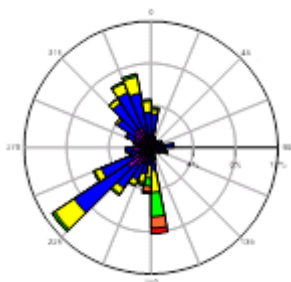


Modélisation urbaine de la pollution atmosphérique de l'agglomération stéphanoise

Evaluation du PPA



Jun 2011



L'association agréée de surveillance de la qualité de l'air AMPASEL fait partie du dispositif français de surveillance et d'information de la qualité de l'air. Sa mission s'exerce dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996 et de ses décrets d'application notamment le décret 98-361 du 6 mai 1998 relatif à l'agrément des organismes de surveillance de la qualité de l'air.

A ce titre et compte tenu du statut d'organisme non lucratif, AMPASEL est garant de la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux.

Conditions de diffusion :

- Les données recueillies tombent dès leur élaboration dans le domaine public. Le rapport d'étude est mis à disposition sur www.atmo-rhonealpes.org, un mois après validation interne.
- Les données contenues dans ce document restent la propriété des associations. Données non rediffusées en cas de modification ultérieure des données.
- Toute utilisation partielle ou totale de ce document doit faire référence à l'association en termes de « AMPASEL (2011), *Modélisation urbaine de la pollution atmosphérique de l'agglomération stéphanoise – évaluation du PPA* ».
- AMPASEL n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

Cette étude a reçu le concours financier de la DREAL Rhône-Alpes (convention n°2010-42-011)

Le GIE Atmo-RhôneAlpes ainsi que ses membres, AMPASEL, ASCOPARG, ATMO Drôme-Ardèche, COPARLY et SUP'AIR, sont certifiés ISO 9001 – version 2008 pour l'ensemble de leurs activités depuis juin 2008.



INTRODUCTION	3
1. L'OUTIL SIRANE.....	4
1. PRESENTATION	4
2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	4
2. DONNEES D'ENTEE ET METHODOLOGIE	6
1. DOMAINE D'ETUDE.....	6
2. CONSTITUTION DU RESEAU DE RUES.....	6
3. LES EMISSIONS ROUTIERES.....	9
2.3.1. LES EMISSIONS SUR LE RESEAU DU MODELE DE TRAFIC	9
2.3.2. LES EMISSIONS SUR LE RESEAU SIRANE	9
2.3.3. LES MODULATIONS DES EMISSIONS	10
4. LA METEOROLOGIE ET LA POLLUTION DE FOND.....	11
2.4.1. LA METEOROLOGIE.....	11
2.4.2. LA POLLUTION DE FOND	13
2.4.3. LA METHODOLOGIE DE MISE EN ŒUVRE ADOPTEE	14
5. METHODOLOGIE DE VALIDATION DES SIMULATIONS	15
2.5.1. COMPARAISON DES SIMULATIONS ET DES MESURES PAR CAPTEURS FIXES	15
2.5.2. COMPARAISON DES SIMULATIONS ET DES MESURES TEMPORAIRES.....	16
2.5.3. LES PARAMETRES STATISTIQUES.....	18
3. PRESENTATION ET VALIDATION DES RESULTATS SUR L'ANNEE 2009.....	18
1. COMPARAISON DES SIMULATIONS ET DES MESURES PAR CAPTEURS FIXES	18
2. COMPARAISON DES SIMULATIONS ET DES MESURES TEMPORAIRES	24
3.2.1. PSQA DE SAINT-ETIENNE.....	24
3.2.2. PSQA DE RIVE DE GIER.....	27
3. CARTOGRAPHIES ANNUELLES.....	30
4. EVALUATION D'UN SCENARIO PROSPECTIF	33
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	35
ANNEXE	36

Introduction

Dans le cadre de sa mission de surveillance de la qualité de l'air et en vue de la révision du Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) de l'agglomération stéphanoise de mars 2008, AMPASEL a proposé de modéliser, à l'échelle de la rue, la dispersion de la pollution atmosphérique sur le territoire du PPA de l'agglomération de Saint-Etienne. L'outil de modélisation SIRANE complètera la surveillance de la qualité de l'air de la ville actuellement assurée par un réseau de capteurs et permettra d'évaluer l'impact des mesures du PPA par la simulation de scénarios.

L'objectif de la présente étude est de mettre en application le modèle SIRANE sur le territoire du PPA stéphanois pour l'année 2009. Les polluants modélisés sont les oxydes d'azote et les PM10.

