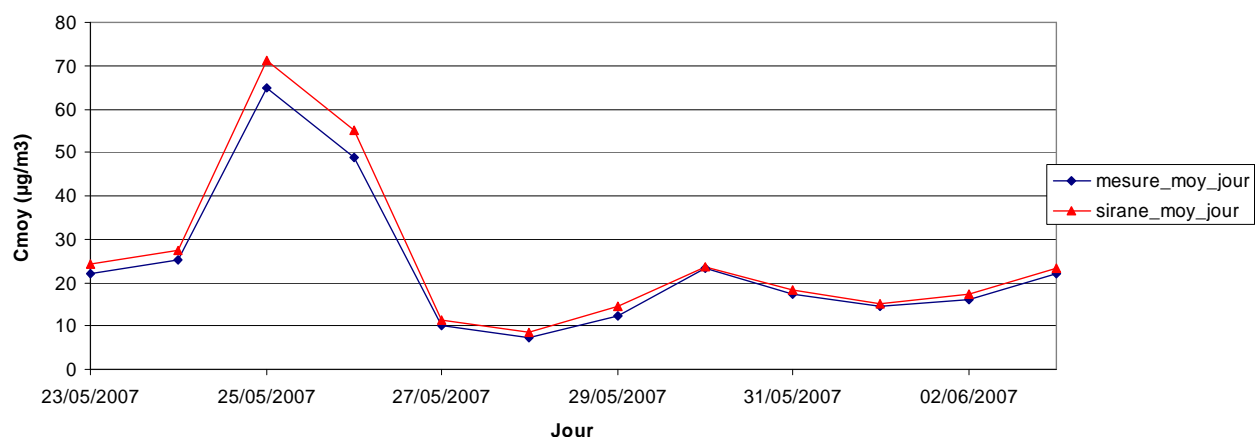


Figure 30 : Concentration moyenne journalière en PM_{10} au capteur Providence

Les comparaisons sont ici de meilleure qualité que pour le NO_2 , tant en vision horaire qu'en moyenne journalière. Cela peut provenir du fait que les mesures de particules enregistrées aux capteurs IUFM Sud et Providence sont assez proches de celles enregistrées au capteur IUFM Nord, utilisé comme capteur de fond.

4.1.2 COMPARAISON DES SERIES TEMPORELLES POUR LA PERIODE D'AOUT 2007

4.1.2.1 Dioxyde d'azote

Evolution heure par heure de la concentration

Pour évaluer le comportement du modèle, les évolutions heure par heure de la concentration mesurée et de la concentration calculée sont représentées (Figure 31 et suivantes).

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

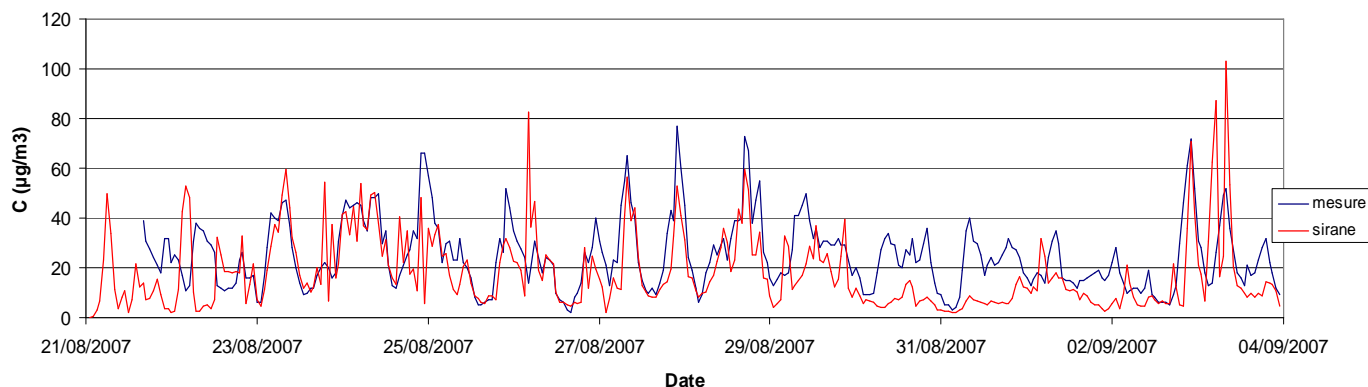


Figure 31 : Evolution de la concentration en NO₂ au capteur IUFM Sud

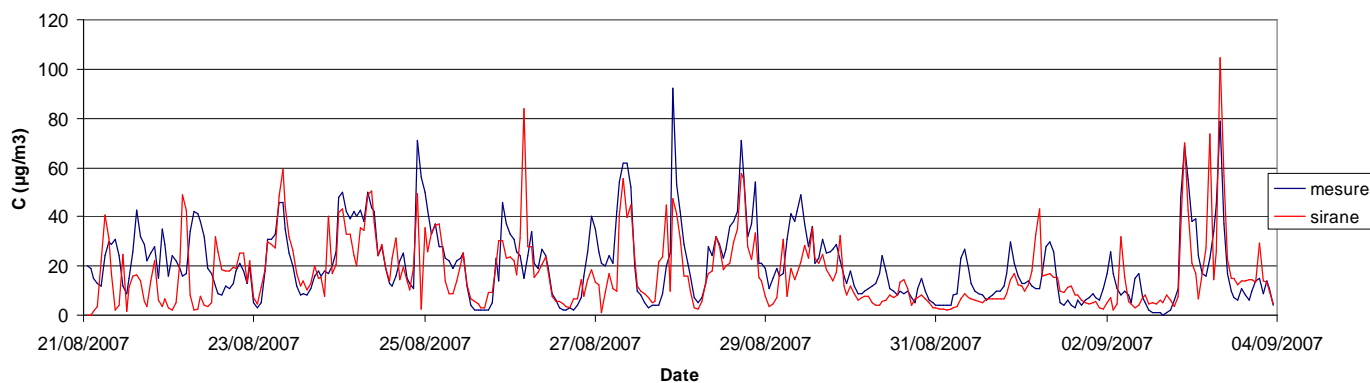


Figure 32 : Evolution de la concentration en NO₂ au capteur Providence

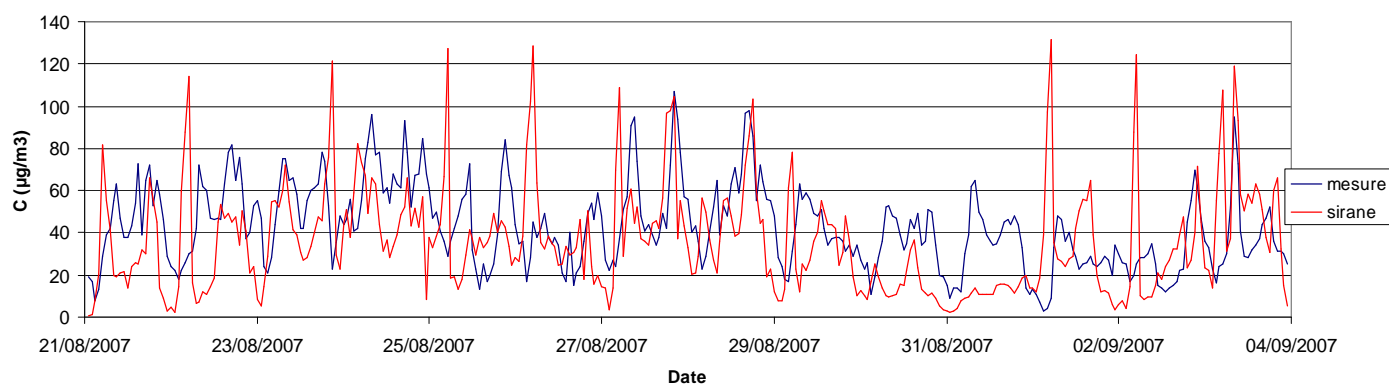


Figure 33 : Evolution de la concentration en NO₂ au capteur Vaise-Marietton

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

Evolution journalière de la concentration

Afin d'observer le comportement du modèle sur des durées journalières, on moyenne la concentration modélisée (courbe rouge) et la concentration mesurée (courbe bleue) pour chaque jour de la période. On obtient les évolutions suivantes (Figure 34 à Figure 36) :

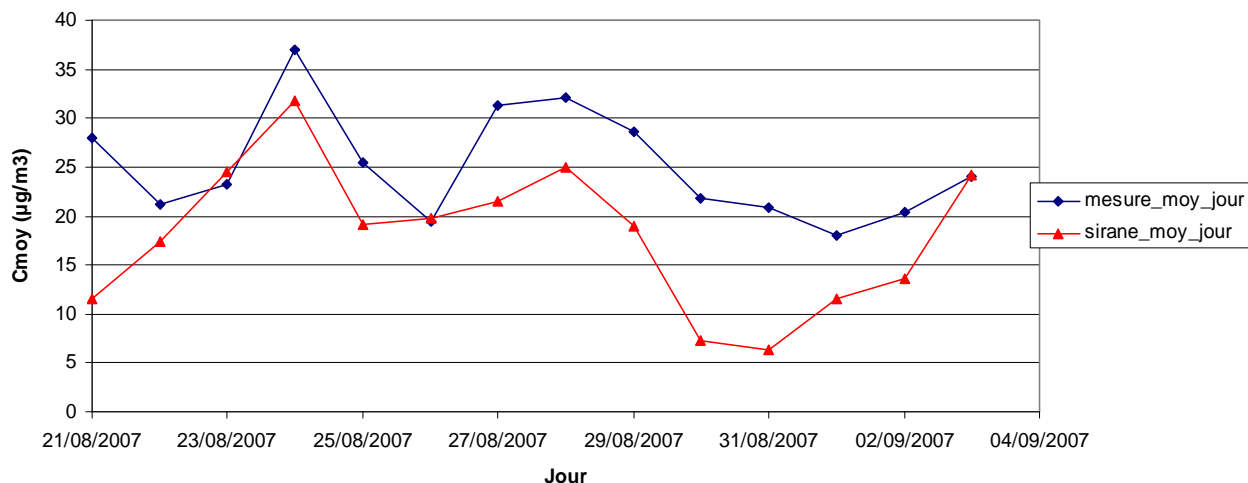


Figure 34 : Concentration moyenne journalière en NO_2 au capteur IUFM Sud

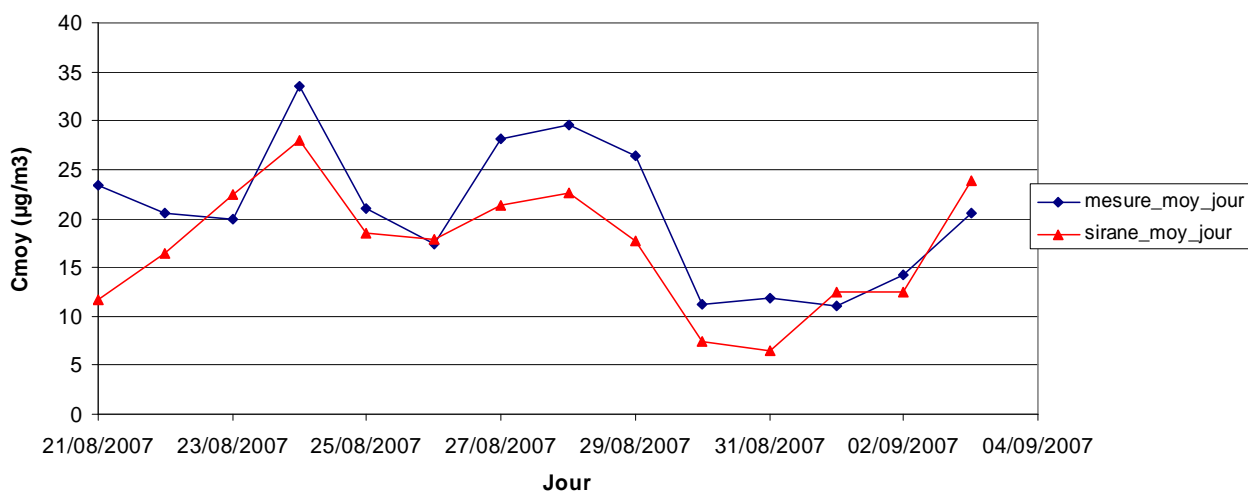


Figure 35 : Concentration moyenne journalière en NO_2 au capteur Providence

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

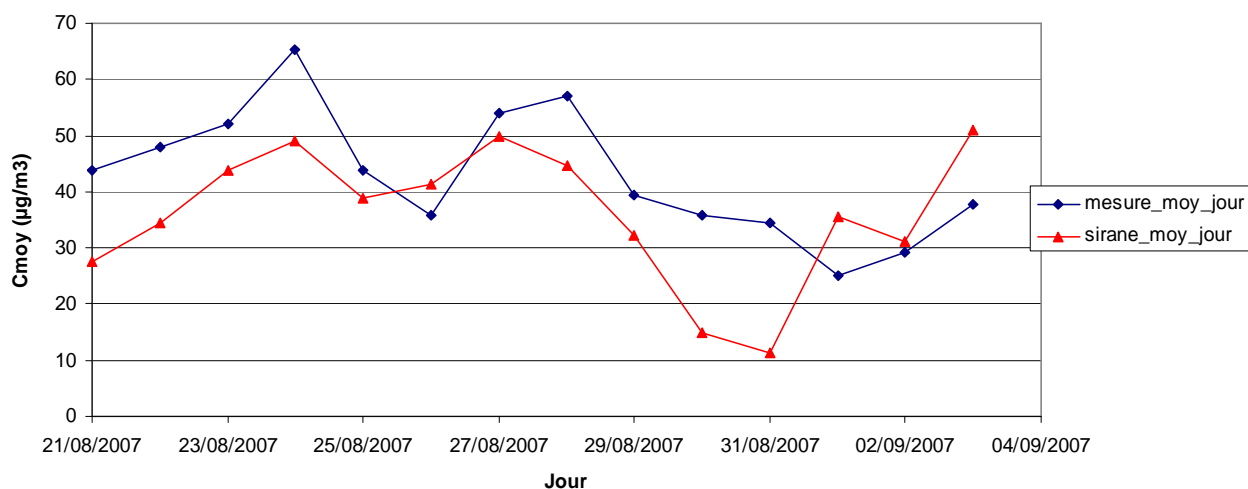


Figure 36 : Concentration moyenne journalière en NO_2 au capteur Vaise-Marietton

Mis à part la surestimation occasionnelle de certains pics de concentration de la part du modèle, le modèle sous-estime globalement la concentration mesurée, tous capteurs confondus, particulièrement pendant la période du 27 au 30 août, précédant la fermeture du tunnel.

4.1.2.2 Particules

Evolution heure par heure de la concentration

Pour évaluer le comportement du modèle, les évolutions heure par heure de la concentration mesurée et de la concentration calculée sont représentées (Figure 37 et suivante).

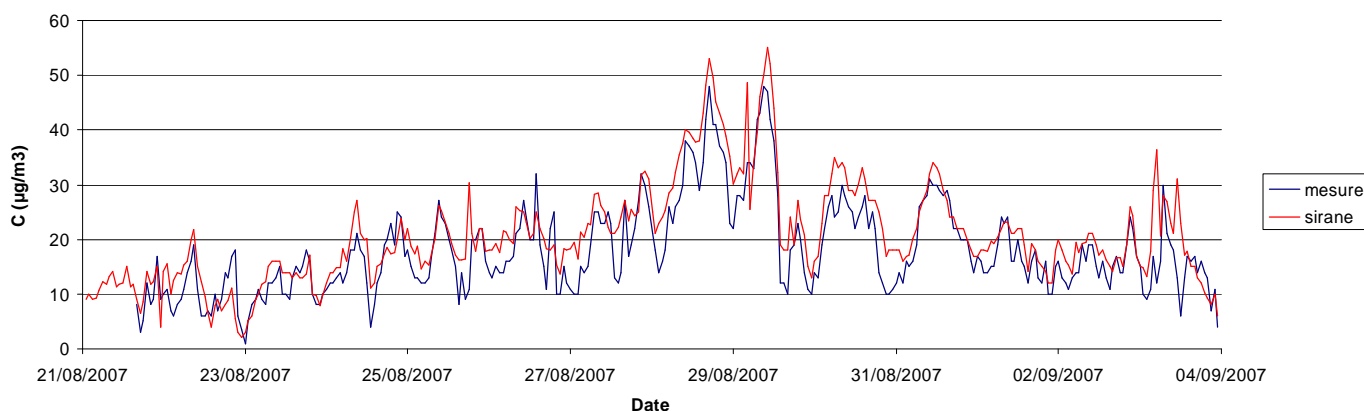


Figure 37 : Evolution de la concentration en PM_{10} au capteur IUFM Sud

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

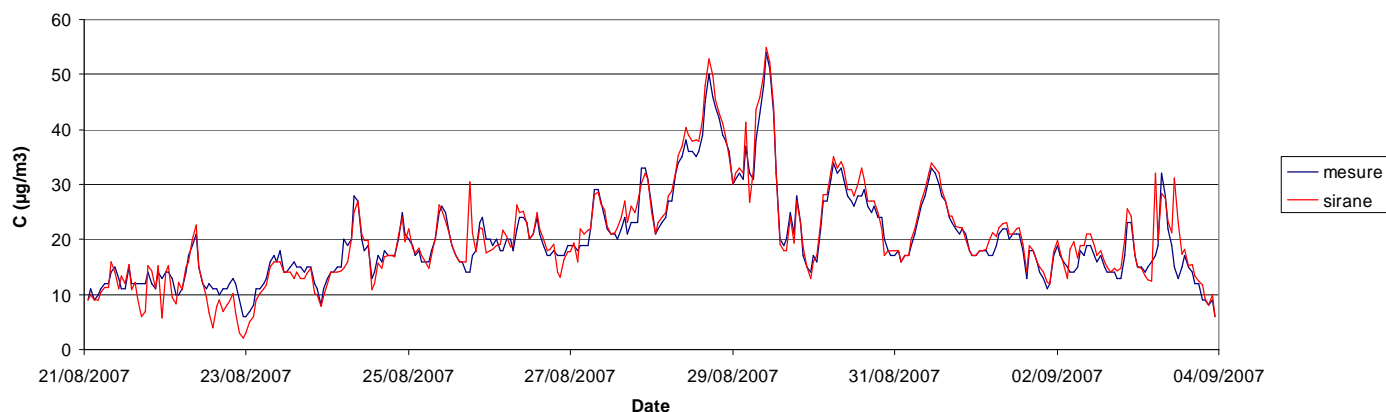


Figure 38 : Evolution de la concentration en PM_{10} au capteur Providence

Evolution journalière de la concentration

Afin d'observer le comportement du modèle sur des durées journalières, on moyenne la concentration modélisée (courbe rouge) et la concentration mesurée (courbe bleue) pour chaque jour de la période. On obtient les évolutions suivantes (Figure 39 et Figure 40) :

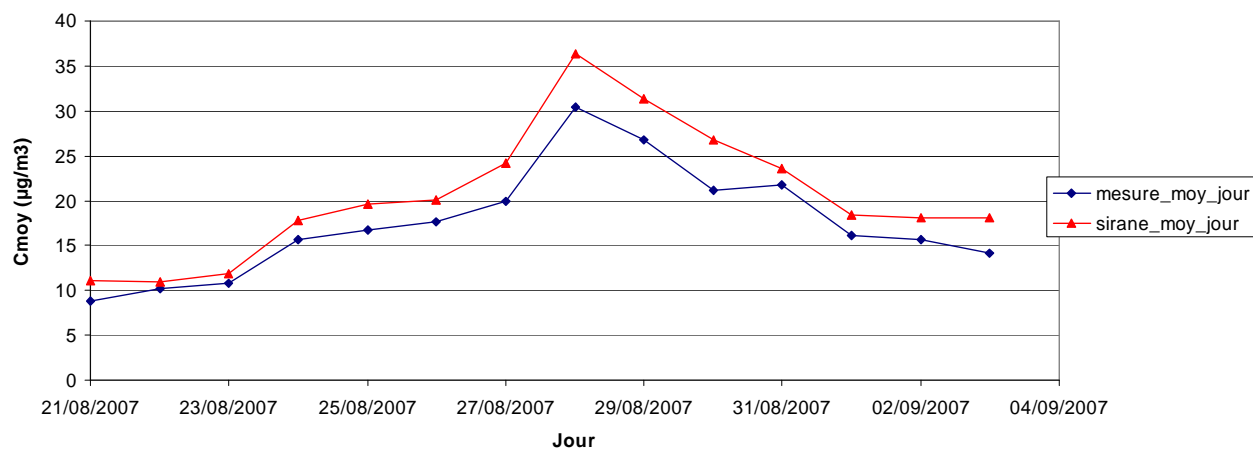


Figure 39 : Concentration moyenne journalière en PM_{10} au capteur IUFM Sud

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

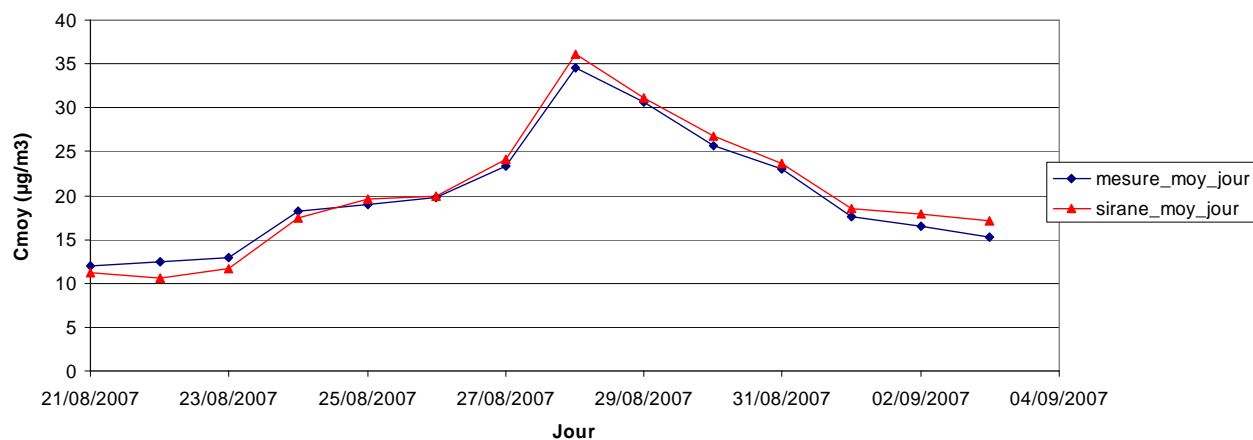


Figure 40 : Concentration moyenne journalière en PM_{10} au capteur Providence

Tout comme lors de la campagne de mai, les comparaisons sont ici de meilleure qualité que pour le NO_2 , pour les mêmes raisons évoquées précédemment (proximité des mesures avec celles du capteur IUFM Nord, utilisé comme capteur de fond).

4.1.3 COMPARAISON DES SERIES TEMPORELLES POUR LA PERIODE DE NOVEMBRE 2007

4.1.3.1 Dioxyde d'azote

Evolution heure par heure de la concentration

Pour évaluer le comportement du modèle, les évolutions heure par heure de la concentration mesurée et de la concentration calculée sont représentées (Figure 41 et suivantes).