Après les phases d'implémentation et de validation, des scénarios prospectifs basés sur les hypothèses d'évolution des émissions définies par le Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) ont été simulés afin d'évaluer l'impact des mesures à mettre en œuvre pour améliorer la qualité de l'air et protéger les populations. Ces travaux s'appuient sur l'expérience acquise dans le cadre des PPA lyonnais et Plan de Déplacement Urbain (PDU) grenoblois.

Ce rapport synthétise les travaux effectués et présente les résultats finaux.

- Dans une première partie, le modèle SIRANE et son principe général de fonctionnement sont présentés.
- Dans une deuxième partie, la zone d'étude est définie, les mesures de météorologie et de pollution atmosphérique qui viendront alimenter ou valider le modèle SIRANE sont exploitées. Les méthodologies de mise en œuvre sur le domaine d'étude et de validation du modèle sont expliquées.
- Dans une troisième partie, les résultats de la mise en œuvre du modèle SIRANE pour l'année 2009 sont exposés.
- Dans une quatrième partie, les résultats des simulations d'un scénario prospectif sont évalués.
- Enfin les conclusions et perspectives sont énoncées dans une dernière partie.

1. L'OUTIL SIRANE

1. Présentation

Développé par l'Ecole Centrale de Lyon, le modèle SIRANE est un modèle de dispersion atmosphérique en milieu urbain, adapté à l'échelle de la rue ou d'un quartier. Il permet de décrire les concentrations en polluants dans des zones constituées principalement de rues bordées de bâtiments sous forme de cartographie.

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).

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)

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 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
- Prévision de la pollution

Le modèle SIRANE est utilisé, d'une part, pour évaluer la concentration annuelle en dioxyde d'azote depuis 2002 sur l'agglomération intra périphérique de Lyon, depuis 2004 sur l'agglomération de Grenoble et depuis 2007 sur l'agglomération de Valence. Le modèle SIRANE est utilisé, d'autre part, pour évaluer de manière prospective les actions entreprises sur l'agglomération de Lyon dans le cadre du Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) depuis 2005 ou dans le cadre du Plan de Déplacement Urbain (PDU) depuis 2005.

2. Principe de fonctionnement

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 des variables météorologiques (vitesse et direction du vent, température, précipitations...)
- L'évolution horaire du niveau de pollution de fond
- L'évolution horaire des données d'émissions provenant des voies de circulation

Le schéma des entrées-sorties du modèle SIRANE est présenté Figure 1.

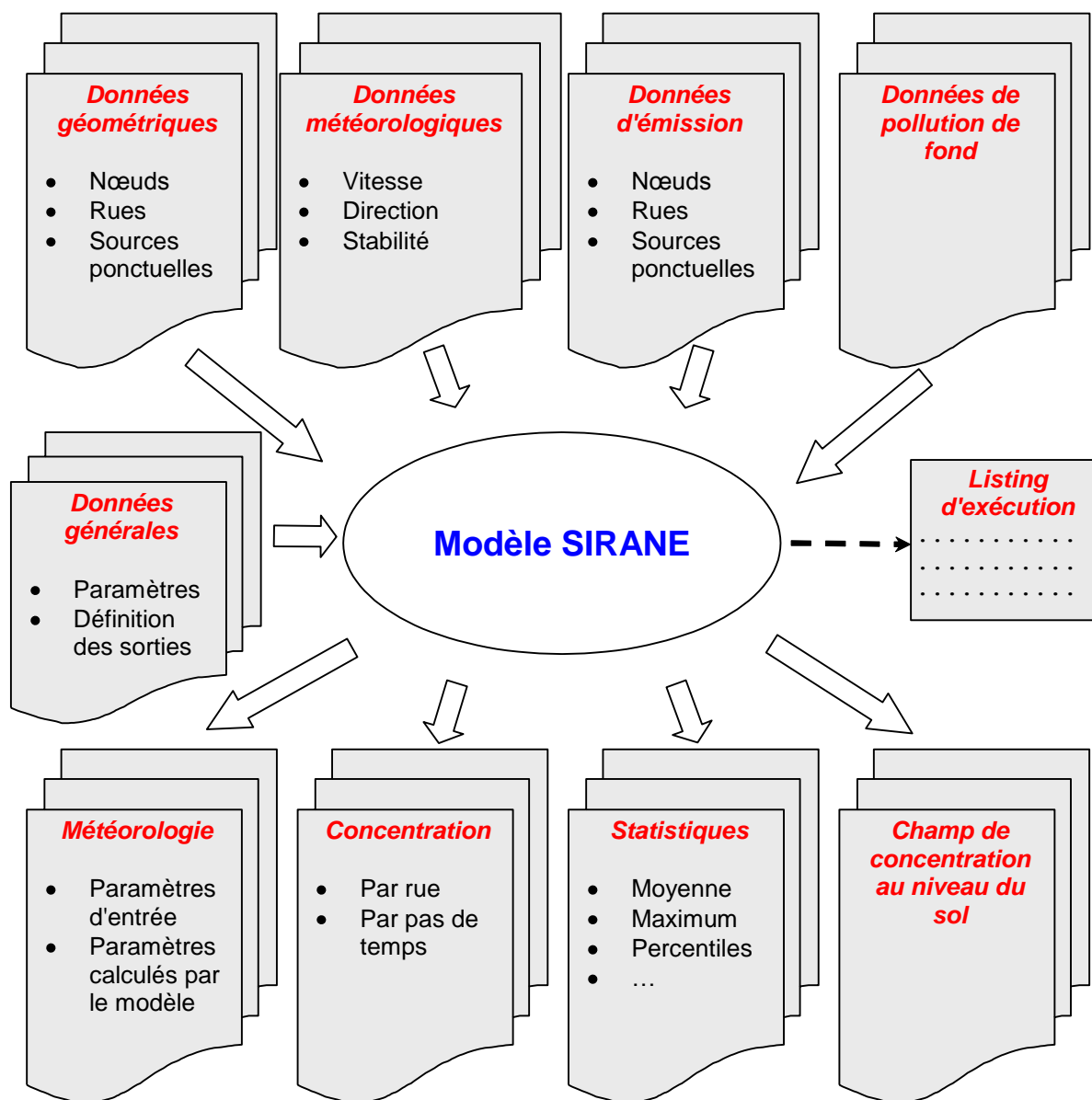


Figure 1 : Schéma de fonctionnement du modèle SIRANE

En sortie, SIRANE fournit :

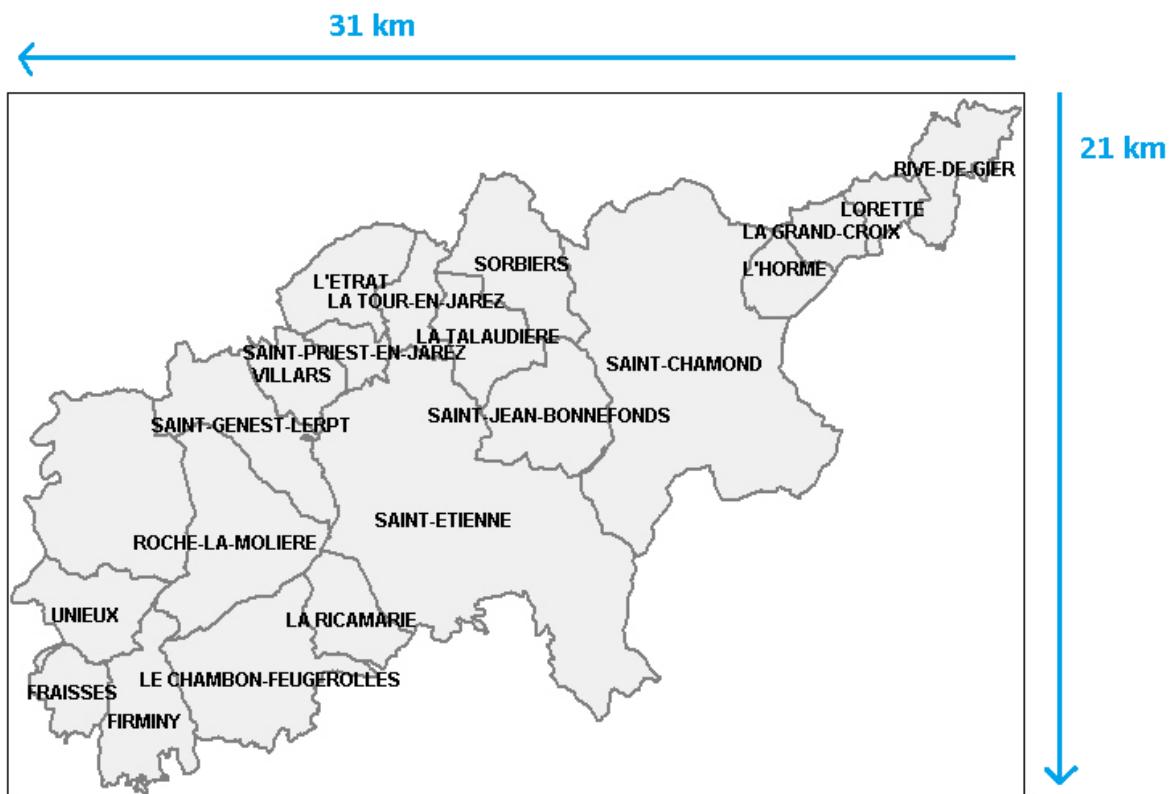
- L'évolution de la concentration moyenne à l'intérieur de chaque rue et en un certain nombre de récepteurs ponctuels
- Les grandeurs statistiques associées (maximum, percentile ...)
- Le champ de concentration à une résolution maximum de 10 mètres