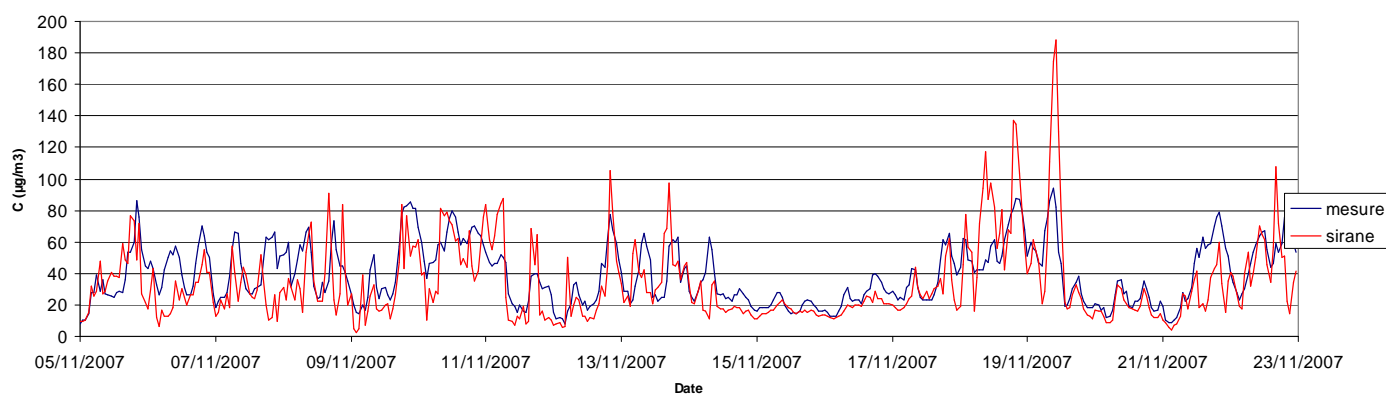


Figure 41 : Evolution de la concentration en NO_2 au capteur IUFM Sud

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

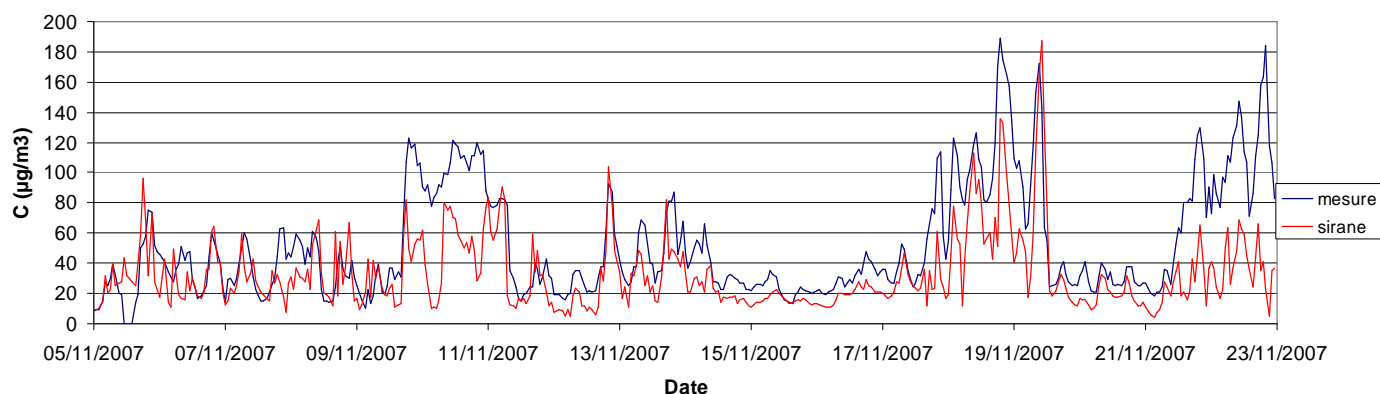


Figure 42 : Evolution de la concentration en NO_2 au capteur Providence

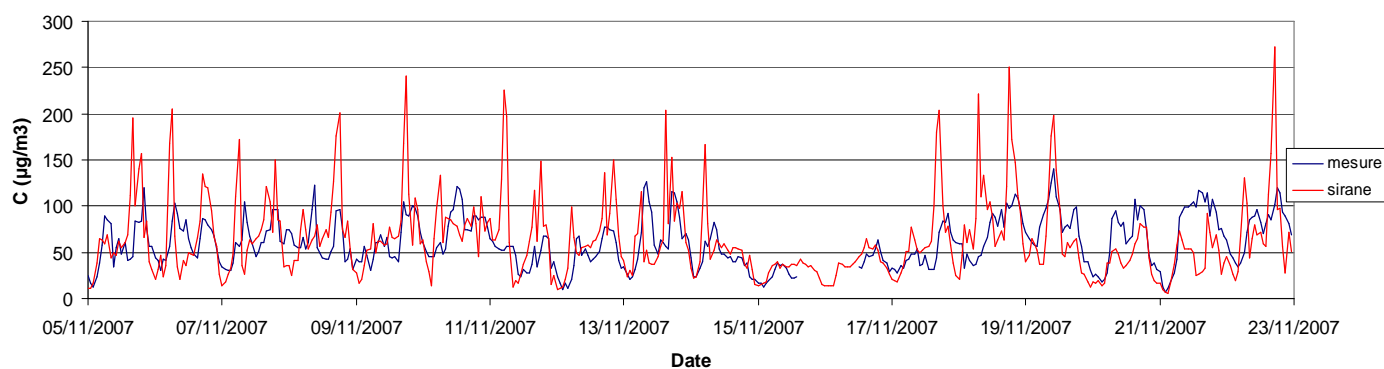


Figure 43 : Evolution de la concentration en NO_2 au capteur Vaise-Marietton

Evolution journalière de la concentration

Afin d'observer le comportement du modèle sur des durées journalières, on moyenne la concentration modélisée (courbe rouge) et la concentration mesurée (courbe bleue) pour chaque jour de la période. On obtient les évolutions suivantes (Figure 44 à Figure 46) :

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

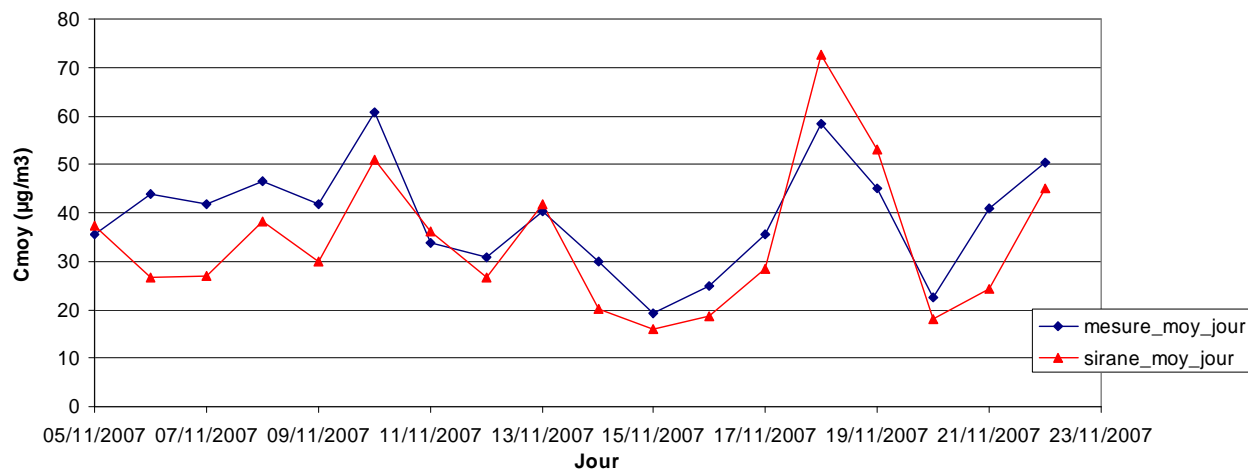


Figure 44 : Concentration moyenne journalière en NO₂ au capteur IUFM Sud

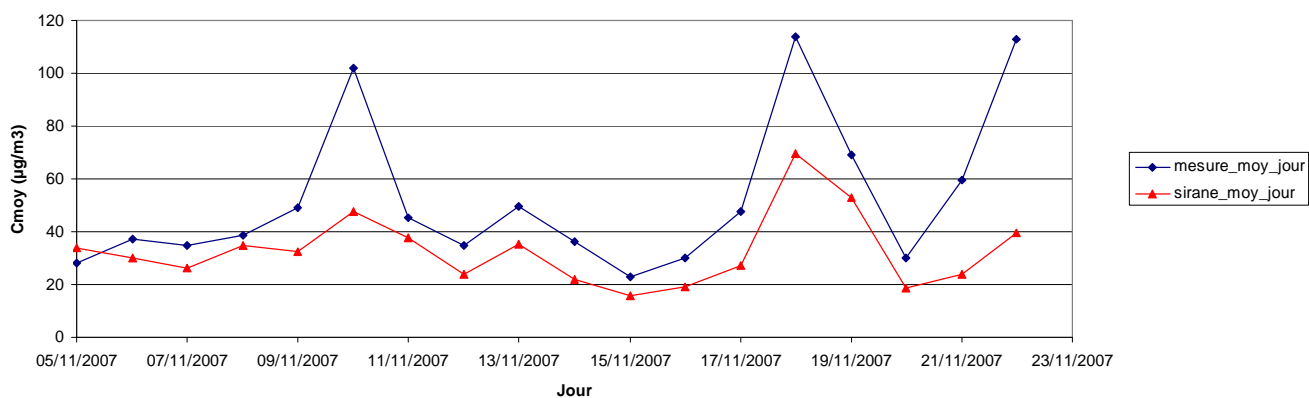


Figure 45 : Concentration moyenne journalière en NO₂ au capteur Providence



Figure 46 : Concentration moyenne journalière en NO₂ au capteur Vaise-Marietton

On remarque que le modèle a tendance à sous-estimer les résultats de mesure aux capteurs IUFM Sud et Providence alors que cette tendance s'inverse au capteur Vaise-Marietton. Ce

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

dernier étant plus proche du trafic, il explique la surestimation des pics de pollution observée sur le graphe horaire.

4.1.3.2 Particules

Evolution heure par heure de la concentration

Pour évaluer le comportement du modèle, les évolutions heure par heure de la concentration mesurée et de la concentration calculée sont représentées (Figure 47 et suivante).

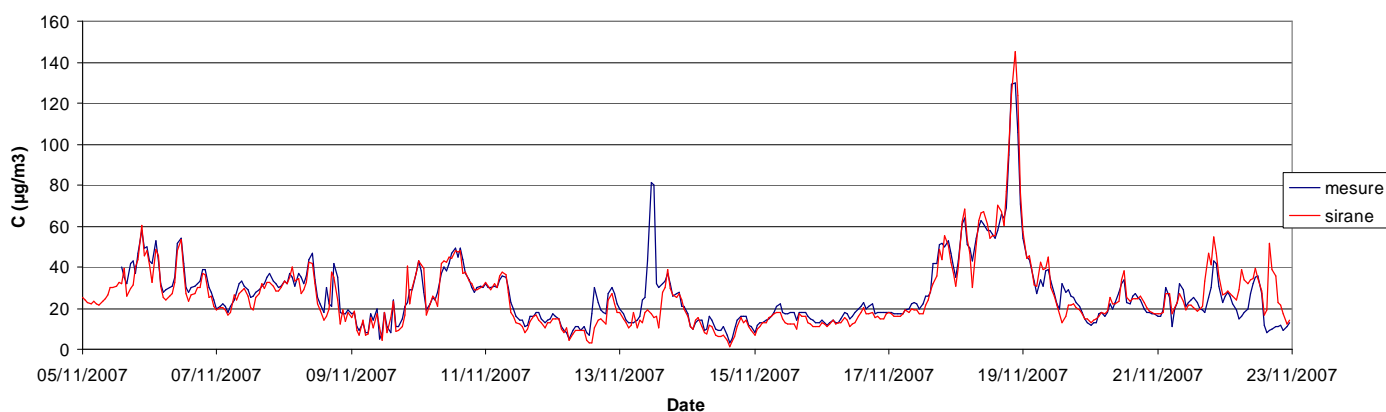


Figure 47 : Evolution de la concentration en PM₁₀ au capteur IUFM Sud

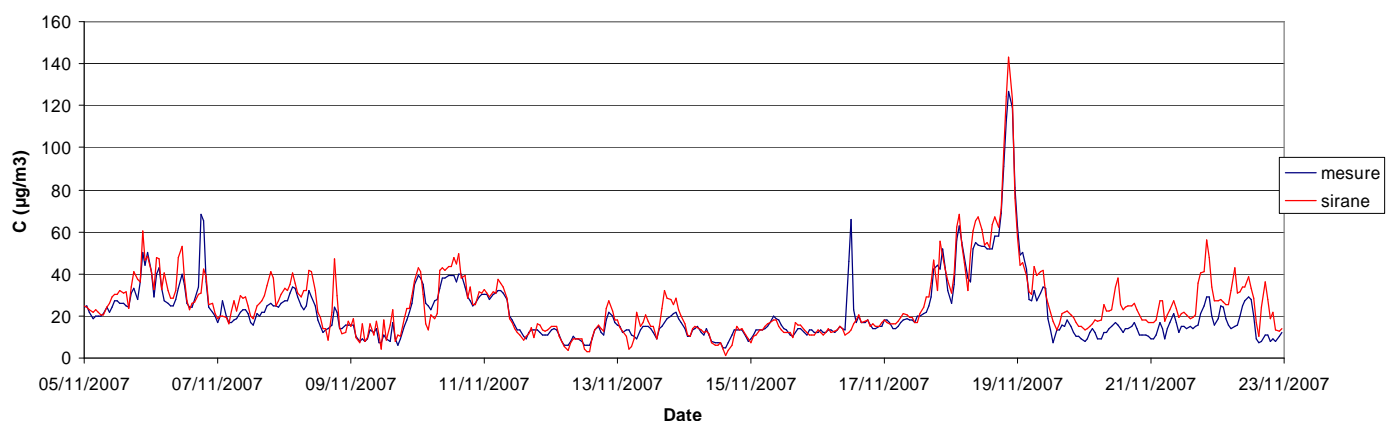


Figure 48 : Evolution de la concentration en PM₁₀ au capteur Providence

Evolution journalière de la concentration

Afin d'observer le comportement du modèle sur des durées journalières, on moyenne la concentration modélisée (courbe rouge) et la concentration mesurée (courbe bleue) pour chaque jour de la période. On obtient les évolutions suivantes (Figure 49 et Figure 50) :

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

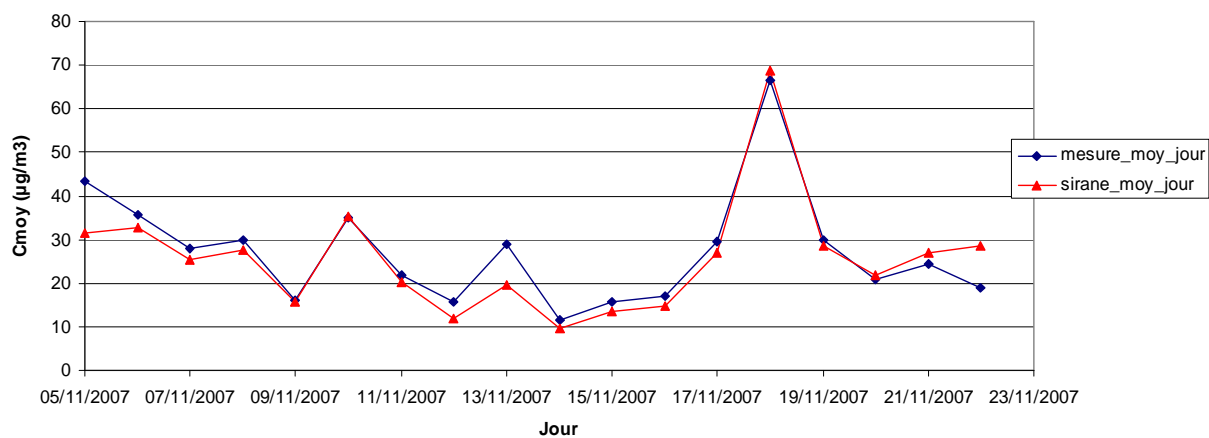


Figure 49 : Concentration moyenne journalière en PM_{10} au capteur IUFM Sud

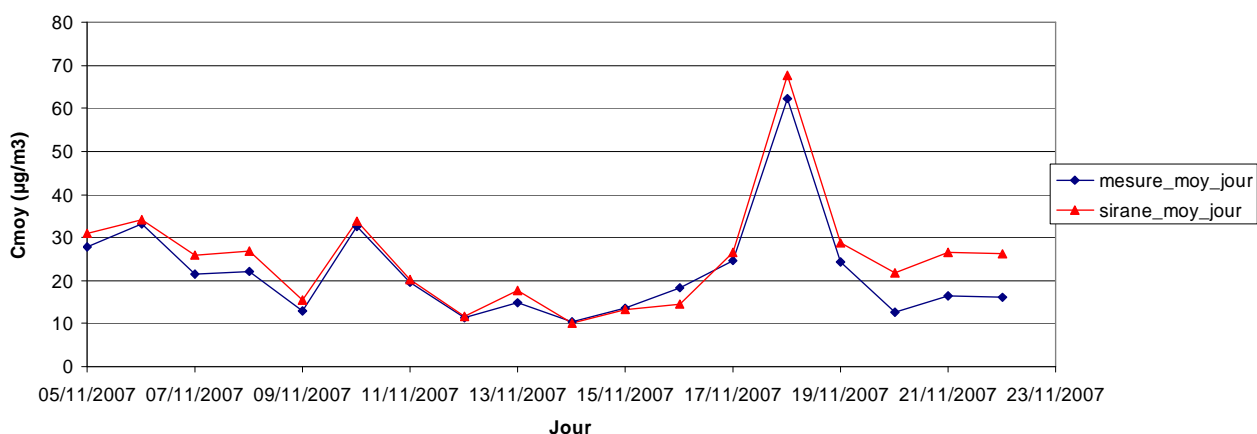


Figure 50 : Concentration moyenne journalière en PM_{10} au capteur Providence

Hormis deux pics non modélisés aux capteurs IUFM Sud et Providence, les résultats issus du modèle sont proches des résultats de mesure, avec cependant une tendance à la sous-estimation les deux derniers jours.

4.1.4 COMPARAISON DES SERIES TEMPORELLES POUR LA PERIODE DE JANVIER 2008

4.1.4.1 Dioxyde d'azote

Evolution heure par heure de la concentration

Pour évaluer le comportement du modèle, les évolutions heure par heure de la concentration mesurée et de la concentration calculée sont représentées (Figure 51 et suivantes).

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

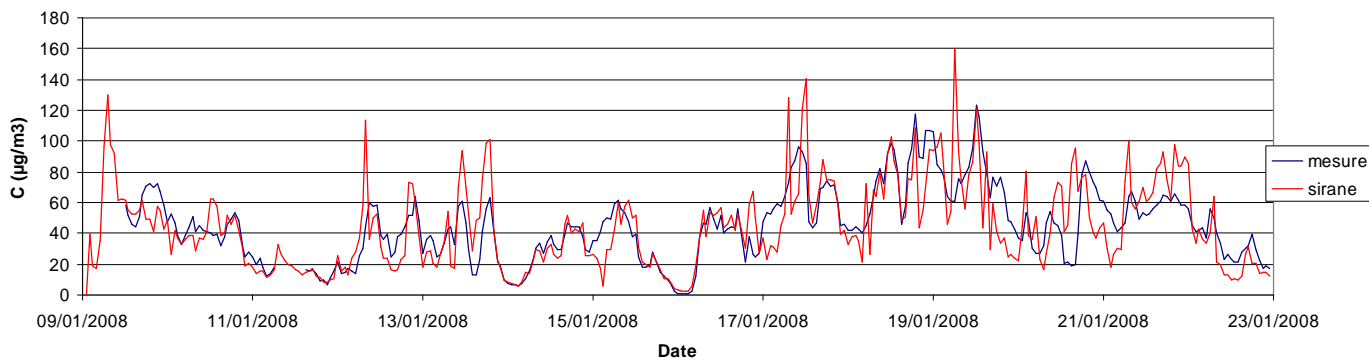


Figure 51 : Evolution de la concentration en NO_2 au capteur IUFM Sud

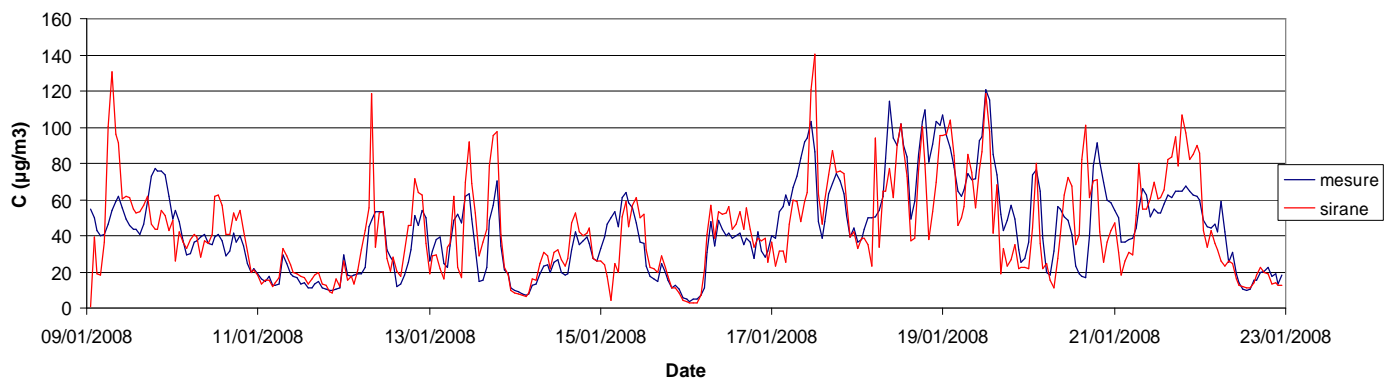


Figure 52 : Evolution de la concentration en NO_2 au capteur Providence

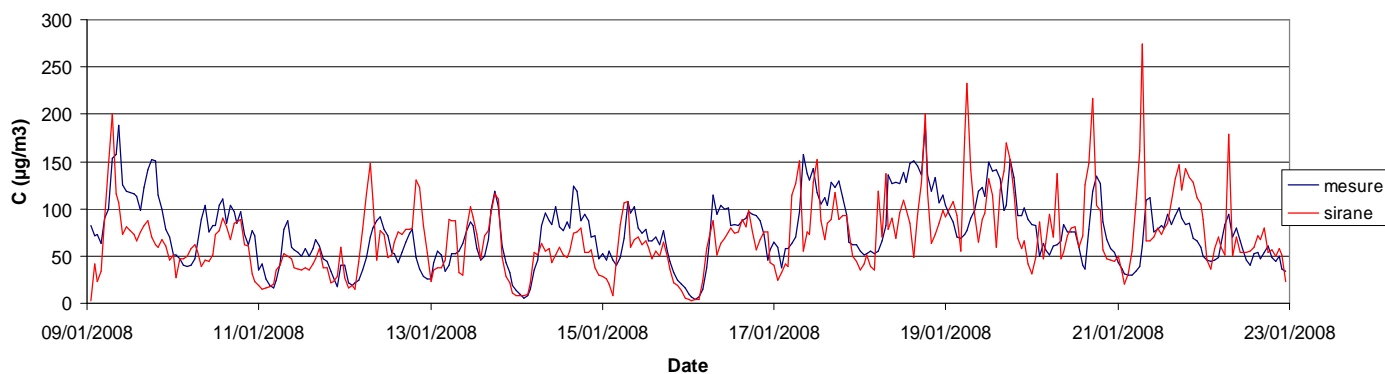


Figure 53 : Evolution de la concentration en NO_2 au capteur Vaise-Marietton

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

Evolution journalière de la concentration

Afin d'observer le comportement du modèle sur des durées journalières, on moyenne la concentration modélisée (courbe rouge) et la concentration mesurée (courbe bleue) pour chaque jour de la période. On obtient les évolutions suivantes (Figure 54 à Figure 56) :

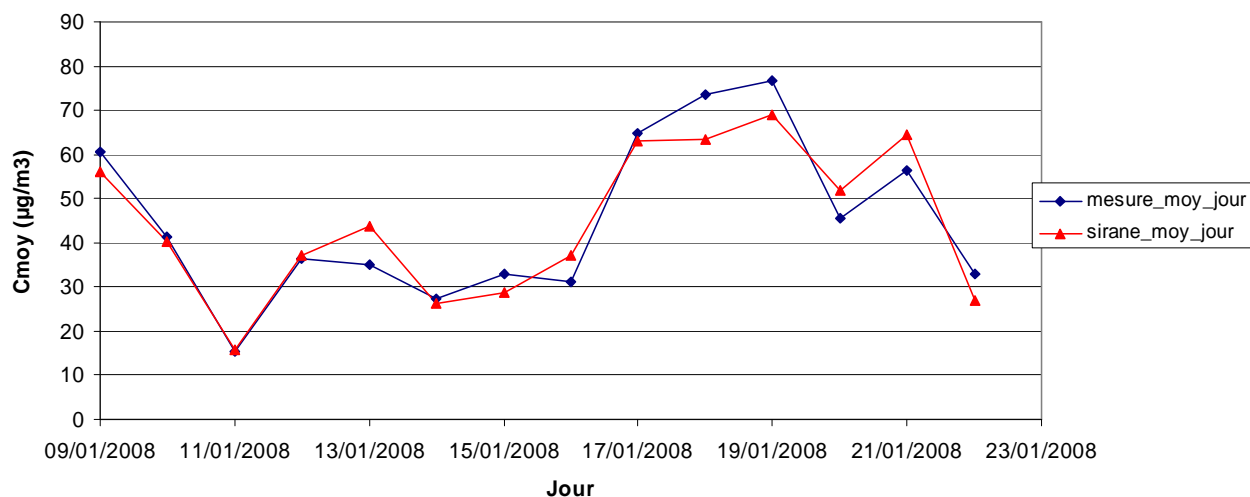


Figure 54 : Concentration moyenne journalière en NO₂ au capteur IUFM Sud

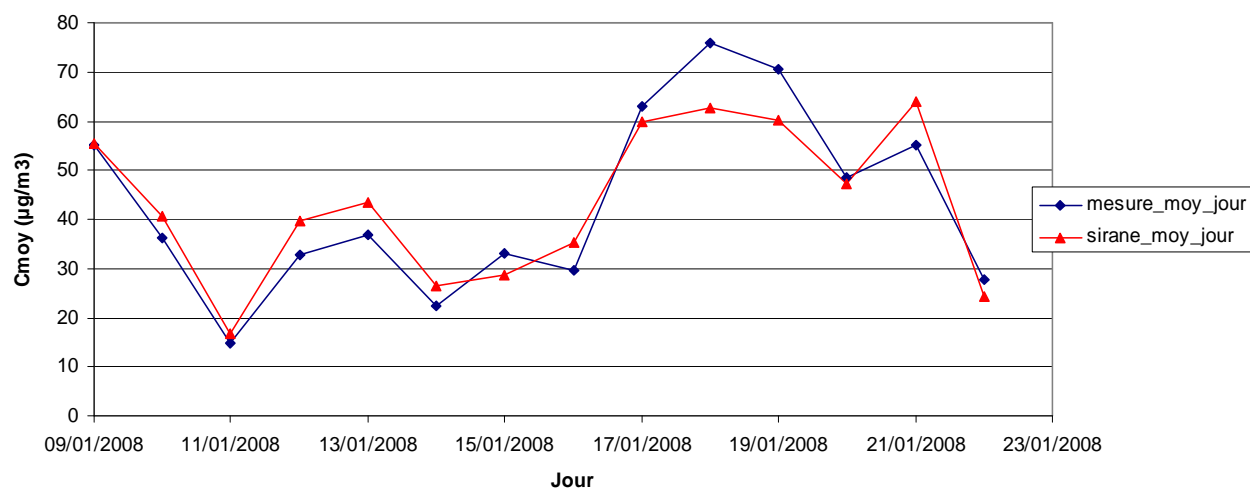


Figure 55 : Concentration moyenne journalière en NO₂ au capteur Providence

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

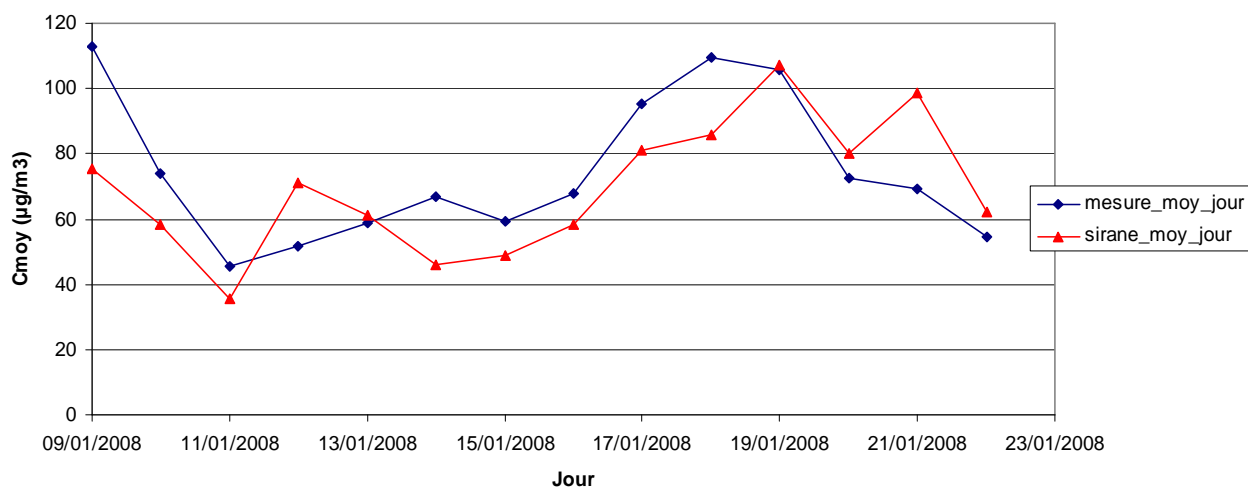


Figure 56 : Concentration moyenne journalière en NO_2 au capteur Vaise-Marietton

La comparaison modèle-mesure est ici de meilleure qualité que pour les autres périodes, tous capteurs confondus, à ceci près que les tendances journalières du capteur Vaise-Marietton ne semblent pas correctement reproduites, sans doute à cause de la mésestimation des pics de concentration horaires.

4.1.4.2 Particules

Evolution heure par heure de la concentration

Pour évaluer le comportement du modèle, les évolutions heure par heure de la concentration mesurée et de la concentration calculée sont représentées (Figure 57 et suivante).

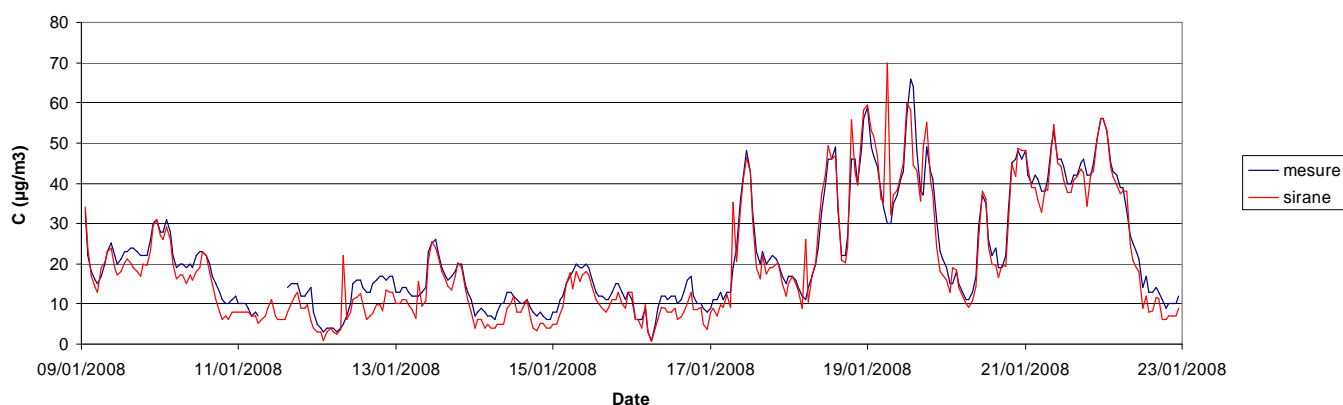


Figure 57 : Evolution de la concentration en PM_{10} au capteur IUFM Sud

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

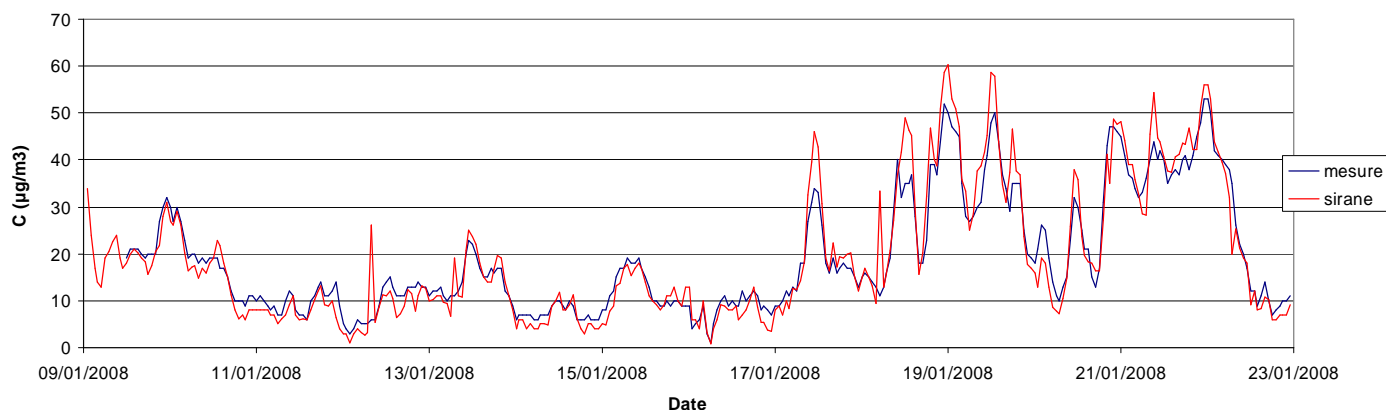


Figure 58 : Evolution de la concentration en PM_{10} au capteur Providence

Evolution journalière de la concentration

Afin d'observer le comportement du modèle sur des durées journalières, on moyenne la concentration modélisée (courbe rouge) et la concentration mesurée (courbe bleue) pour chaque jour de la période. On obtient les évolutions suivantes (Figure 59 et Figure 60) :

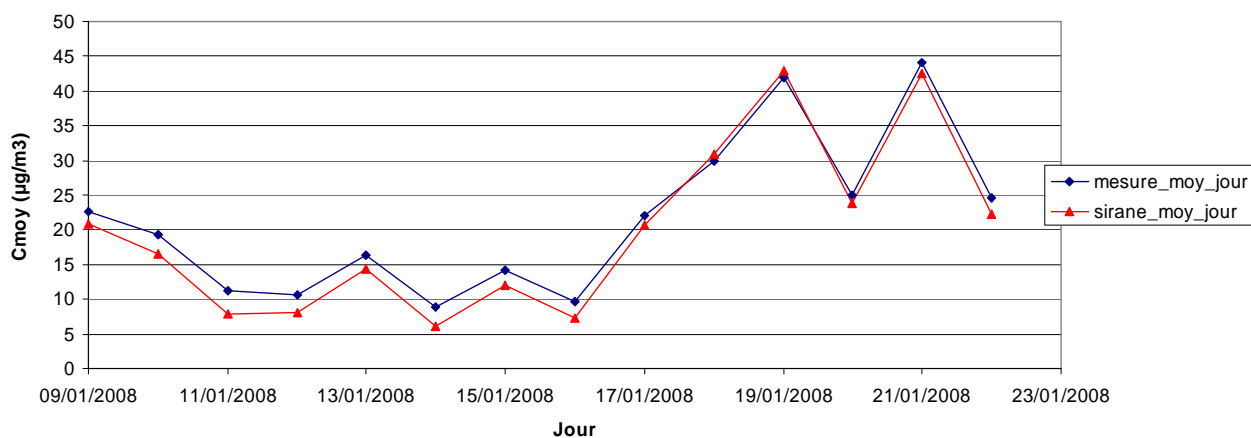


Figure 59 : Concentration moyenne journalière en PM_{10} au capteur IUFM Sud

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

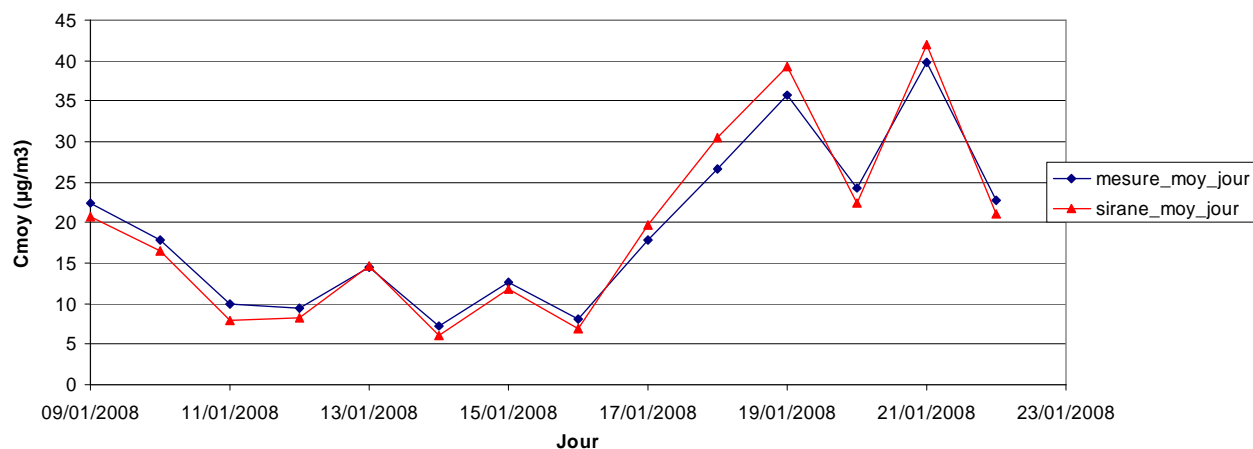


Figure 60 : Concentration moyenne journalière en PM_{10} au capteur Providence

Tous comme lors des précédentes comparaisons, le modèle SIRANE se montre proche des résultats de mesure, à la surestimation des pics horaires près.

4.1.5 COMPARAISON SUR DES PARAMETRES STATISTIQUES

Pour évaluer le comportement général du modèle SIRANE, il est également intéressant de calculer les paramètres statistiques. Pour chaque polluant (cf. Tableau 2 à Tableau 8), les paramètres suivants ont été retenus :

- La moyenne annuelle
- Le percentile 98
- La pente du nuage de points formé par le graphe des résultats de mesure en fonction des résultats issus du modèle

- Le biais fractionnel. De formule $FB = \frac{\bar{C}_{mod} - \bar{C}_{obs}}{0.5 * (\bar{C}_{mod} + \bar{C}_{obs})}$, ce paramètre permet de quantifier l'erreur systématique et la tendance du modèle à surestimer ou à sous-estimer les mesures.

- La moyenne des erreurs relatives $ER = \frac{|C_{mod} - C_{obs}|}{0.5 * (C_{mod} + C_{obs})}$, ce paramètre permet de quantifier l'étalement du nuage de points par rapport au comportement moyen du modèle. Il permet également d'estimer en moyenne l'erreur du modèle sur une situation particulière.

- Le pourcentage de résultats du modèle dans un facteur 2 par rapport aux mesures, c'est-à-dire tels que $0.5 \leq \left| \frac{C_{obs}}{C_{mod}} \right| \leq 2$

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

Comparaison des grandeurs statistiques par campagne et par polluant

Pour chaque polluant, une moyenne a été calculée par campagne, et confrontée à la moyenne de chaque capteur sur cette période. On dispose donc de 16 comparaisons de moyennes pour le NO₂ et de 12 pour les PM (Tableau 2 à Tableau 9).

Un bilan "annuel" de l'année 2007 est également présenté Tableau 10 et 11, à partir de l'ensemble des données formé par les quatre campagnes réunies.

- **Campagne de mai 2007**

→ Dioxyde d'azote

	IUFM_Nord		IUFM_Sud		Providence		Vaise-Marietton	
	NO2_modele	NO2_mesures	NO2_modele	NO2_mesures	NO2_modele	NO2_mesures	NO2_modele	NO2_mesures
Moyenne Campagne 05-2007	25.40	23.30	26.93	32.52	26.27	22.14	57.88	48.54
Ecart Relatif pour la moyenne	9.02		17.18		18.67		19.23	
Percentile 98	80.36	72.27	87.40	75.41	77.94	73.52	136.20	113.62
Ecart Relatif pour le percentile	11.19		15.90		6.01		19.88	
Biais Fractionnel	0.09		-0.19		0.17		0.18	
Moyenne Erreurs Relatives (%)	20.69		47.44		44.71		42.65	
Pourcentage dans un facteur 2 (%)	90.51		72.26		79.20		75.91	
Pente de la droite de régression du nuage de points	0.80		0.94		0.77		0.71	

Tableau 2: Comparaison statistique modèle-mesure pour le NO₂ (µg/m³) sur tous les sites disponibles

→ Particules

	IUFM_Nord		IUFM_Sud		Providence	
	PM_modele	PM_mesures	PM_modele	PM_mesures	PM_modele	PM_mesures
Moyenne Campagne 05-2007	25.66	25.62	25.88	19.65	25.78	23.58
Ecart Relatif pour la moyenne	0.17		31.69		9.33	
Percentile 98	109.24	109.24	109.07	68.62	109.23	100.70
Ecart Relatif pour le percentile	0.00		58.95		8.48	
Biais Fractionnel	0.00		0.27		0.09	
Moyenne Erreurs Relatives (%)	1.00		23.26		13.39	
Pourcentage dans un facteur 2 (%)	99.64		97.81		99.27	
Pente de la droite de régression du nuage de points	1.00		0.76		0.91	

Tableau 3 : Comparaison statistique modèle-mesure pour les PM₁₀ (µg/m³) sur tous les sites disponibles

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

- Campagne d'août 2007

→ Dioxyde d'azote

	IUFM_Nord		IUFM_Sud		Providence		Vaise-Marietton	
	NO2_modele	NO2_mesures	NO2_modele	NO2_mesures	NO2_modele	NO2_mesures	NO2_modele	NO2_mesures
Moyenne Campagne 08-2007	16.68	16.39	18.04	24.99	17.11	20.61	36.14	42.94
Ecart Relatif pour la moyenne	1.72		27.82		16.98		15.83	
Percentile 98	55.71	50.32	57.26	63.48	55.93	57.92	110.48	93.32
Ecart Relatif pour le percentile	10.72		9.80		3.43		18.39	
Biais Fractionnel	0.02		-0.32		-0.19		-0.17	
Moyenne Erreurs Relatives (%)	50.48		64.29		54.97		63.84	
Pourcentage dans un facteur 2 (%)	70.15		60.60		68.96		58.21	
Pente de la droite de régression du nuage de points	0.83		1.00		0.98		0.85	

Tableau 4 : Comparaison statistique modèle-mesure pour le NO₂ (µg/m³) sur tous les sites disponibles

→ Particules

	IUFM_Nord		IUFM_Sud		Providence	
	PM_modele	PM_mesures	PM_modele	PM_mesures	PM_modele	PM_mesures
Moyenne Campagne 08-2007	20.39	20.32	20.61	17.99	20.44	20.09
Ecart Relatif pour la moyenne	0.35		14.57		1.75	
Percentile 98	45.32	45.32	46.85	41.62	45.57	43.32
Ecart Relatif pour le percentile	0.00		12.57		5.19	
Biais Fractionnel	0.00		0.14		0.02	
Moyenne Erreurs Relatives (%)	0.29		31.12		9.68	
Pourcentage dans un facteur 2 (%)	99.70		91.94		98.21	
Pente de la droite de régression du nuage de points	1.00		0.85		0.96	

Tableau 5 : Comparaison statistique modèle-mesure pour les PM₁₀ (µg/m³) sur tous les sites disponibles

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

- Campagne de novembre 2007

→ Dioxyde d'azote

	IUFM_Nord		IUFM_Sud		Providence		Vaise-Marietton	
	NO2 modele	NO2 mesures	NO2 modele	NO2 mesures	NO2 modele	NO2 mesures	NO2 modele	NO2 mesures
Moyenne Campagne 11-2007	33.19	37.53	33.94	39.02	32.75	52.32	63.92	60.65
Ecart Relatif pour la moyenne	11.57		13.02		37.40		5.38	
Percentile 98	99.11	89.76	104.31	81.38	97.24	154.52	199.42	118.60
Ecart Relatif pour le percentile	10.42		28.17		37.07		68.15	
Biais Fractionnel	-0.12		-0.14		-0.46		0.05	
Moyenne Erreurs Relatives (%)	28.75		38.00		53.20		40.35	
Pourcentage dans un facteur 2 (%)	87.96		84.72		68.98		78.47	
Pente de la droite de régression du nuage de points	0.96		0.92		1.40		0.73	

Tableau 6 : Comparaison statistique modèle-mesure pour le NO₂ (µg/m³) sur tous les sites disponibles

→ Particules

	IUFM_Nord		IUFM_Sud		Providence	
	PM modele	PM mesures	PM modele	PM mesures	PM modele	PM mesures
Moyenne Campagne 11-2007	25.43	24.59	25.51	26.61	25.14	21.95
Ecart Relatif pour la moyenne	3.43		4.13		14.54	
Percentile 98	66.38	66.38	67.01	65.32	65.84	63.76
Ecart Relatif pour le percentile	0.00		2.58		3.26	
Biais Fractionnel	0.03		-0.04		0.14	
Moyenne Erreurs Relatives (%)	3.20		23.77		22.99	
Pourcentage dans un facteur 2 (%)	98.61		93.06		94.91	
Pente de la droite de régression du nuage de points	0.96		0.99		0.87	

Tableau 7 : Comparaison statistique modèle-mesure pour les PM₁₀ (µg/m³) sur tous les sites disponibles

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

- Campagne de janvier 2008

→ Dioxyde d'azote

	IUFM_Nord		IUFM_Sud		Providence		Vaise-Marietton	
	NO2_modele	NO2_mesures	NO2_modele	NO2_mesures	NO2_modele	NO2_mesures	NO2_modele	NO2_mesures
Moyenne Campagne 01-2008	43.53	42.24	44.49	45.19	43.14	42.95	69.23	74.48
Ecart Relatif pour la moyenne	3.08		1.55		0.45		7.04	
Percentile 98	102.43	96.31	109.89	98.18	102.20	103.00	171.01	151.32
Ecart Relatif pour le percentile	6.35		11.94		0.77		13.01	
Biais Fractionnel	0.03		-0.02		0.00		-0.07	
Moyenne Erreurs Relatives (%)	21.70		31.18		29.39		36.84	
Pourcentage dans un facteur 2 (%)	94.93		84.48		91.64		88.96	
Pente de la droite de régression du nuage de points	0.89		0.91		0.91		0.93	

Tableau 8: Comparaison statistique modèle-mesure pour le NO₂ (µg/m³) sur tous les sites disponibles

→ Particules

	IUFM_Nord		IUFM_Sud		Providence	
	PM_modele	PM_mesures	PM_modele	PM_mesures	PM_modele	PM_mesures
Moyenne Campagne 01-2008	19.43	19.23	19.71	21.69	19.13	19.10
Ecart Relatif pour la moyenne	1.04		9.13		0.15	
Percentile 98	53.64	53.64	55.92	54.44	53.46	48.00
Ecart Relatif pour le percentile	0.00		2.72		11.37	
Biais Fractionnel	0.01		0.03		0.00	
Moyenne Erreurs Relatives (%)	1.88		20.56		24.16	
Pourcentage dans un facteur 2 (%)	98.81		94.03		94.63	
Pente de la droite de régression du nuage de points	0.99		1.02		0.91	

Tableau 9 : Comparaison statistique modèle-mesure pour les PM₁₀ (µg/m³) sur tous les sites disponibles

Pour l'ensemble des campagnes, l'écart entre la moyenne en NO₂ simulée par le modèle SIRANE et celle provenant des données de capteurs ne dépasse la barre des 20% qu'à deux reprises : au cours de la campagne d'août 2007 pour le capteur IUFM Sud et au cours de la campagne de novembre 2007 pour le capteur Providence. En-dehors de ces périodes, les

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

valeurs simulées sont assez proches des mesures de terrain, avec des écarts de l'ordre de 10%.