2. Données d'entée et méthodologie

1. Domaine d'étude

Le périmètre du Plan de Protection de l'Atmosphère de mars 2008 est défini administrativement comme l'agglomération de Saint-Etienne au sens INSEE telle qu'elle est décrite dans le décret du 6 mai 1998 modifié auquel 5 communes de la vallée du Gier ont été ajoutées. Ce périmètre « réglementaire » comporte 22 communes dont 2 situées en Haute-Loire (Saint-Ferréol d'Auroure et Pont-Salomon).

L'inventaire des émissions de Rhône-Alpes ne couvrant pas ses 2 communes de Haute-Loire, elles n'ont pu être intégrées dans le domaine modélisé. Ce domaine s'étend sur une surface de 31 km par 21 km.



2. Constitution du réseau de rues

La maquette géométrique sur laquelle sont réalisés les calculs de dispersion est un réseau de voies.

Le réseau de voies a été constitué sur la zone d'étude du PPA présentée Figure 2. La construction du réseau a été faite à partir de deux systèmes de réseau : le réseau du modèle de trafic et la BD TOPO.

Le réseau du modèle de trafic est géo référencé, il apporte essentiellement une information sur le trafic d'une voie. Mais toutes les rues ne sont pas représentées.

Le réseau de la BD TOPO, quand à lui, apporte des informations géo spatiales et géométriques précises des voies. Tous les types de voies sont représentés (chemin, 1 voie, piste...) ce qui rend le nombre de voies excessif.

L'objectif de cette phase a été de créer une maquette possédant toutes les voies du réseau trafic afin de conserver le maximum d'information sur les sources émettrices en les représentant au plus près de la BD TOPO gage d'un rendu graphique propre. L'exercice consiste donc à jongler avec les deux réseaux, la principale difficulté résidant dans la limitation du nombre de brins pour constituer une voie. Plus le nombre de brins est grand plus les calculs seront gourmands en temps de calcul et en espace disque.

La Figure 3 présente les différentes étapes suivies pour construire le réseau de rues.