L'écart entre moyenne simulée et moyenne mesurée pour les PM₁₀ dépasse les 20% au cours de la seule campagne de mai 2007 au capteur IUFM Sud. En excluant cette valeur, les écarts modèle-mesure sont plus faibles en moyenne que pour le NO₂ avec un maximum à 14.5%.

Les résultats sur les percentiles 98 montrent que le modèle SIRANE marque une tendance très nette à la surestimation des maxima de concentration. Cette surestimation reste modérée dans la plupart des cas (de l'ordre de 10 à 15%) avec quelques pics (en mai 2007 pour les PM₁₀ à IUFM Sud et en novembre 2007 pour le NO₂ à Vaise-Marietton). On remarquera que certains de ces pics apparaissent comme corrélés aux grands écarts de moyenne observés précédemment.

Le capteur IUFM Nord ayant servi de capteur de fond, il est normal que ce soit à ce capteur que l'on trouve les meilleurs résultats statistiques, particulièrement pour les particules, qui sont traitées de manière passive. L'utilisation d'un modèle chimique (cycle de Chapman) pour le calcul de la concentration en NO₂ entraîne des résultats moins satisfaisants.

- Bilan année 2007

→ Dioxyde d'azote

	IUFM Nord		IUFM Sud		Providence		Vaise-Marietton	
	NO2 modele	NO2 mesures	NO2 modele	NO2 mesures	NO2 modele	NO2 mesures	NO2 modele	NO2 mesures
Moyenne annuelle	30.14	30.70	31.24	35.12	30.18	36.31	57.25	57.24
Ecart Relatif pour la moyenne	1.83		11.04		16.87		0.01	
Percentile 98	96.18	88.13	99.11	85.00	95.84	119.00	167.98	130.90
Ecart Relatif pour le percentile	9.14		16.60		19.47		28.33	
Biais Fractionnel	-0.02		-0.12		-0.18		0.00	
Moyenne Erreurs Relatives (%)	30.72		46.95		46.14		48.11	
Pourcentage dans un facteur 2 (%)	85.83		76.31		76.53		75.58	
Pente de la droite de régression du nuage de points	0.90		0.90		1.07		0.81	

Tableau 10 : Comparaison statistique modèle-mesure pour le NO₂ (µg/m³) sur tous les sites disponibles

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

→ Particules

	IUFM Nord		IUFM Sud		Providence	
	PM_modele	PM_mesures	PM_modele	PM_mesures	PM_modele	PM_mesures
Moyenne annuelle	22.79	22.45	22.98	21.46	22.66	20.97
Ecart Relatif pour la moyenne	1.49		6.61		7.44	
Percentile 98	66.50	66.50	67.65	60.00	67.15	63.00
Ecart Relatif pour le percentile	0.00		11.31		6.18	
Biais Fractionnel	0.02		0.07		0.08	
Moyenne Erreurs Relatives (%)	1.73		25.72		18.12	
Pourcentage dans un facteur 2 (%)	99.13		93.97		96.51	
Pente de la droite de régression du nuage de points	0.98		0.87		0.90	

Tableau 11 : Comparaison statistique modèle-mesure pour les PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur tous les sites disponibles

La durée de moyennage choisie (l'équivalent d'une "année" formée par la concaténation des quatre périodes 2007-2008) étant bien plus longue que chaque campagne prise séparément, on assiste à un lissage des résultats. Ce lissage a pour conséquence de meilleurs résultats sur les moyennes annuelles, où effets de surestimation et de sous-estimation propres à chaque campagne peuvent s'atténuer mutuellement. Les résultats de NO_2 en moyenne annuelle sur le capteur Vaise-Marietton (Tableau 10) illustrent bien cette situation. L'écart relatif maximal sur la moyenne enregistré pour le NO_2 est de 16.8% au capteur Providence (contre un maximum de 37.4% pour la campagne de novembre 2007) et de 7.4% pour les PM_{10} à ce même capteur (contre un maximum de 31.7% pour la campagne de mai 2007).

Les autres paramètres statistiques conservent les ordres de grandeur observés pour chaque campagne.

4.2 COMPARAISON DES SIMULATIONS ET DES MESURES DE TUBES PASSIFS POUR LE DIOXYDE D'AZOTE

Durant l'année 2007, quatre campagnes de tubes ont été effectuées par COPARLY dans le quartier de la Croix-Rousse. Chacune de ces campagnes a mis en jeu environ 70 tubes et a permis de recueillir des données moyennes de concentration en NO_2 sur les quatre périodes de quinze jours. La Figure 61 spécifie l'emplacement des différents tubes au sein du quartier. Les graphes suivants comparent les résultats du modèle SIRANE et les données de tube pour chacune des campagnes (chacun des tubes gardant le même emplacement d'une campagne sur l'autre). La Figure 62 présente les résultats des comparaisons modèle-mesure pour chacune des campagnes de mesure.

Localisation tubes passifs NO_2

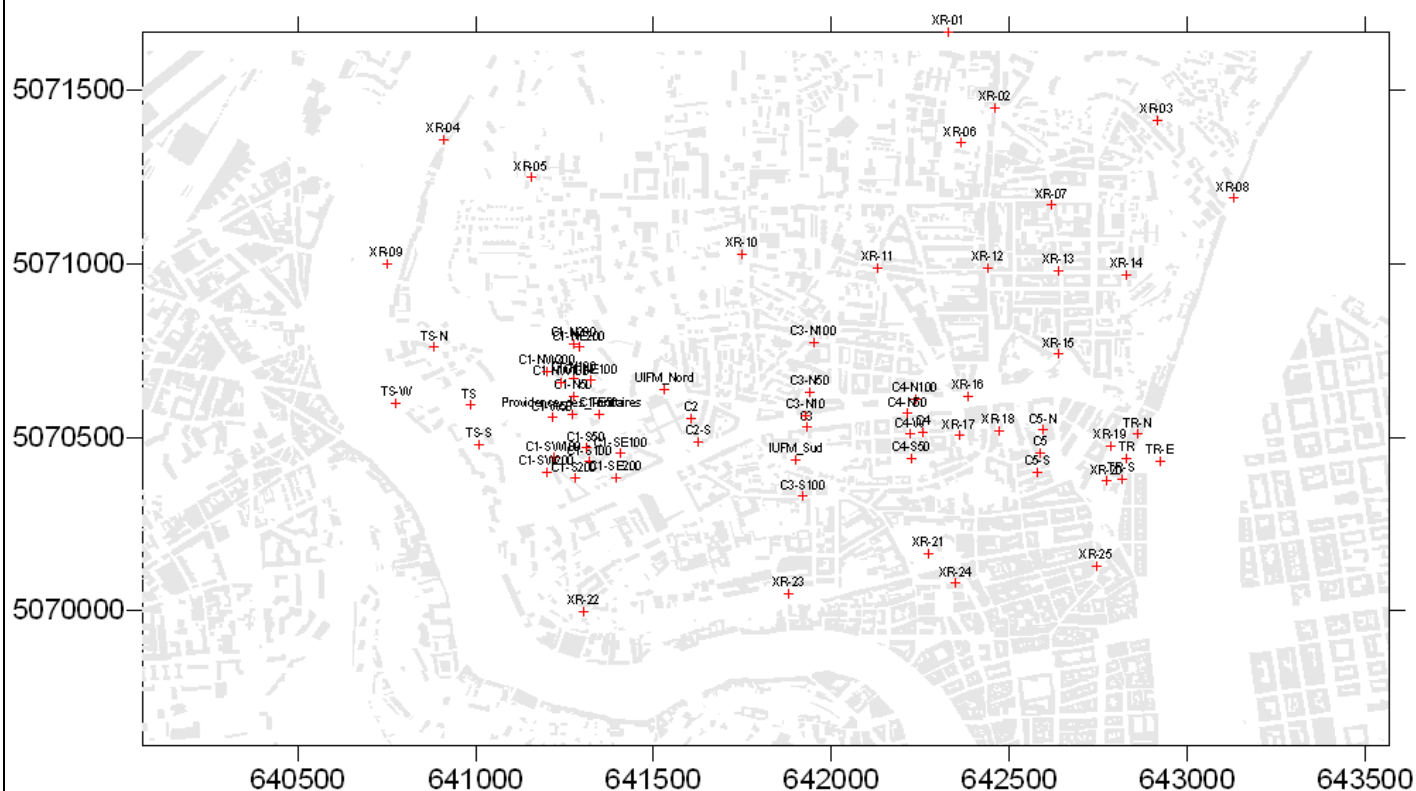
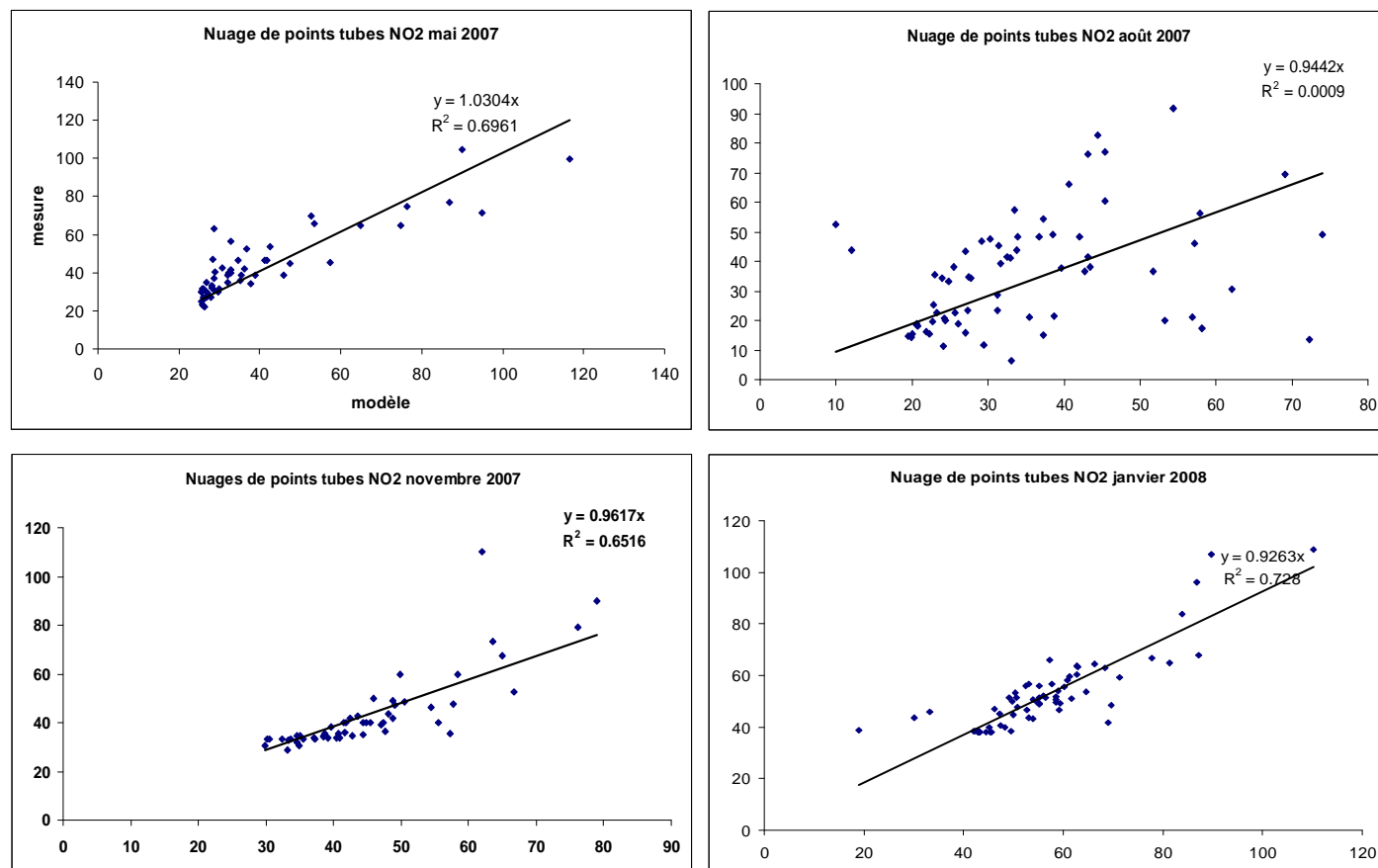


Figure 61 : Répartition des points de mesure par tubes passifs dans le quartier de la Croix-Rousse

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

Figure 62 : Comparaisons modèle-mesure pour les quatre campagnes de tubes passifs NO₂

	Campagne mai 2007	Campagne août 2007	Campagne novembre 2007	Campagne janvier 2008
Moyenne des erreurs relatives	17.05%	35.65%	12.23%	13.35%

Tableau 12 : Moyenne des erreurs relatives lors de la comparaison modèle-mesure pour les tubes passifs NO₂

En chacun des points de mesure, les résultats du modèle dans un rayon de dix mètres ont été sélectionnés, afin de vérifier que l'ordre de grandeur correspondant à la concentration mesurée était bien atteint au voisinage du point de calcul. C'est cette valeur la plus proche qui est présentée sur les graphes ci-dessus.

On observe pour l'ensemble des campagnes un étalement conséquent du nuage de points autour de la pente moyenne, particulièrement pour la campagne d'août 2007 (marquée par la fermeture du tunnel). Celle-ci reste malgré tout proche de 1.0 pour toutes les campagnes. Mis à part la campagne de mai 2007, on remarquera que le modèle a globalement tendance à sous-estimer les mesures.

La moyenne des erreurs relatives pour chaque campagne oscille autour de 15% à l'exception de la campagne d'août (35.65%).

Les écarts maximaux enregistrés proviennent principalement des points de mesure situés à proximité des têtes de tunnel (tubes TR, TR-E, TR-S, TR-N, TS, TS-W, TS-N, TS-S visibles

Figure 61) là où les gradients de concentration sont les plus forts. En ces points, il ne se dégage pas de tendance claire vers une surestimation ou une sous-estimation de la part du modèle.

5 CALCUL DES CARTES DE CHAMPS DE CONCENTRATION SUR LE QUARTIER DE LA CROIX-ROUSSE

Le modèle SIRANE permet de calculer le champ de concentration d'un polluant donné sur la zone définie par l'utilisateur, avec une précision également définie par l'utilisateur. Les cartes suivantes représentent les concentrations moyennes annuelles en NO₂ et particules sur le quartier de la Croix-Rousse pour les quatre campagnes menées dans le courant de l'année 2007, ainsi que pour un scénario prospectif à l'horizon 2013. De même, des cartographies moyennes à l'échelle de l'année sont également présentées. Pour chaque polluant, une cartographie de l'agglomération d'une résolution de 10m est représentée (Figure 63 à Figure 93).

Pour la modélisation prospective, deux scénarios prospectifs ont été retenus :

- Un scénario d'évolution dit "au fil de l'eau" où l'évolution du parc automobile est prise en compte via un nouveau réseau d'émission sur les brins trafic, et un coefficient multiplicateur spécifique à chaque espèce est appliqué sur chacune des 7 sources ponctuelles formées par les deux têtes de tunnel et les cinq cheminées d'extraction.
- Un scénario prenant en compte une rénovation du tunnel. Cette rénovation impacte principalement les cheminées d'extraction, car les ventilateurs de celles-ci sont supposés être à registres fermés. Par conséquent, seules les têtes de tunnel deviennent émettrices, et les coefficients cités précédemment restent appliqués. L'évolution du parc automobile est prise en compte de la même manière que précédemment.

Ainsi, pour chaque polluant seront présentées :

- Une cartographie de la concentration moyenne sur le quartier pour une campagne donnée.
- Une cartographie de la concentration moyenne sur le quartier pour la même période temporelle, mais dans le cadre du premier scénario prospectif 2013.
- Une cartographie d'écart relatif entre l'état actuel (2007) et le premier scénario prospectif 2013, afin de visualiser les zones d'impact des changements proposés.

Pour des raisons de similarité de cartographies entre les scénarios prospectifs (comme le montre la cartographie d'écart relatif entre les deux scénarios Figure 66), seules les cartographies correspondant au premier scénario prospectif seront présentées.

5.1 CAMPAGNE DE MAI 2007

5.1.1 DIOXYDE D'AZOTE

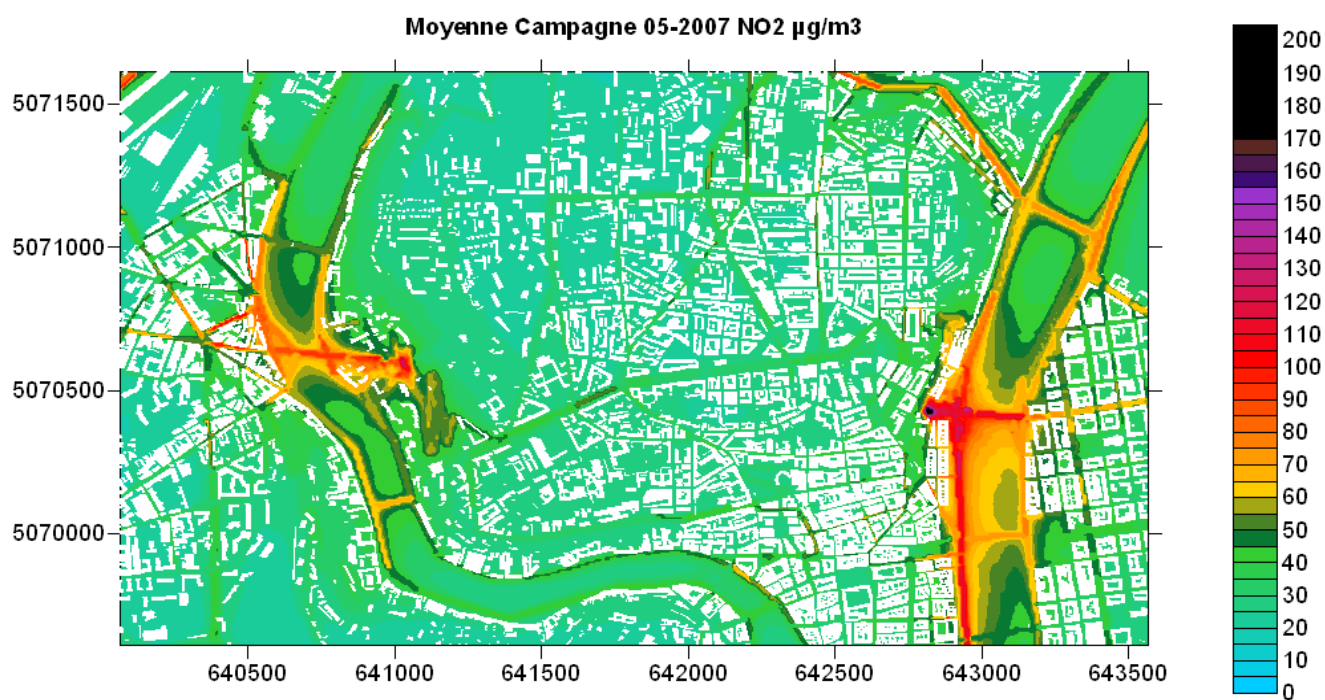


Figure 63 : Champ de concentration moyenne en NO₂ (µg/m³) pour la période de mai 2007

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

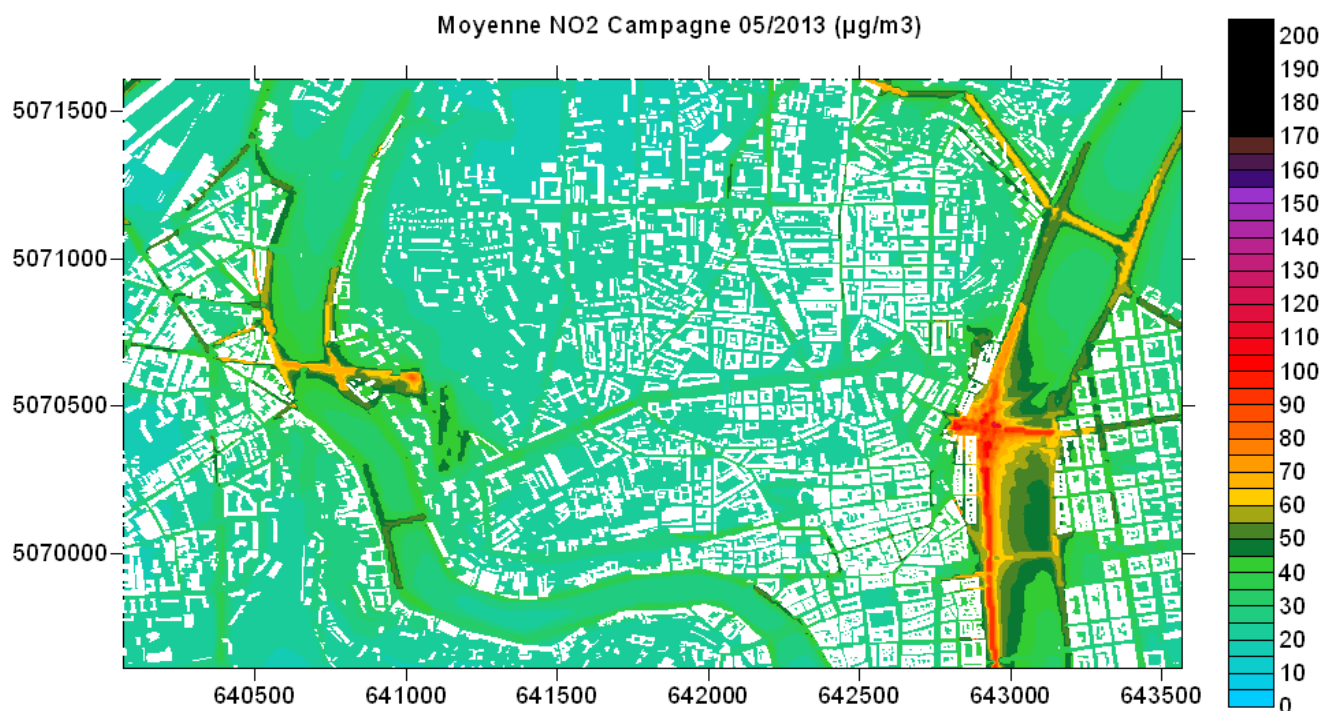


Figure 64 : Champ de concentration moyenne en NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période de mai 2013

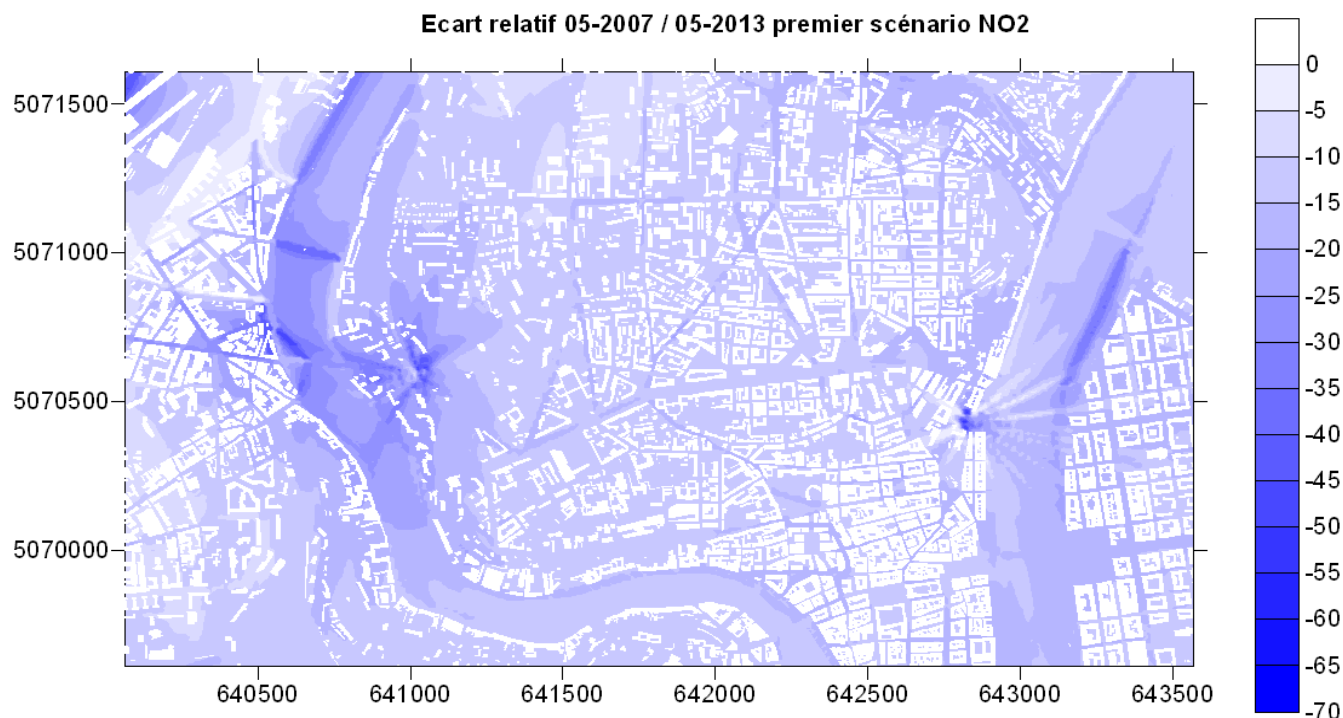


Figure 65 : Ecart relatif entre l'état 2007 et le premier scénario prospectif 2013 pour le NO₂ (en %)

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

La Figure 66 présente la cartographie d'écart relatif entre le premier scénario prospectif 2013 et le deuxième scénario. On observe une diminution de 1 à 2% de la concentration au voisinage immédiat des cheminées entre le premier et le deuxième scénario. Cet écart tombe à 0.8% max dans un rayon d'environ 50m autour des cheminées, et à 0.2% dans un rayon de 150m. L'écart est nul partout ailleurs.

Ce résultat, observé quel que soit le polluant, montre clairement que les deux scénarios prospectifs sont quasi-similaires en termes d'impact sur le quartier. Seul le voisinage immédiat des cheminées d'extraction enregistre une différence minimale. Le fait que les deux scénarios utilisent la même évolution du parc automobile, et les mêmes coefficients sur les têtes de tunnel semble justifier ce résultat. Par conséquent, dans la suite de cette étude, seules les cartographies correspondant au premier scénario prospectif seront présentées, les cartographies du deuxième scénario étant strictement similaires en termes d'échelle de couleur.

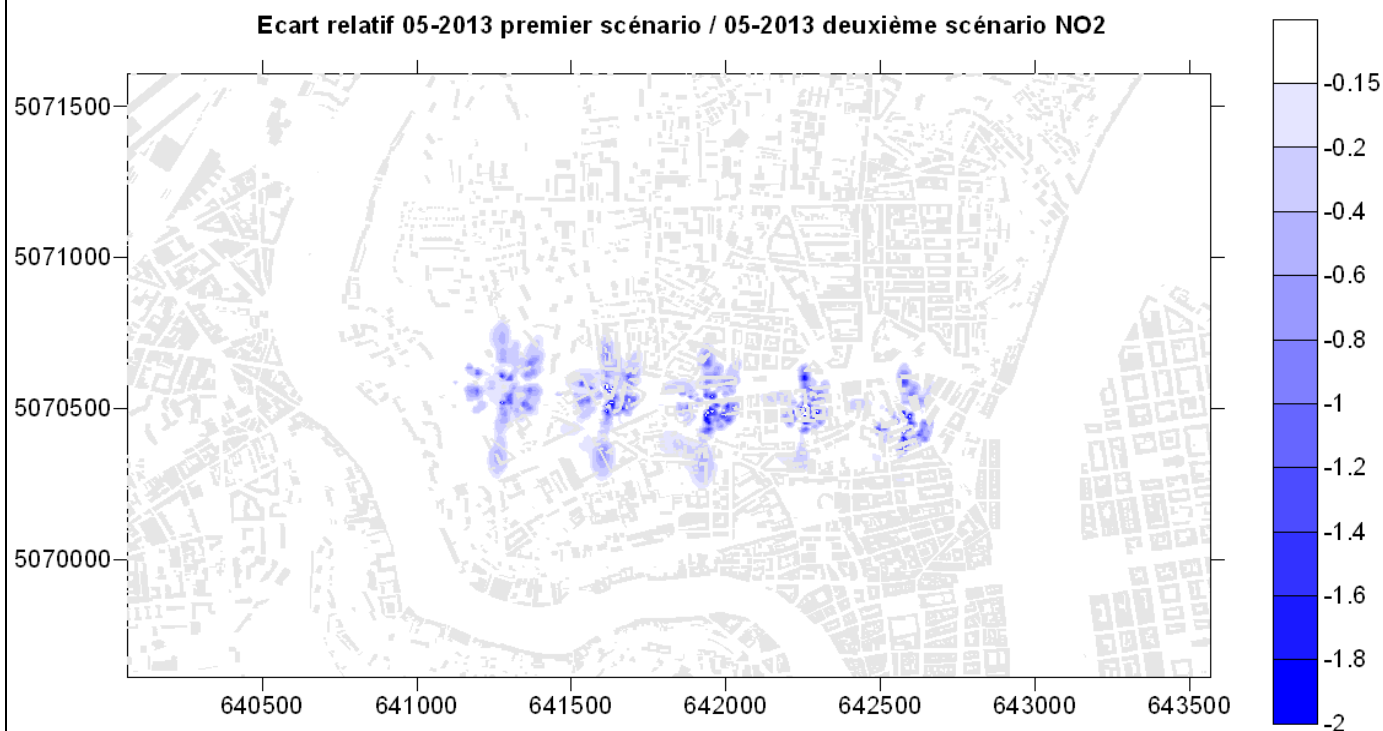


Figure 66 : Ecart relatif entre le premier et le deuxième scénario prospectif 2013 pour le NO₂ (en %)

5.1.2 PARTICULES

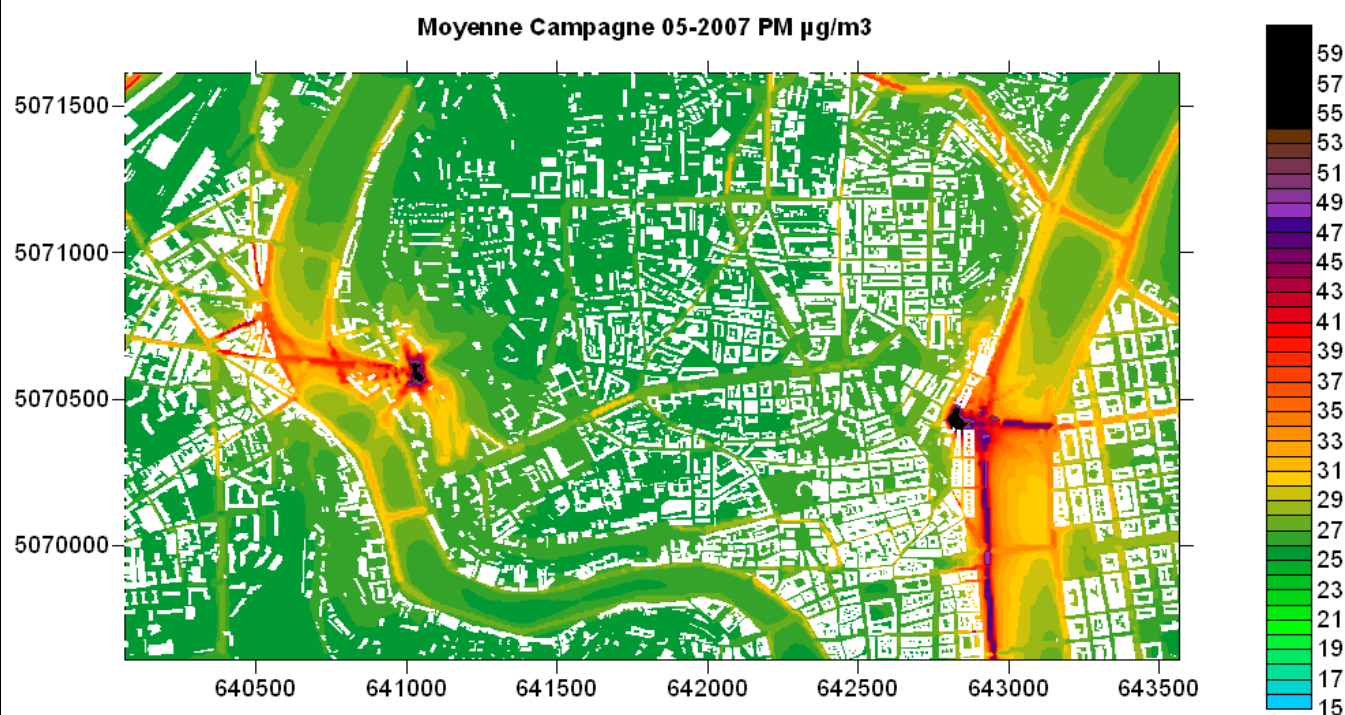


Figure 67 : Champ de concentration moyenne en PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période de mai 2007

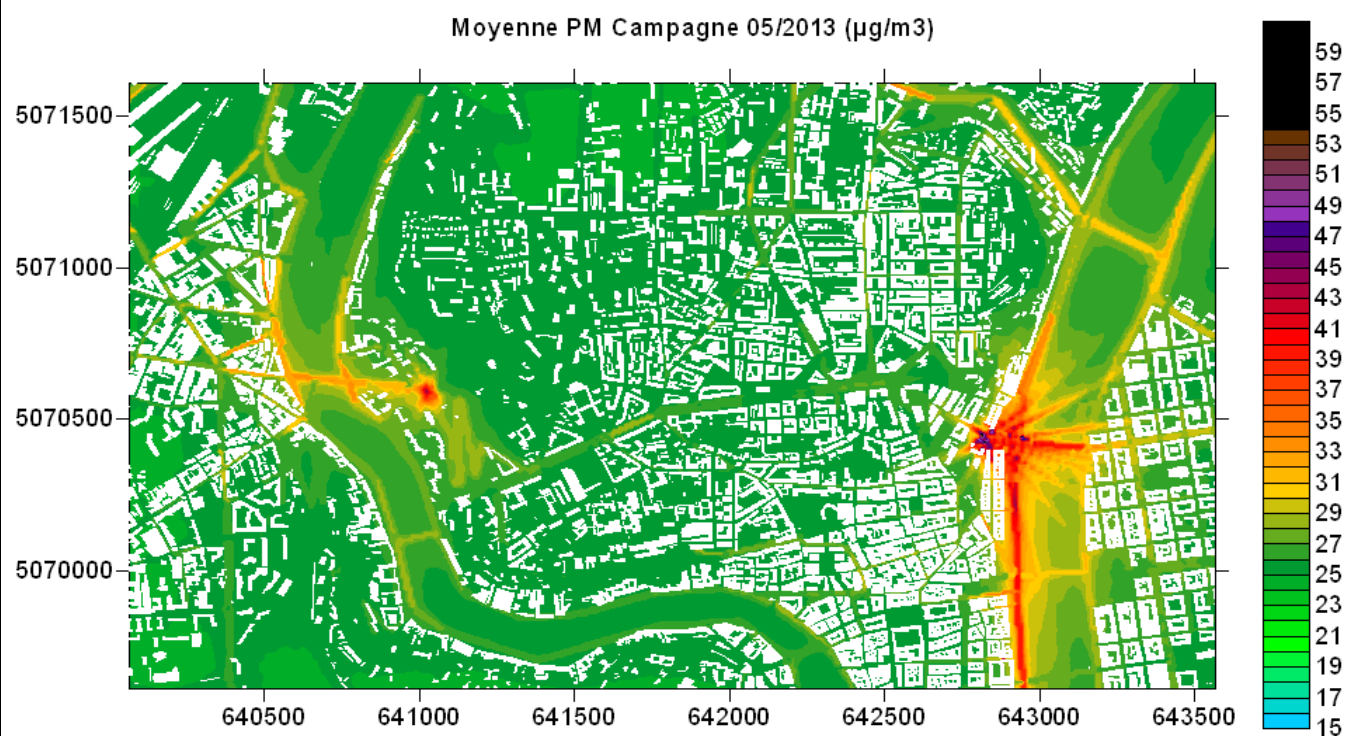


Figure 68 : Champ de concentration moyenne en PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période de mai 2013

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

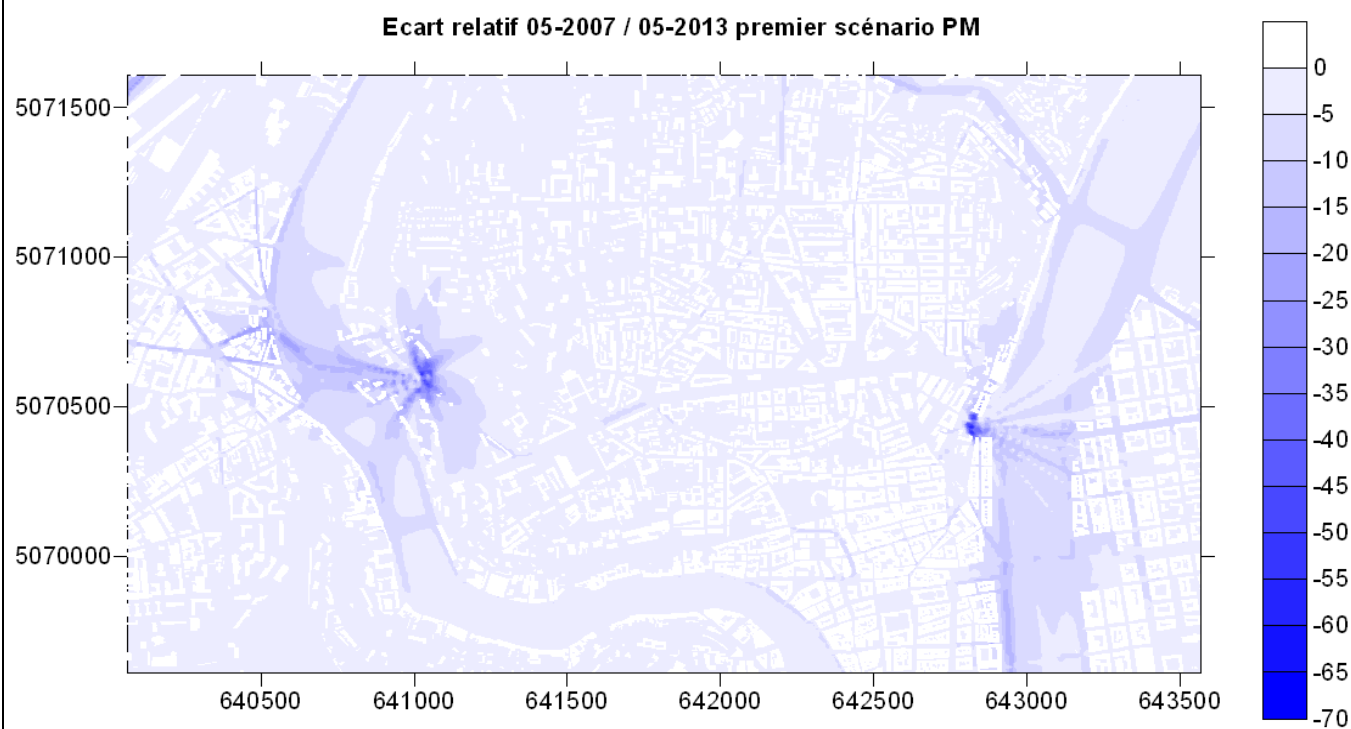


Figure 69 : Ecart relatif entre l'état 2007 et le premier scénario prospectif 2013 pour les PM₁₀ (en %)

5.2 CAMPAGNE D'AOUT 2007

5.2.1 DIOXYDE D'AZOTE

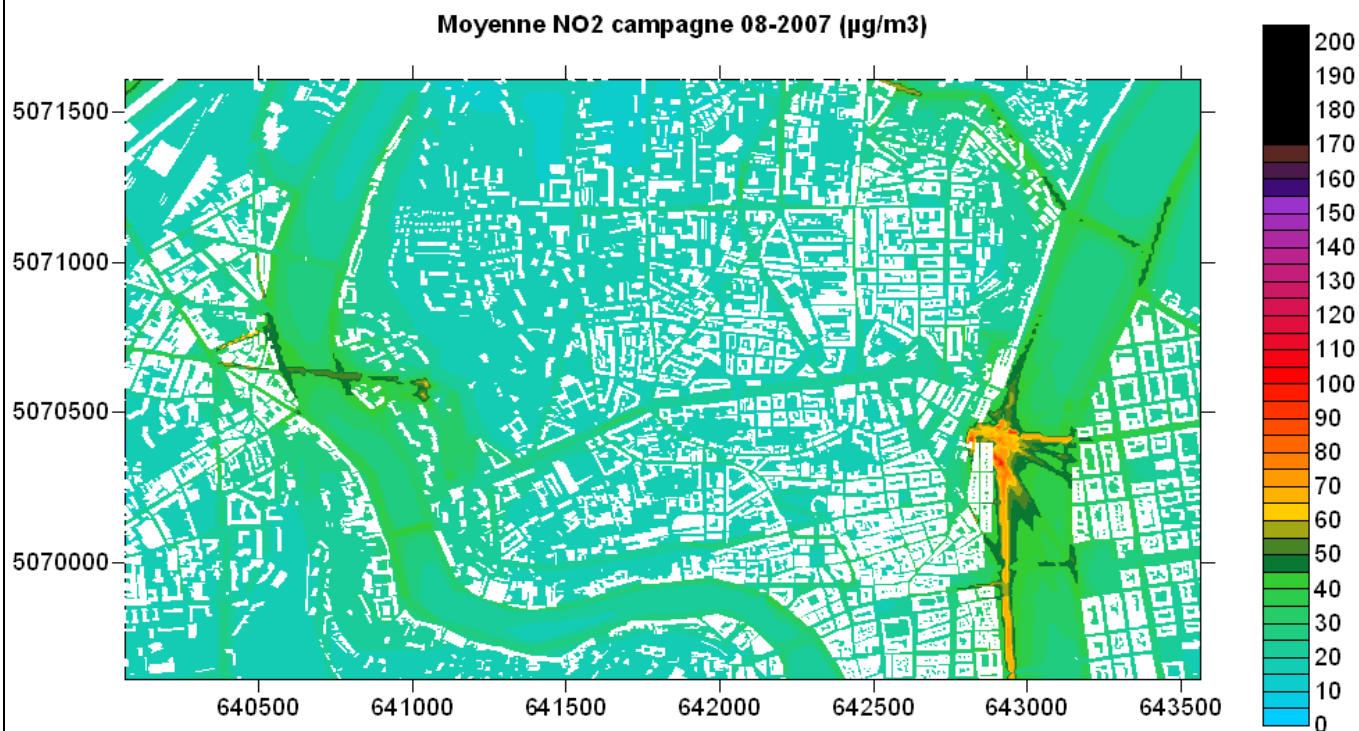


Figure 70 : Champ de concentration moyenne en NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période d'août 2007

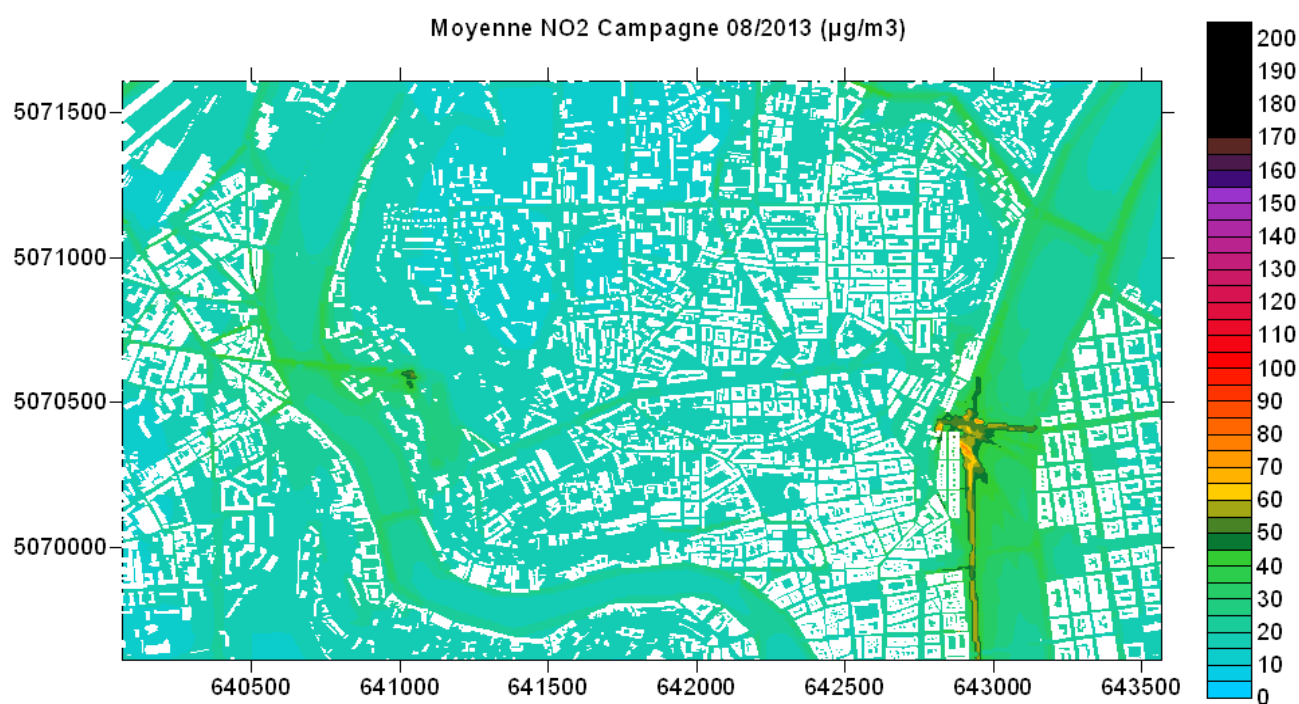


Figure 71 : Champ de concentration moyenne en NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période d'août 2013