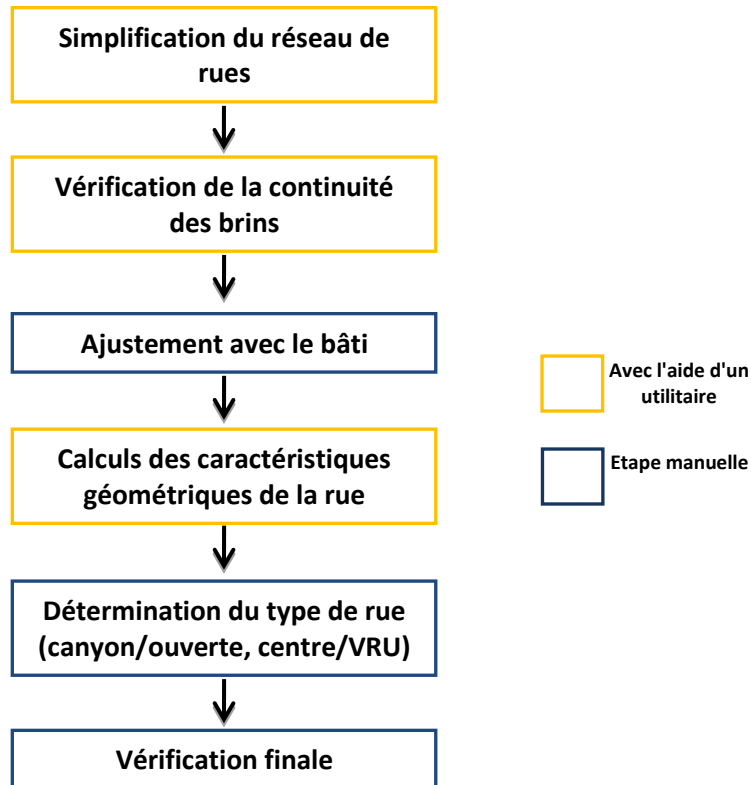


Figure 3 : Schéma de principe de construction d'un réseau SIRANE

Dans la construction de la maquette, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques géométriques de chaque voie 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...). La typologie d'une voie « canyon » ou « ouverte » a été déterminé à partir des critères suivants :

- Les voies présentant une hauteur moyenne nulle à gauche ou à droite seront considérées comme ouvertes (cas d'une rue semi-bordée).
- Les voies présentant une porosité supérieure 0.6 à gauche ou à droite seront considérées comme ouvertes.
- Les voies présentant un rapport entre leur largeur et leur hauteur supérieur $W/H > 3$ seront considérées comme ouvertes.



Figure 4 : Le réseau de voies. Les rues de type « canyon » sont en rouge. Zoom sur le centre de Saint-Etienne.

Une autre typologie de voie a été prise en considération, les voies rapides urbaines. Appelée « VRU », cette typologie n'est pas déterminée en fonction de critères géométriques mais en fonction de la vitesse des véhicules. Les voies rapides où la vitesse peut dépasser les 110 km/h sont ainsi distinguées des autres voies. Il s'agit le plus souvent de routes à double voies. Cette distinction permet de prendre en compte une modulation des émissions différente suivant la propriété VRU ou non du brin.



Figure 5 : Le réseau de voies. Les voies de typologie « VRU » sont en rouge.

Le réseau obtenu compte finalement plus de 17800 rues dont environ 3000 de type "canyon" (soit 16,8%) et 486 brins de type "VRU". Les Figure 4 et Figure 5 montrent la répartition typologique des voies du réseau. On notera que les rues de type "ouvert" prédominent largement dès que l'on s'éloigne des centres urbains.

3. Les émissions routières

2.3.1. Les émissions sur le réseau du modèle de 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 (TMJA) a été réalisé par le modèle MOCAT en utilisant la méthodologie COPERT IV (Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport) 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. Les données de trafic utilisées dans la mise en œuvre du modèle de trafic proviennent de la modélisation du trafic 2006 réalisé par l'agence d'urbanisme EPURES.

2.3.2. Les émissions sur le réseau SIRANE

Les émissions TMJA calculées sur le réseau du modèle de trafic doivent être projetées sur le réseau du modèle SIRANE. Cette phase est réalisée en suivant les étapes de la Figure 6 :

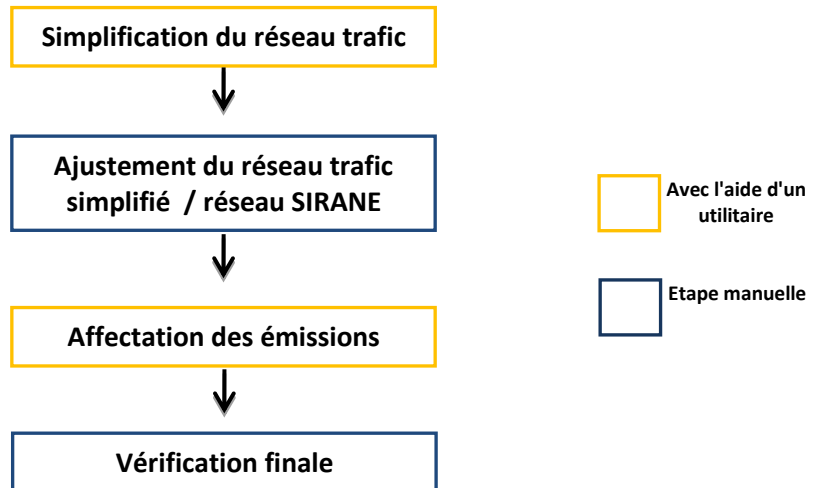


Figure 6 : Schéma de principe de projection des émissions.