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

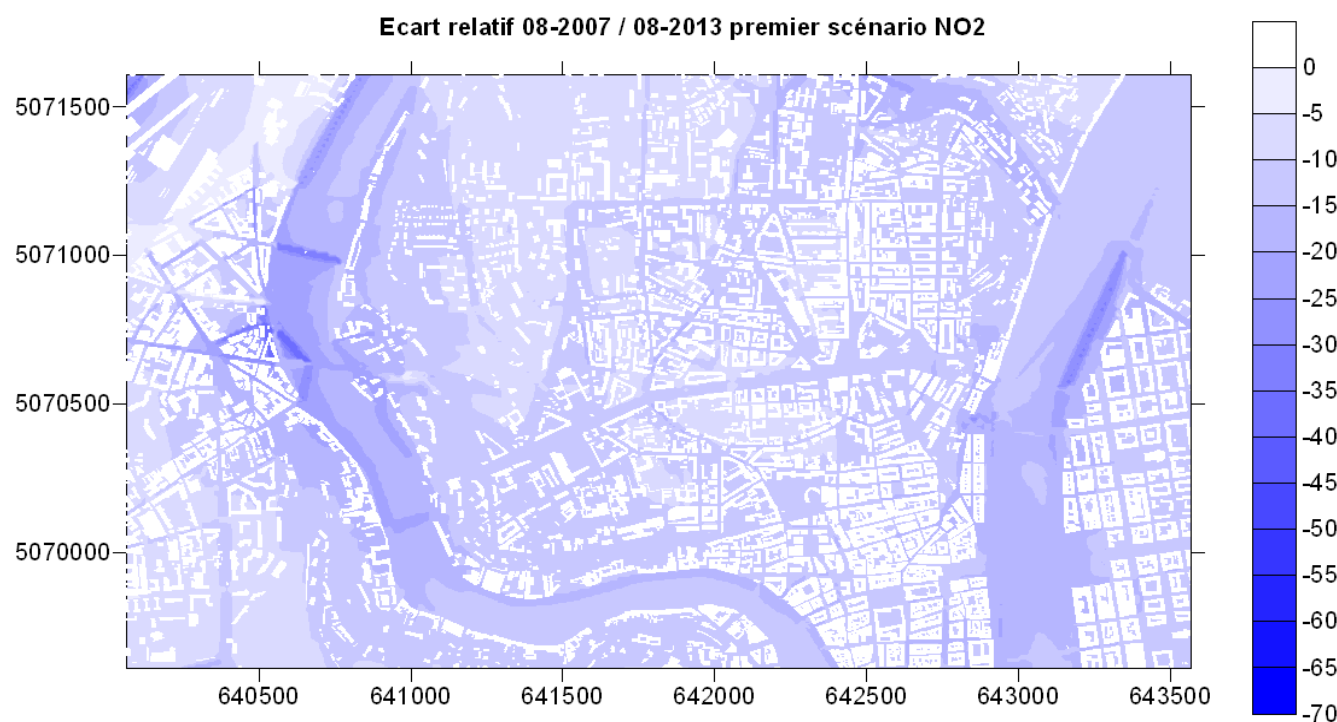


Figure 72 : Ecart relatif entre l'état 2007 et le premier scénario prospectif 2013 pour le NO₂

5.2.2 PARTICULES

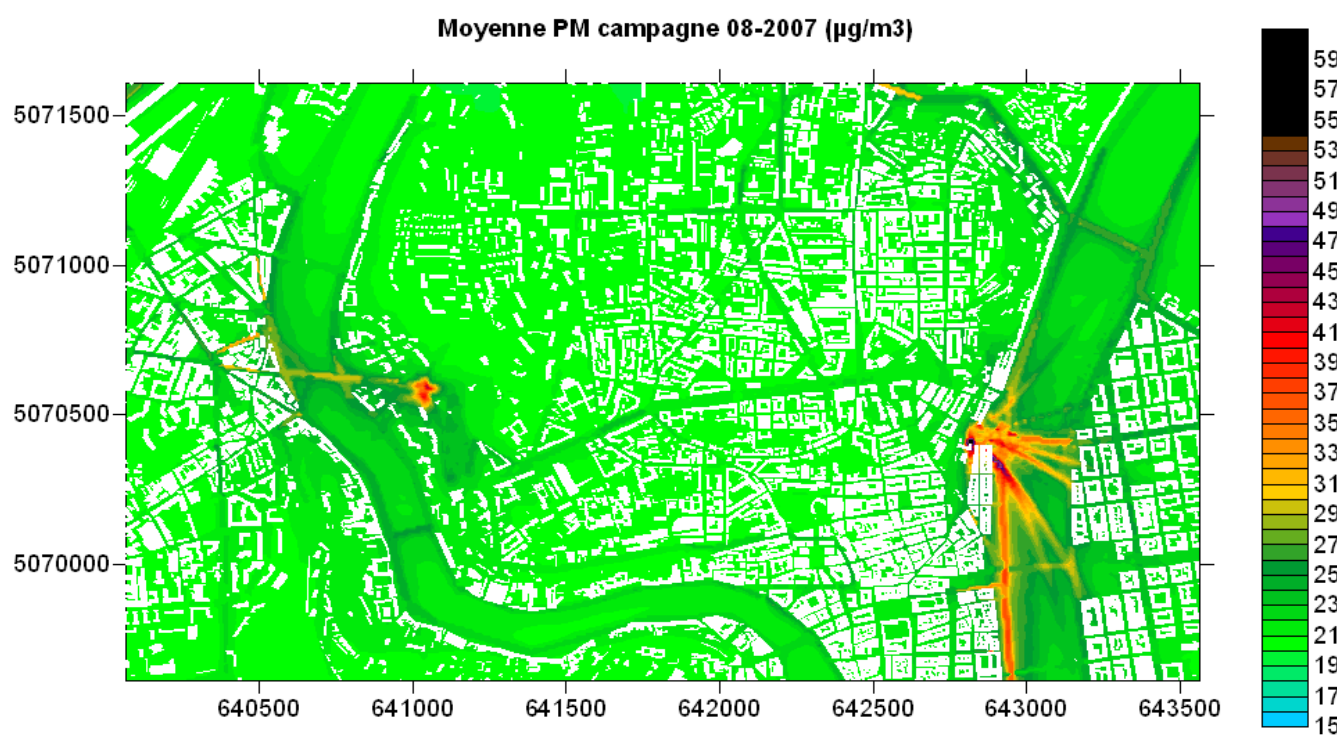
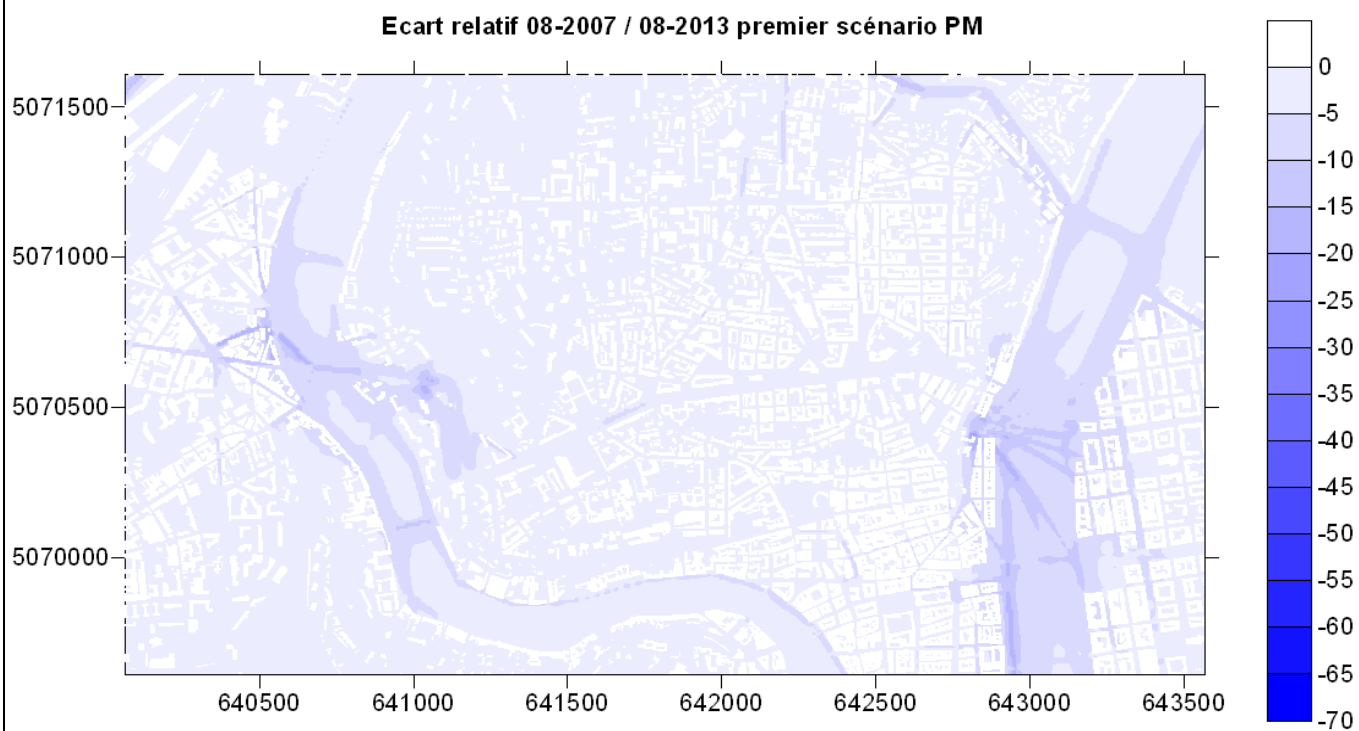
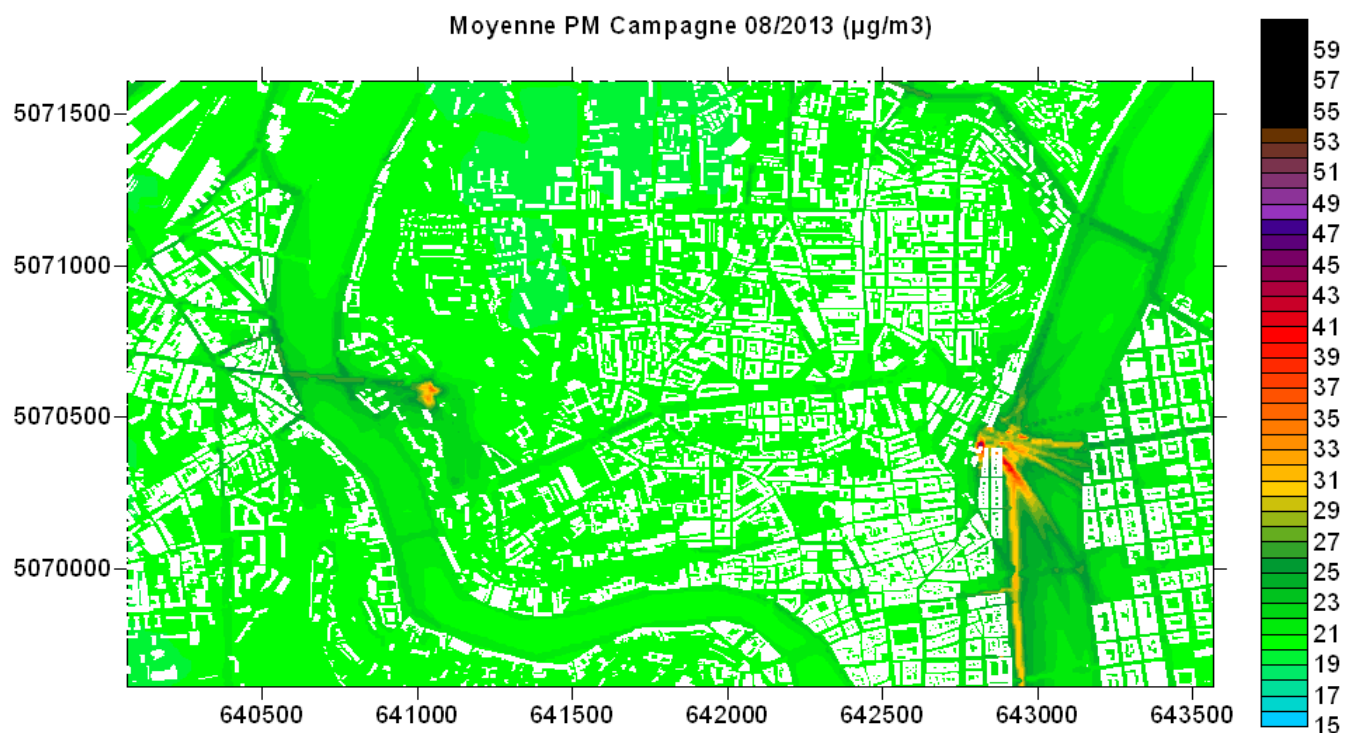


Figure 73 : Champ de concentration moyenne en NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période d'août 2007

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse



5.3 CAMPAGNE DE NOVEMBRE 2007

5.3.1 DIOXYDE D'AZOTE

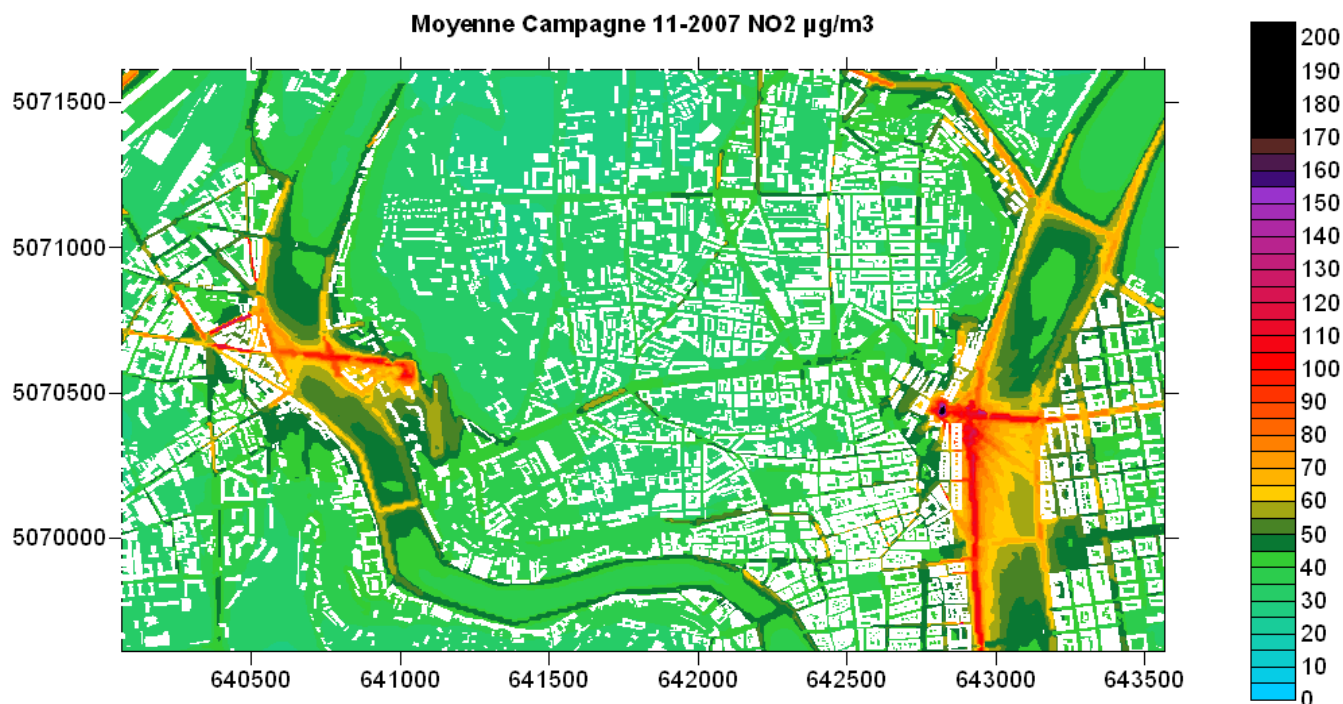


Figure 76 : Champ de concentration moyenne en NO₂ (µg/m³) pour la période de novembre 2007

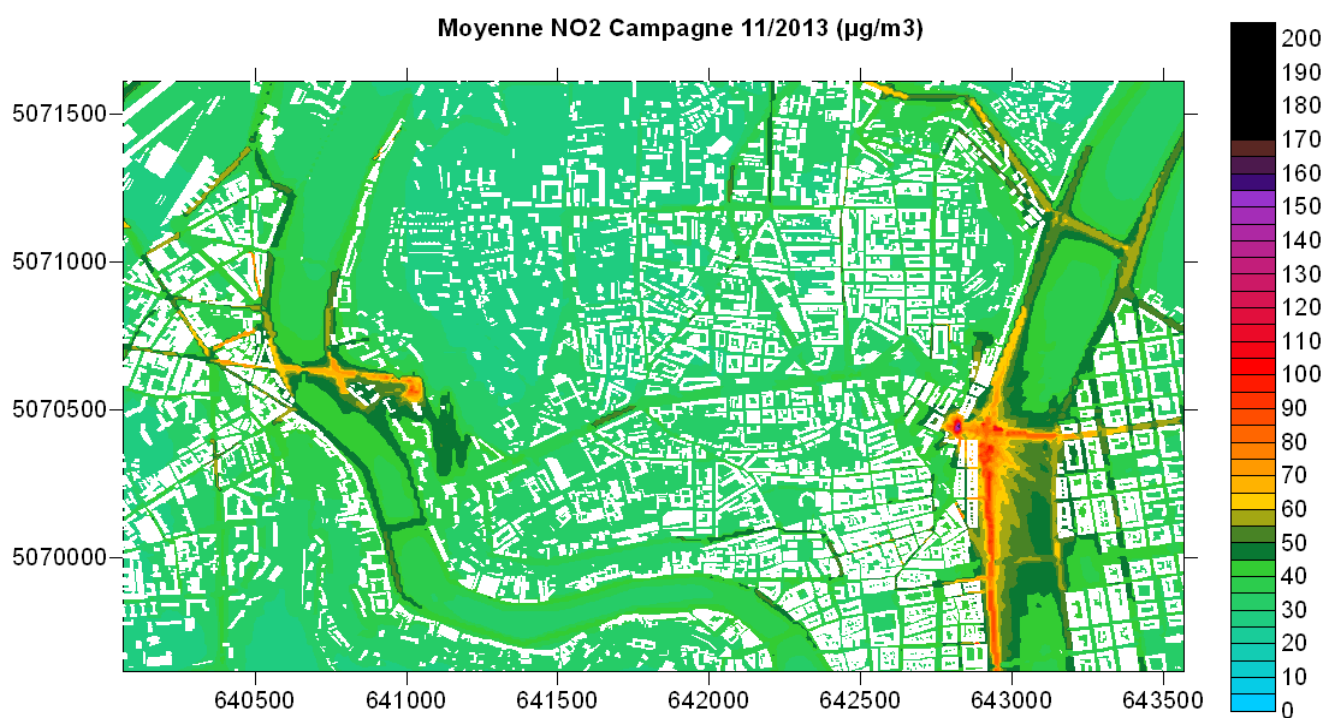


Figure 77 : Champ de concentration moyenne en NO₂ (µg/m³) pour la période de novembre 2013

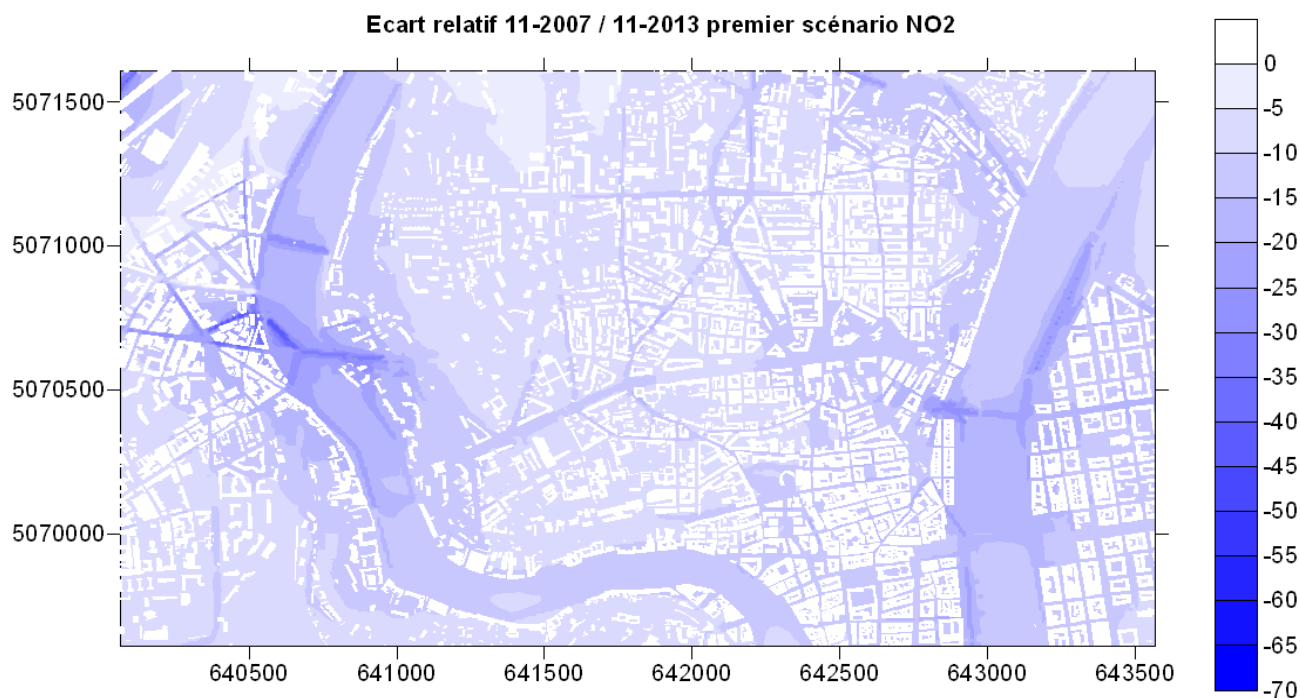


Figure 78 : Ecart relatif entre l'état actuel et le premier scénario prospectif 2013 pour le NO₂

5.3.2 PARTICULES

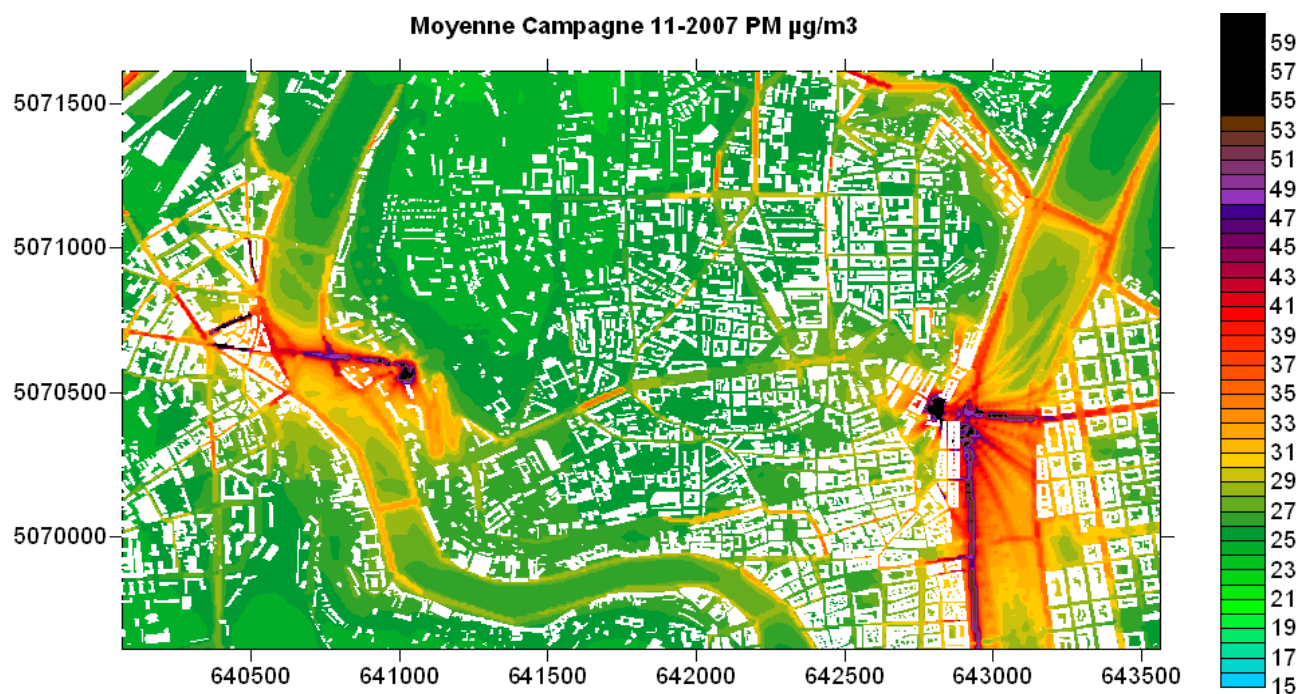


Figure 79 : Champ de concentration moyenne en PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période de novembre 2007

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

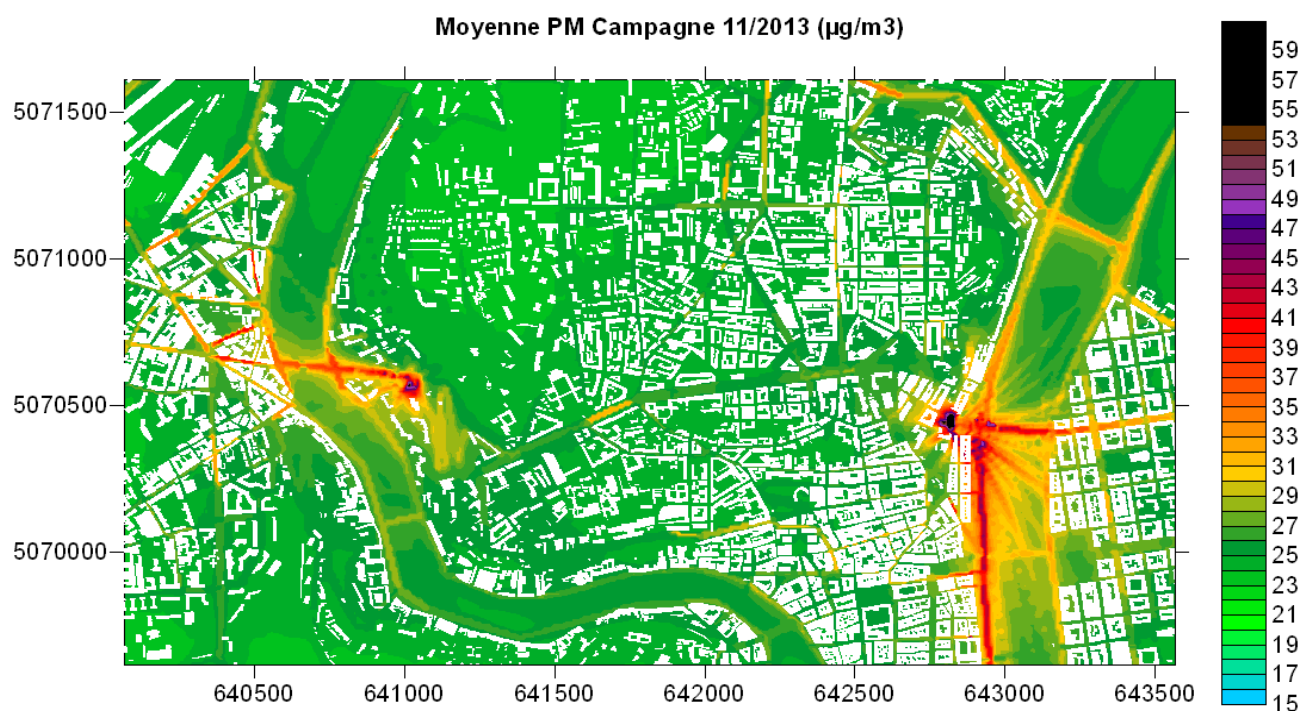


Figure 80 : Champ de concentration moyenne en PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période de novembre 2013

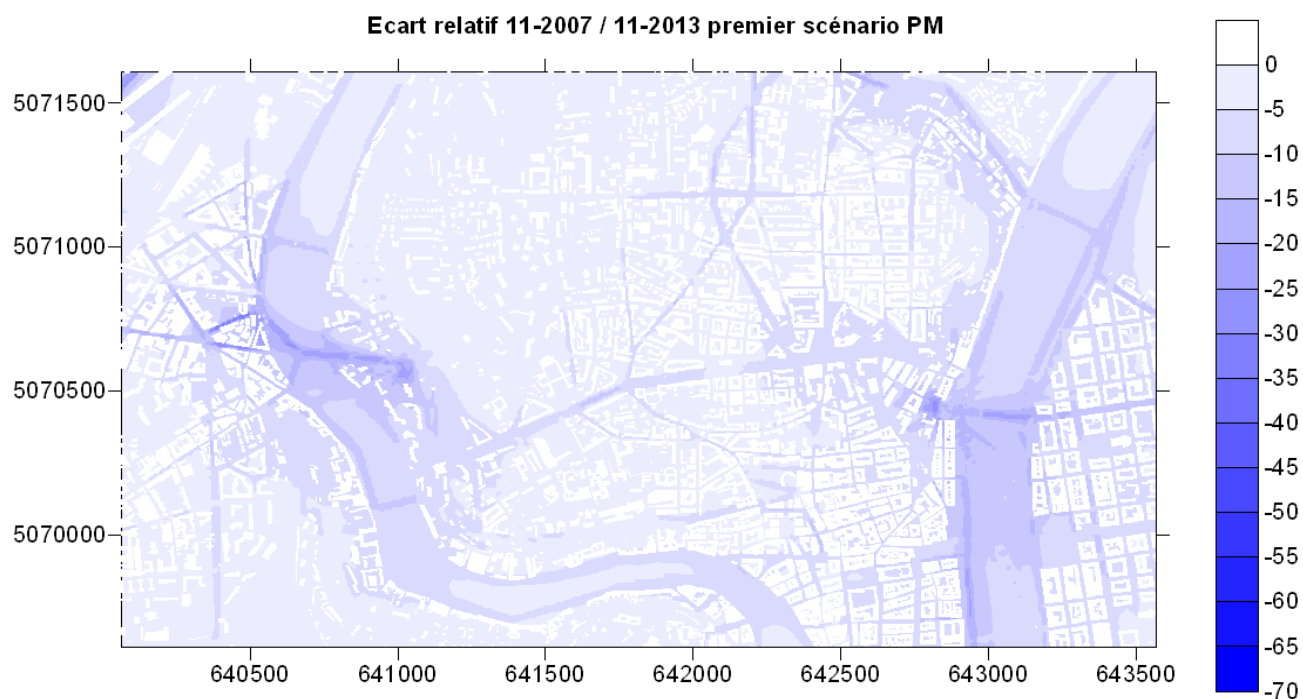


Figure 81 : Ecart relatif entre l'état actuel et le premier scénario prospectif 2013 pour les PM_{10}

5.4 CAMPAGNE DE JANVIER 2008

5.4.1 DIOXYDE D'AZOTE

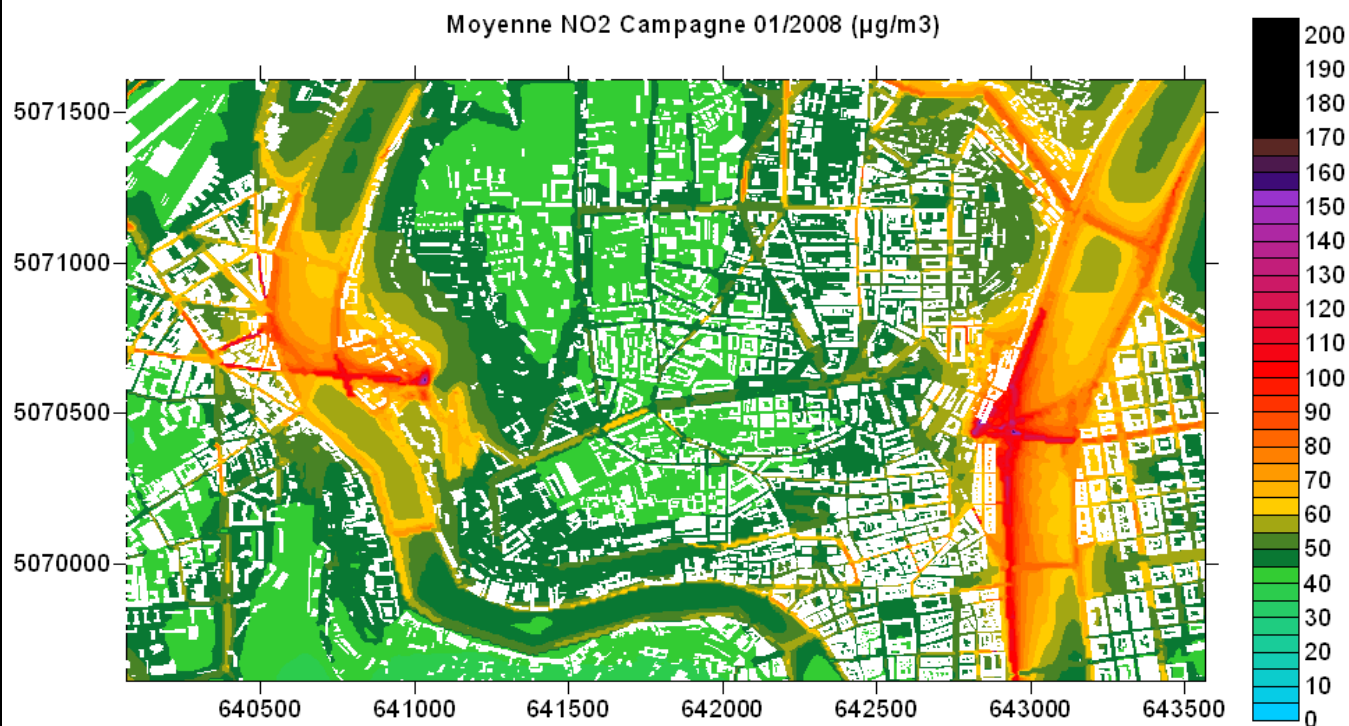


Figure 82 : Champ de concentration moyenne en NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période de janvier 2008

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

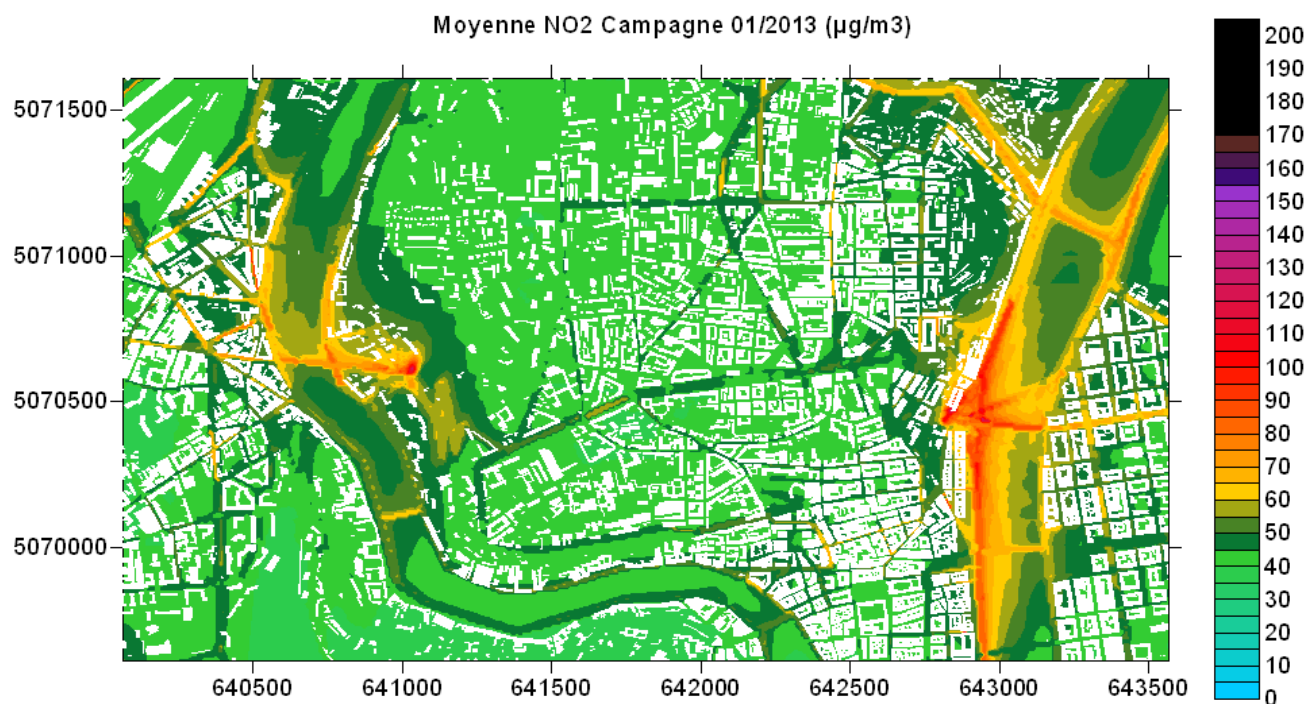


Figure 83 : Champ de concentration moyenne en NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période de janvier 2013

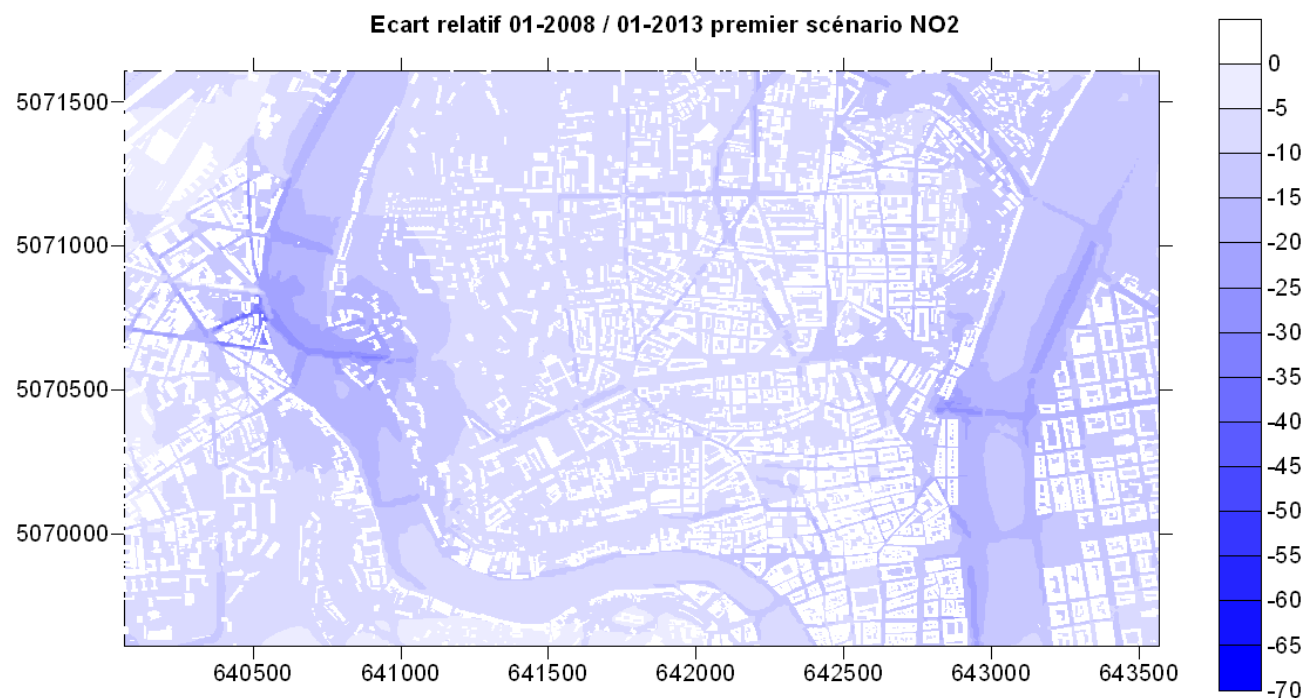


Figure 84 : Ecart relatif entre état actuel et premier scénario prospectif 2013 pour le NO₂

5.4.2 PARTICULES

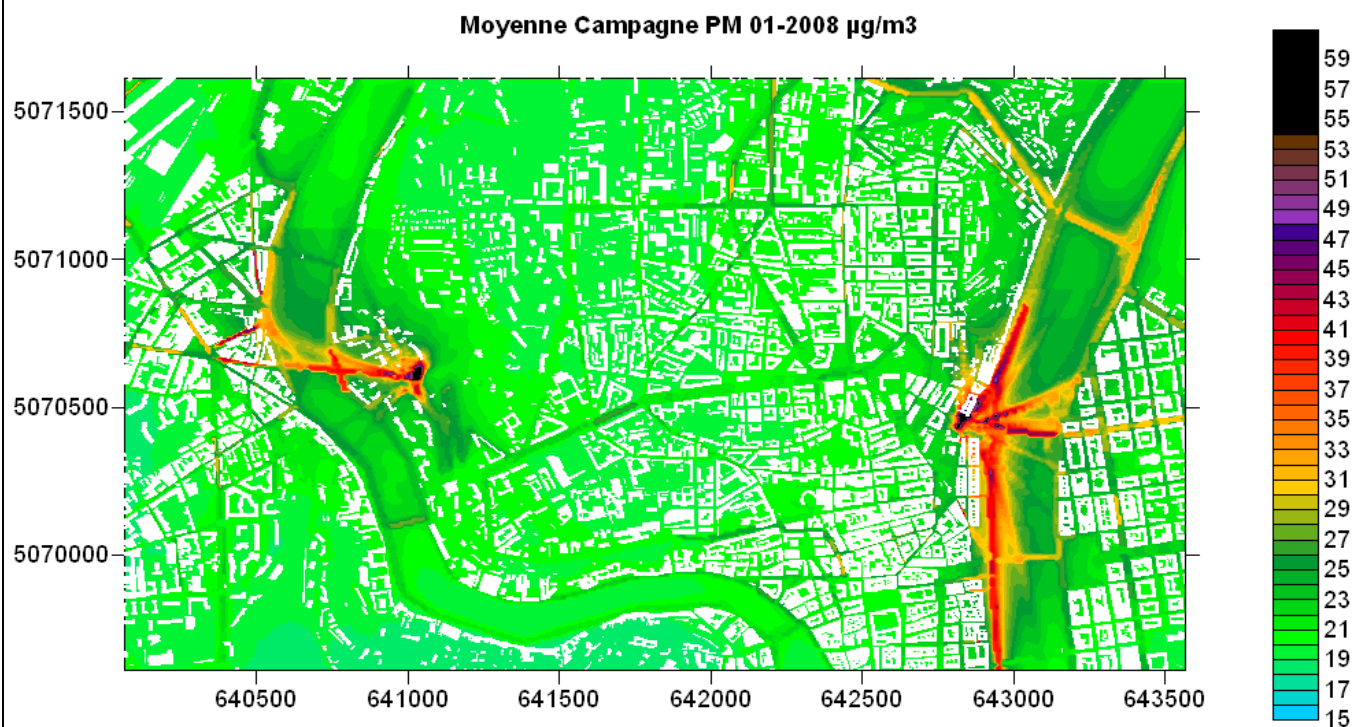


Figure 85 : Champ de concentration moyenne en PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période de janvier 2008

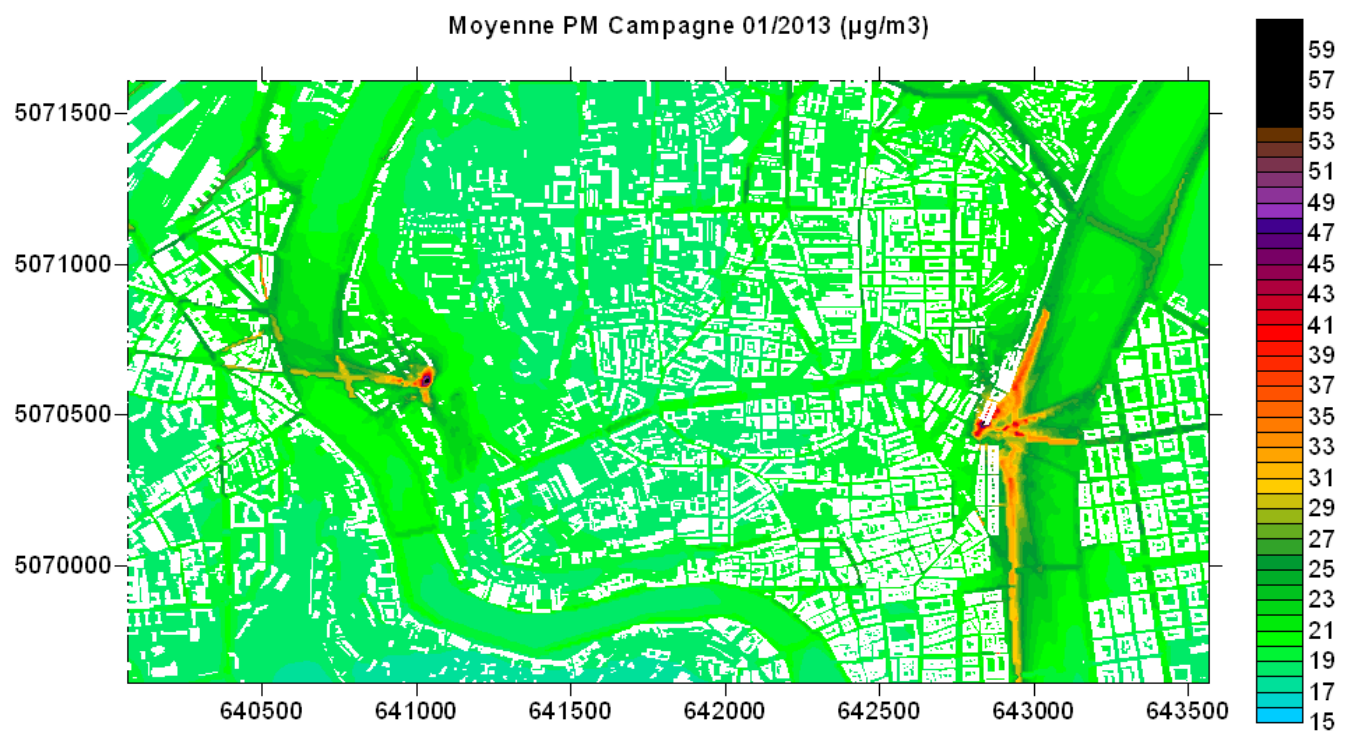


Figure 86 : Champ de concentration moyenne en PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période de janvier 2008

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

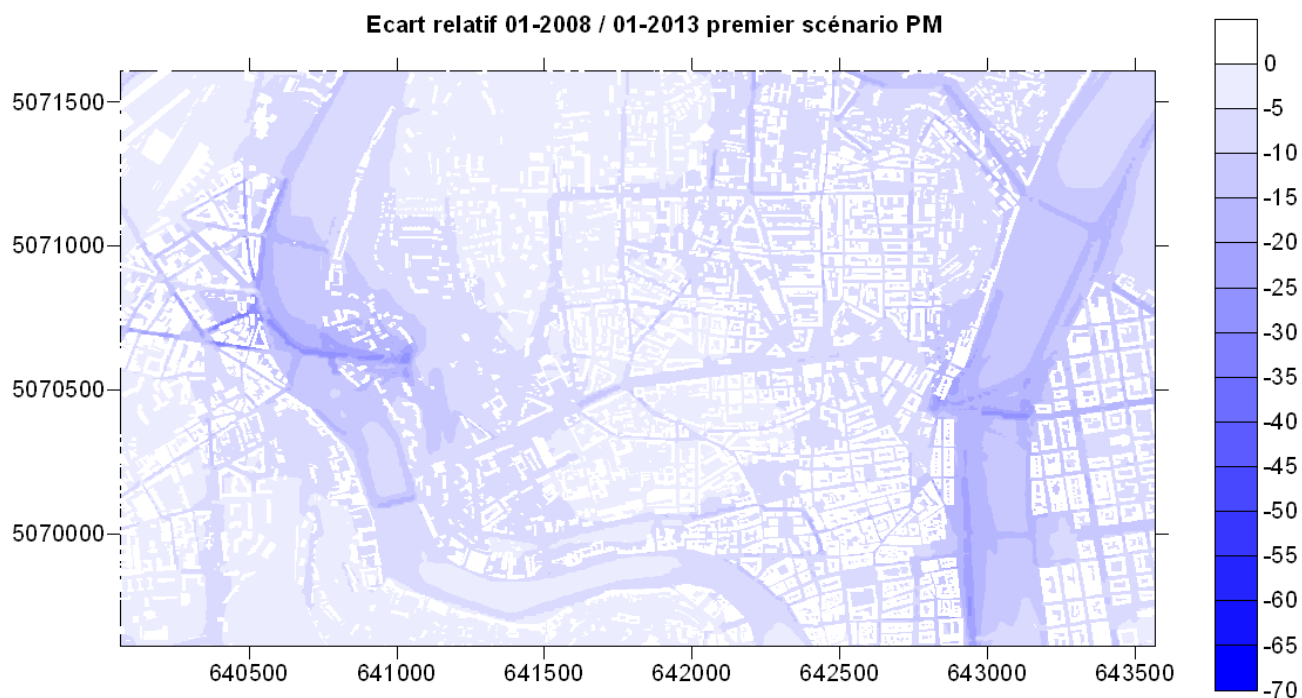


Figure 87 : Ecart relatif entre l'état actuel et le premier scénario prospectif 2013 pour les PM₁₀