L'étape d'ajustement du réseau trafic par rapport au réseau SIRANE est délicate car l'affectation des émissions ne peut se faire correctement que si les brins des deux réseaux sont parfaitement superposés. Dans le cas contraire un brin peut se voir affecter des émissions de ses homologues voisins.

La Figure 7 illustre le résultat de la phase de projection des émissions sur le réseau SIRANE. Les voies rapides urbaines sont les voies les plus émettrices en termes de polluants atmosphériques.



Figure 7 : Description des émissions en NOx sur le domaine d'étude.

2.3.3. Les modulations des émissions

Le trafic routier évolue suivant l'heure de la journée, le jour de la semaine et le mois de l'année. SIRANE applique sur les émissions TMJA des profils de modulation mensuels,

journaliers et horaires afin de considérer le débit de véhicules adéquat à chaque pas de temps.

Le trafic routier n'est également pas le même si l'on considère une voie rapide urbaine ou une simple voie. SIRANE applique alors des profils de modulation différents en fonction de la typologie des rues.

Les graphes de la Figure 8 présentent les courbes de la modulation moyenne sur en fonction de la typologie de voie.

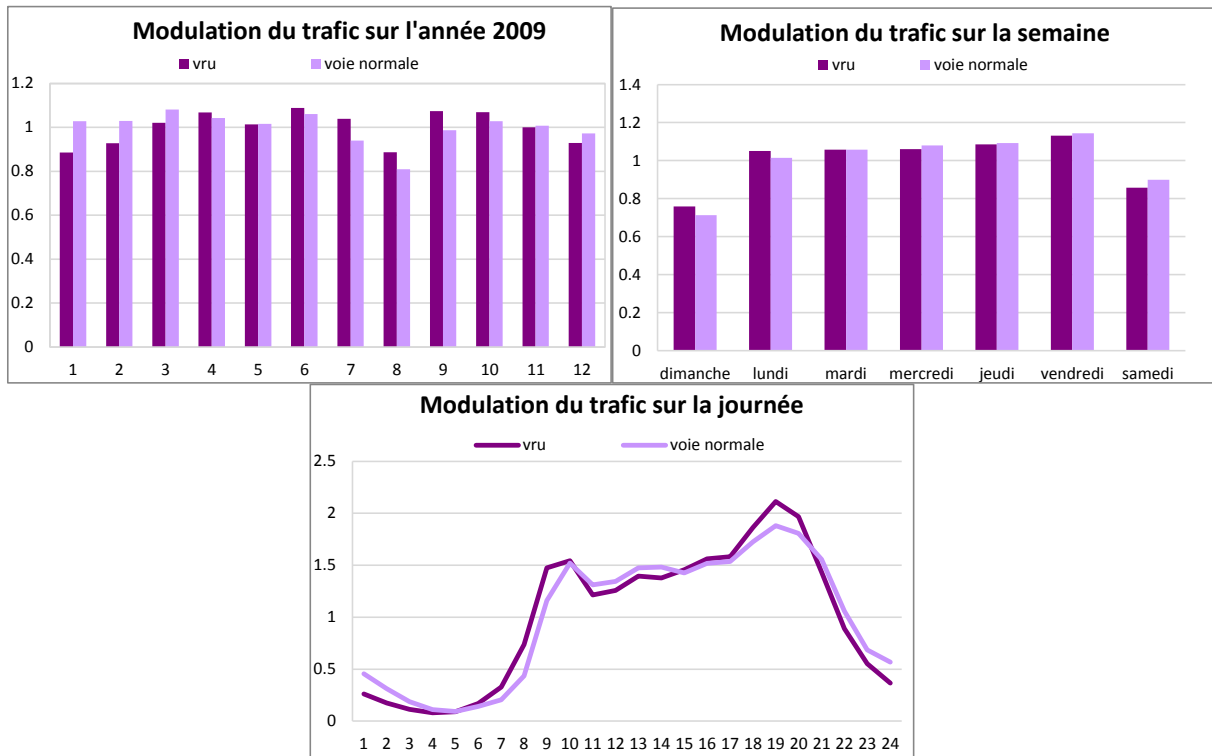


Figure 8 : Modulation moyenne du trafic en fonction des mois, des jours de la semaine et de l'heure de la journée.

Ainsi, le trafic d'une année entière (débit de véhicule) est construit 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 différenciée sur deux catégories de types de 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).

4. La météorologie et la pollution de fond

2.4.1. La météorologie

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 peuvent provenir de stations de mesure ou de modèles météorologiques.

Dans le domaine d'étude, 4 stations mesurant les paramètres nécessaires au fonctionnement du modèle sont recensées (Figure 9).

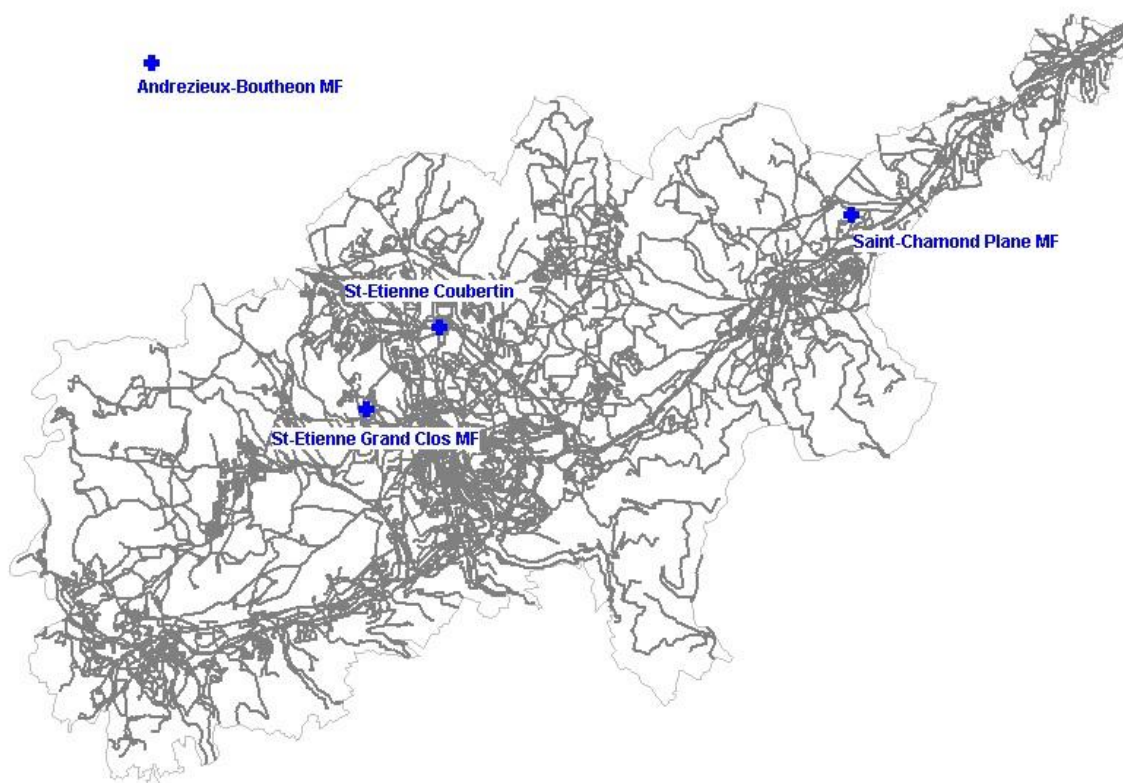


Figure 9 : Localisation des stations météorologiques.

Les stations Andrezieux-Bouthéon, Saint-Etienne Grand Clos et Saint-Chamond plaine sont des stations appartenant au réseau Météo-France. La station Saint-Etienne Coubertin est une station appartenant au réseau AMPASEL. Le Tableau 1 indique le pourcentage de données horaires disponibles sur l'année 2009.

	Andrezieux-Bouthéon	Saint-Etienne Grand Clos	Saint-Etienne Coubertin	Saint-Chamond Plaine
Disponibilité en %	87.3	96.7	60.4	95.6

Tableau 1 : Disponibilité des données météorologiques.

Les roses des vents en ces stations sont différentes (Figure 10). Elles montrent que l'hypothèse d'un champ météo homogène, applicable à l'échelle d'un quartier, est limitant sur un domaine étendu comme notre domaine d'étude, particulièrement quand celui-ci est caractérisé par la présence de relief.