5.5 CARTOGRAPHIES ANNUELLES

5.5.1 DIOXYDE D'AZOTE

Moyenne annuelle NO₂ 2007 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

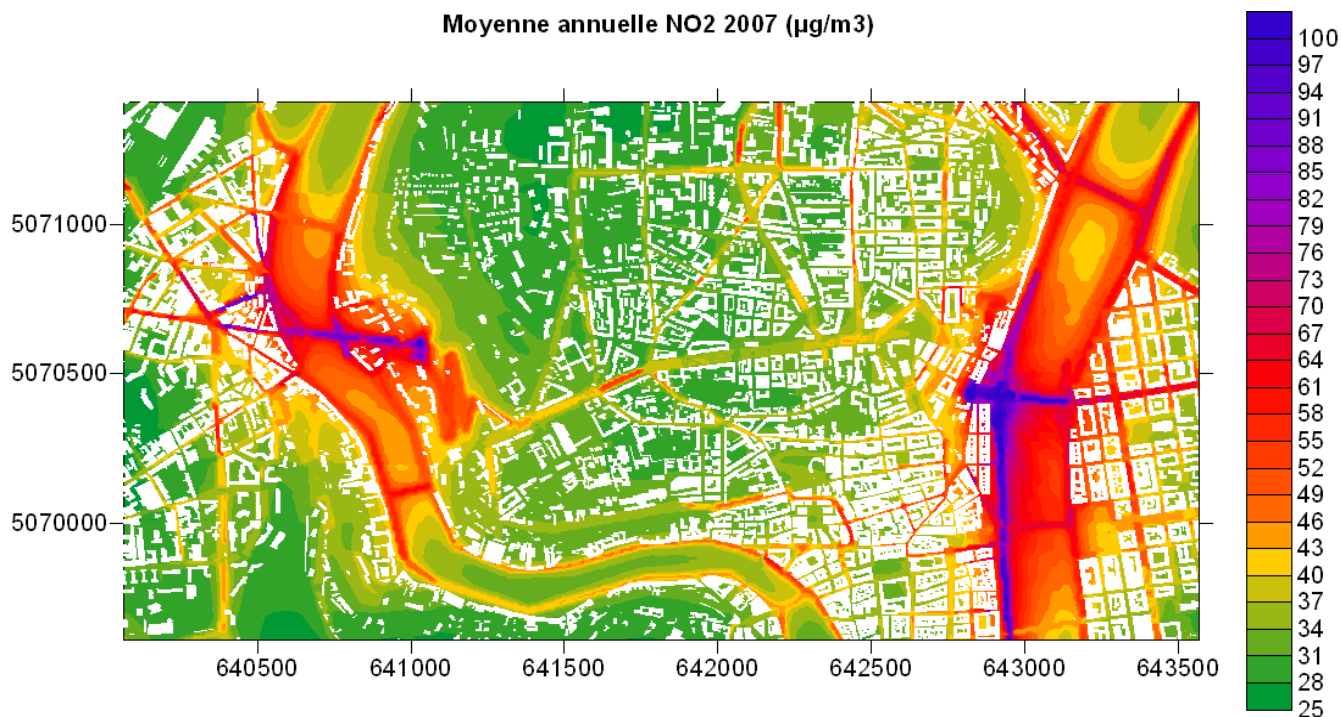


Figure 88 : Champ de concentration moyenne en NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur l'année 2007

Moyenne annuelle NO₂ 2013 1er scénario ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

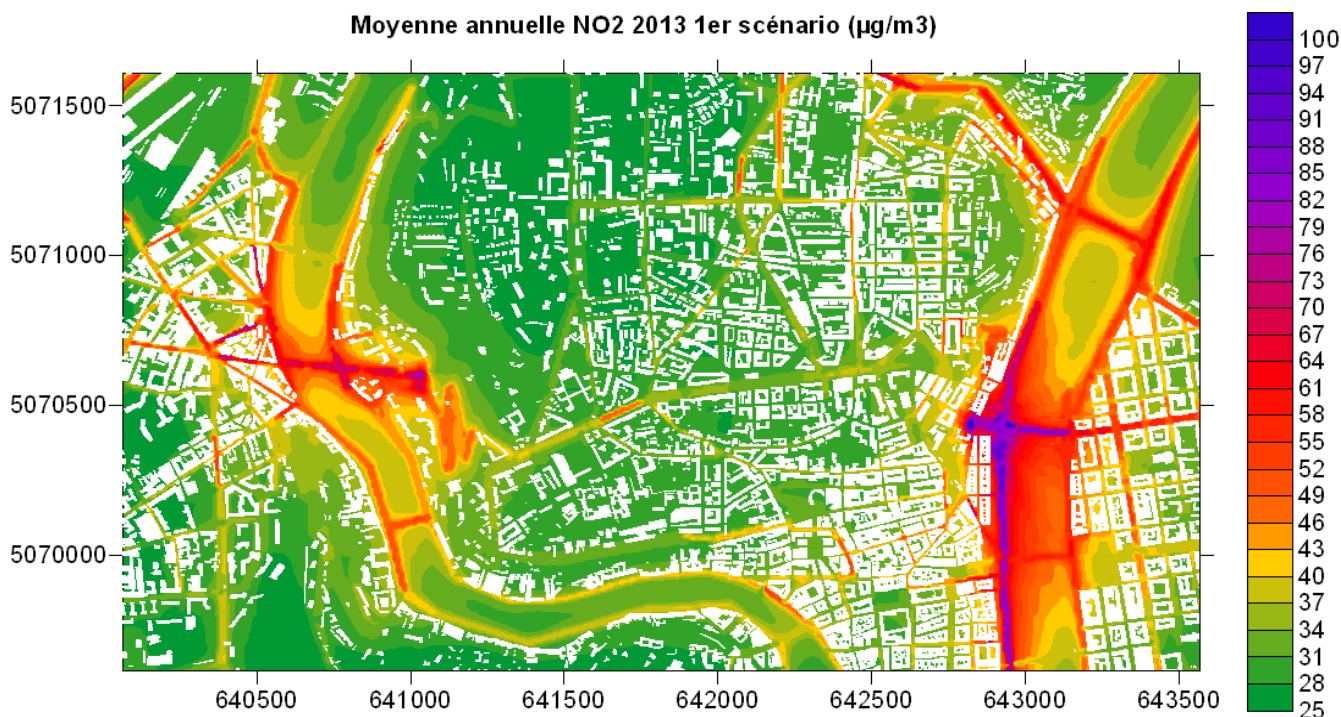


Figure 89 : Champ de concentration moyenne en NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur l'année 2013

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

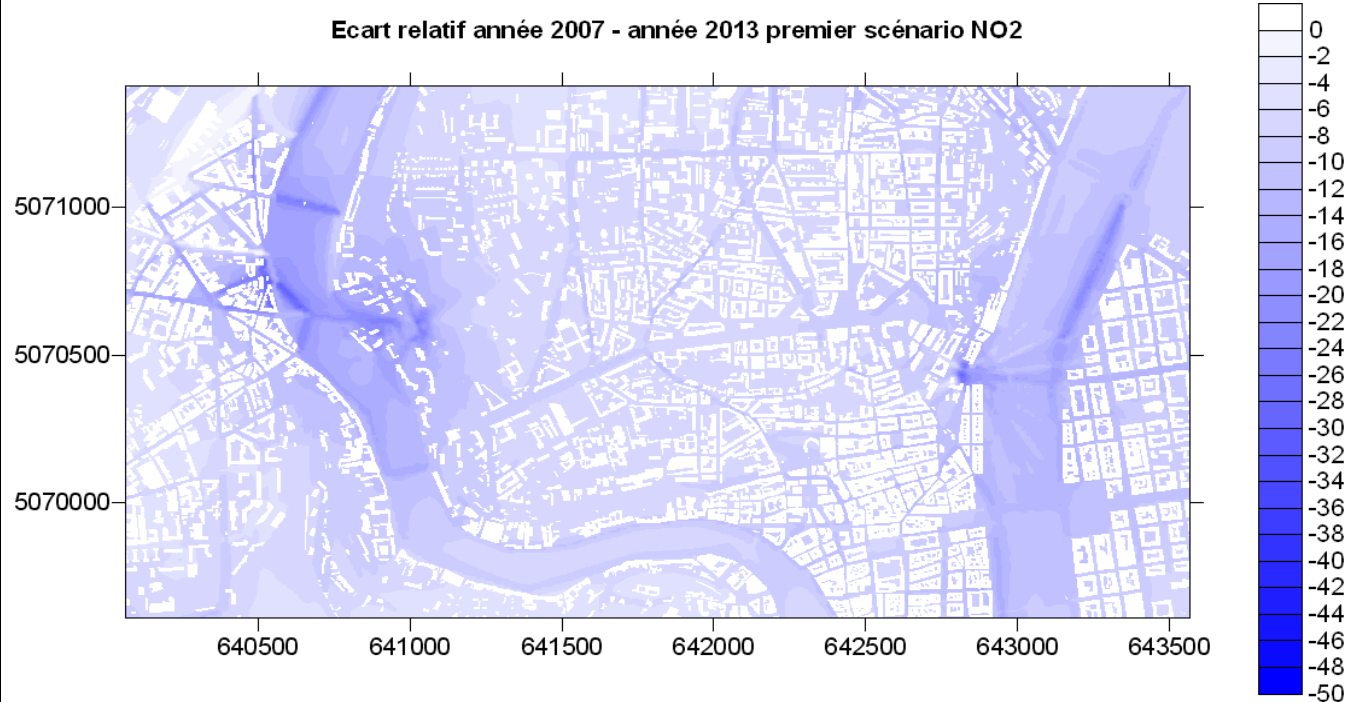


Figure 90 : Ecart relatif entre l'état actuel et le premier scénario prospectif pour le NO₂ en moyenne annuelle

5.5.2 PARTICULES

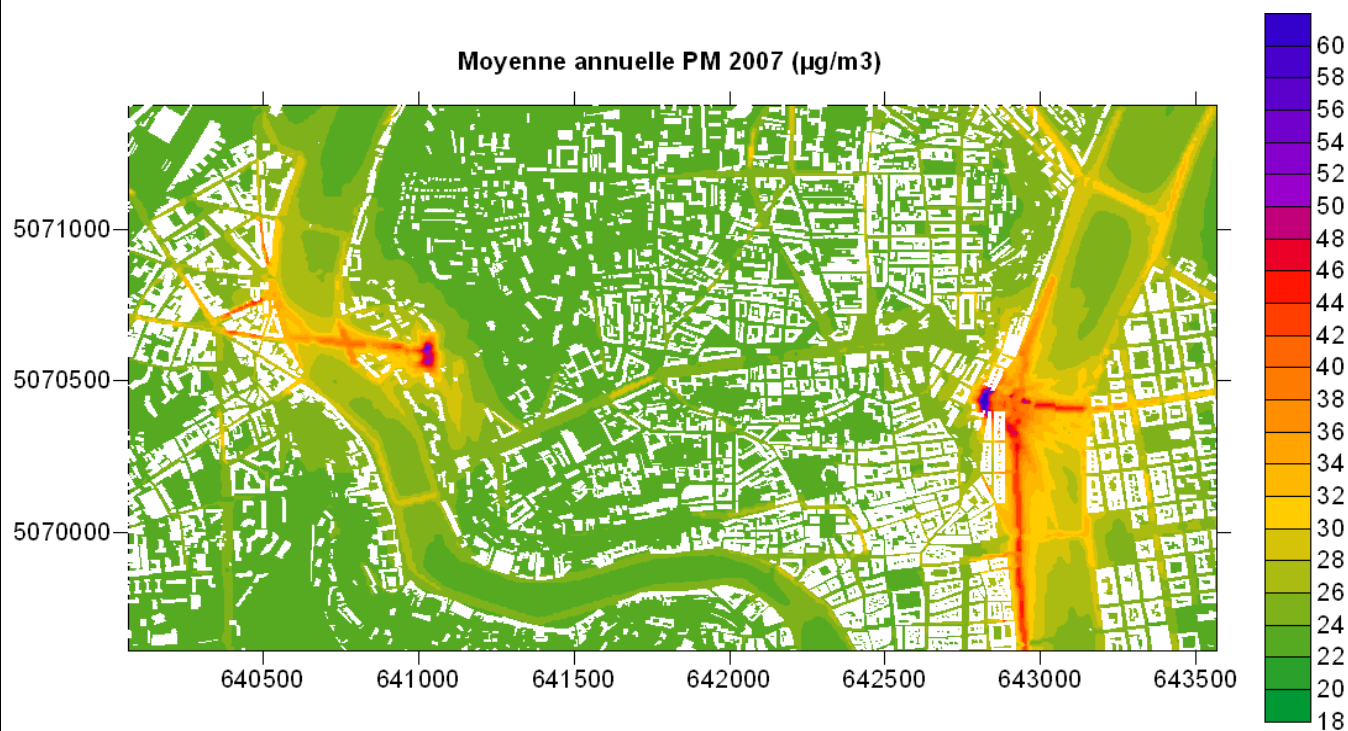


Figure 91 : Champ de concentration moyenne en PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur l'année 2008

Modélisation de la pollution atmosphérique dans le quartier de la Croix-Rousse

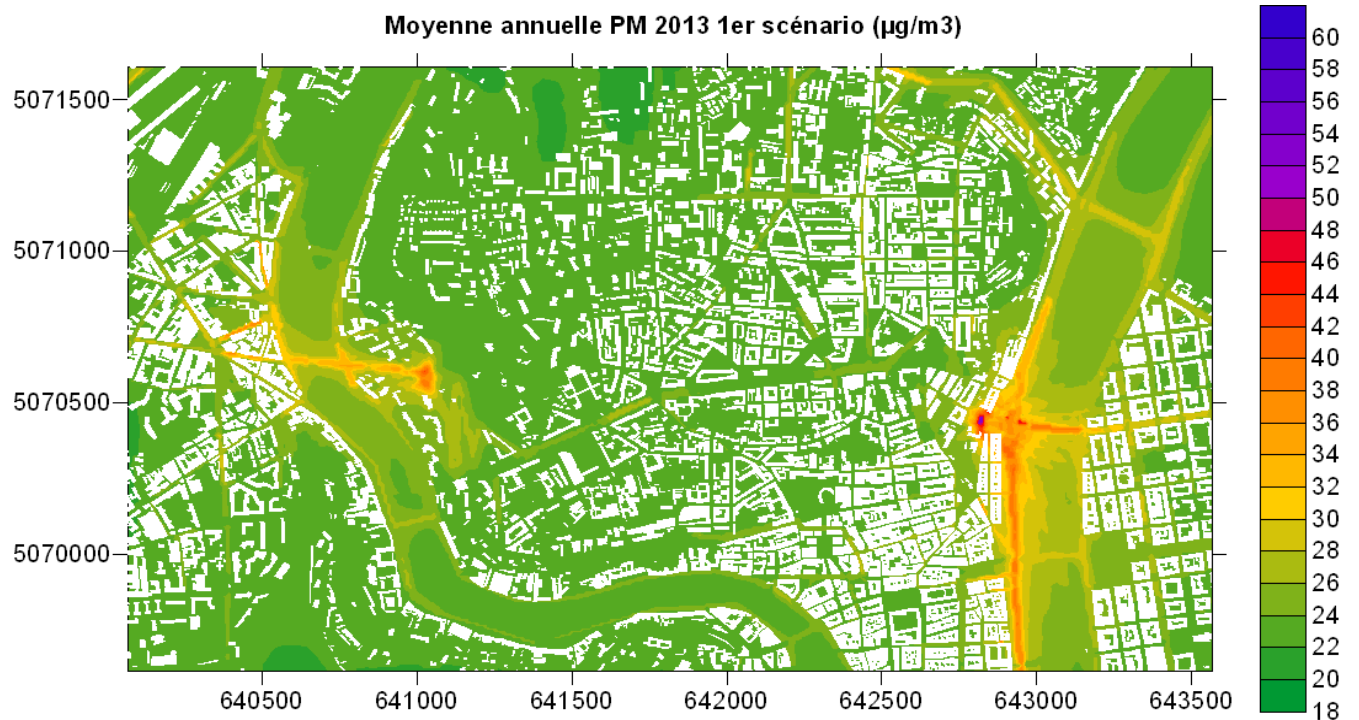


Figure 92 : Champ de concentration moyenne en PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur l'année 2013

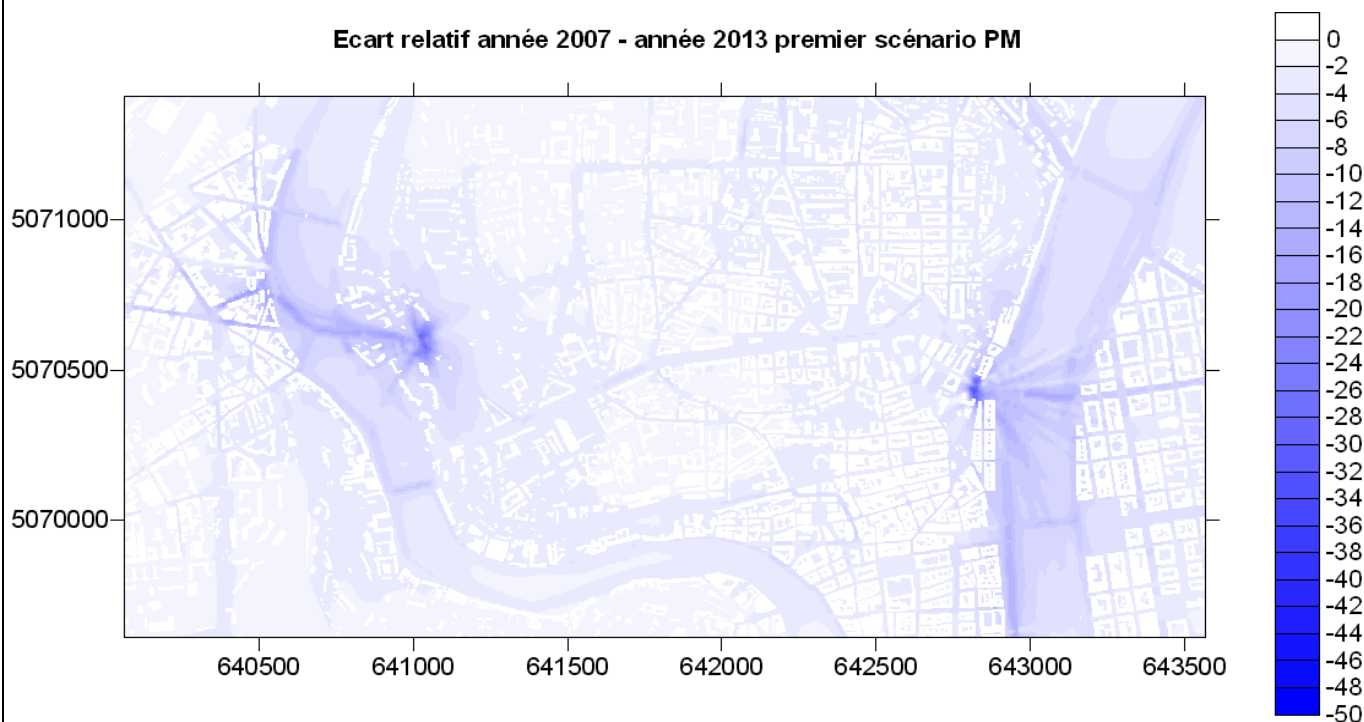


Figure 93 : Ecart relatif entre l'état actuel et le premier scénario prospectif pour les PM_{10} en moyenne annuelle

6 CONCLUSION

L'objectif de cette étude était l'adaptation du modèle SIRANE pour le calcul de la pollution issue du trafic sur le quartier de la Croix-Rousse en tenant compte de la topographie du site, de la météorologie locale et de la présence d'un tunnel.

Afin de pouvoir utiliser le modèle, un réseau de rues représentatif de l'agglomération lyonnaise a tout d'abord été construit à partir des données établies au cours d'études précédentes ; puis les caractéristiques de ces rues ainsi que les émissions associées ont été calculées par l'intermédiaire de différents utilitaires. Des simulations par polluant ont finalement été effectuées à partir de ces données d'émissions et des données météorologiques 3D issues du modèle CALMET (fournies par COPARLY). Des améliorations au modèle SIRANE ont été apportées afin qu'il puisse s'appliquer sur des zones caractérisées par un relief marqué.

Un recalage de la concentration de fond sur un des capteurs de proximité situé sur le plateau a été nécessaire afin de mieux prendre en compte l'ordre de grandeur de la pollution de fond au sein du quartier étudié.

Les comparaisons avec les mesures de terrain permettent de faire les remarques suivantes :

- Les comparaisons sont en moyenne de meilleure qualité pour les PM_{10} que pour le NO_2 . Cependant, on remarque pour les deux polluants une tendance à la surestimation du modèle pour les pics de concentration (malgré une bonne représentativité des tendances horaires et journalières), pour toutes les campagnes et tous capteurs confondus. Les comparaisons statistiques confirment ces tendances avec des valeurs satisfaisantes des indicateurs, ainsi qu'une bonne représentativité des moyennes sur les campagnes (2 à 3 dépassements du seuil des 20% d'erreur). La tendance à la surestimation des pics est également observée par les écarts sur les percentiles 98 pour chaque polluant. La campagne de janvier 2008 est celle qui présente les meilleurs résultats de validation.
- La comparaison avec les données de NO_2 issues de campagnes de tubes passifs répartis en différents points de l'agglomération a montré une correspondance satisfaisante en moyenne. Les erreurs les plus fortes sont situées systématiquement sur une même famille de six tubes (et non aléatoirement). Les forts gradients de concentration au voisinage de ces points (situés aux entrées/sorties du tunnel), mais également les incertitudes sur la position des tubes ou sur les émissions peuvent être mis en cause.

Cette étude a permis de tracer des cartographies de la pollution sur le quartier de la Croix-Rousse pour le dioxyde d'azote et les particules pour chaque campagne de mesure. Ces cartographies moyennes permettent de visualiser la pollution à l'échelle de l'agglomération et d'identifier les zones de dépassement des valeurs seuils. Elles permettent également de visualiser l'impact du tunnel sur la qualité de l'air dans le quartier de la Croix-Rousse, et ce pour l'année 2007 ainsi que pour deux scénarios prospectifs à l'horizon 2013.

7 BIBLIOGRAPHIE

L. Soulhac, 2000. Modélisation de la dispersion atmosphérique à l'intérieur de la canopée urbaine. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon.

L. Soulhac, P. Méjean, R. J. Perkins 2002. Notice d'utilisation du modèle SIRANE Version 1.1, Ecole Centrale de Lyon.

L. Soulhac, P. Méjean, R. J. Perkins 2003. Modélisation opérationnelle de la pollution atmosphérique à l'échelle d'un quartier d'une agglomération. Evaluation du modèle SIRANE à partir d'une campagne de mesure sur le 6^{ème} arrondissement de l'agglomération lyonnaise, Ecole Centrale de Lyon.

L. Soulhac, I. Rios, 2004. Modélisation de la pollution atmosphérique dans la ville de Lyon.

L. Soulhac, B. Farges, 2007. Notice d'utilisation du modèle SIRANE, version 1.16. Ecole Centrale de Lyon.