La station Andrezieux-Bouthéon situé en dehors du domaine d'étude fournit une information sur la météorologie à grande échelle, dite échelle synoptique. Quant au mât Saint Etienne Coubertin, exploité par AMPASEL, sa hauteur faible en fait une station très influencée par le bâti environnant. De plus, ces deux stations ont mesuré des données sur 87.3% et 60.4% de l'année, des chiffres inférieurs à ceux relevés par Saint Etienne Grand Clos et Saint-Chamond Plaine. Ces deux stations fournissent quant à elle des informations complémentaires. La première, Saint Etienne Grand Clos, décrit l'aérogologie de la ville de Saint-Etienne avec des composantes nord-ouest et sud-ouest majoritaires. La vitesse des vents est moyenne à faible. La composante de sud minoritaire est caractérisée par des vents forts. La seconde décrit l'aérogologie de la ville de Saint-

Chamond. La direction principale du vent est l'axe de la vallée du Gier avec la plupart des vents provenant du quart sud-ouest. A noter la présence d'une composante nord/sud dont l'origine est le vent thermique descendant et montant la vallée en début et fin de journée.

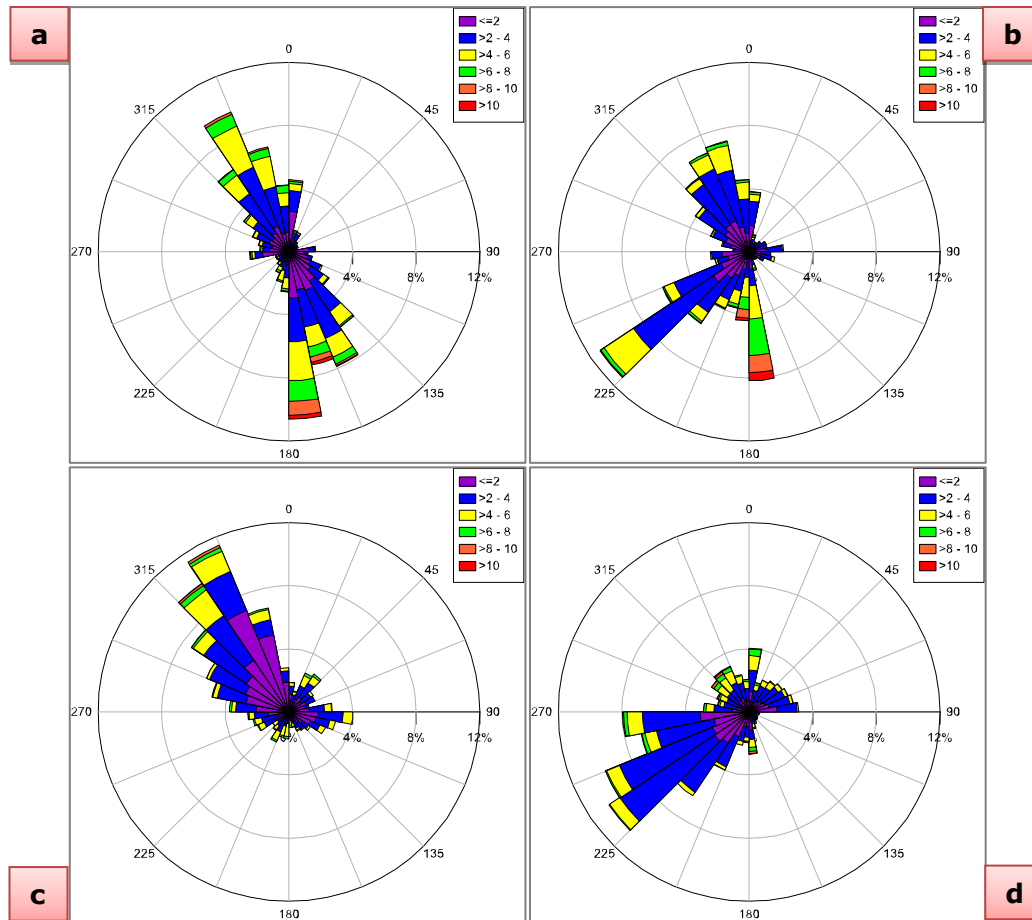


Figure 10 : Roses des vents mesurées par les stations a) Andrézieux-Bouthéon, b) Saint-Etienne Grand Clos, c) Saint-Etienne Coubertin et d) Saint-Chamond Plaine

2.4.2. La pollution de fond

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 par des modèles ou 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.

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 soit bien représentative de la situation sur le domaine étudié.

Une station du réseau de capteurs fixes géré par AMPASEL réunit ces conditions. En effet la station de Saint-Etienne Sud est une station de typologie urbaine, comme son nom et

la Figure 11 l'indiquent, elle est située au sud de l'agglomération de Saint-Etienne à proximité de la place Preher.

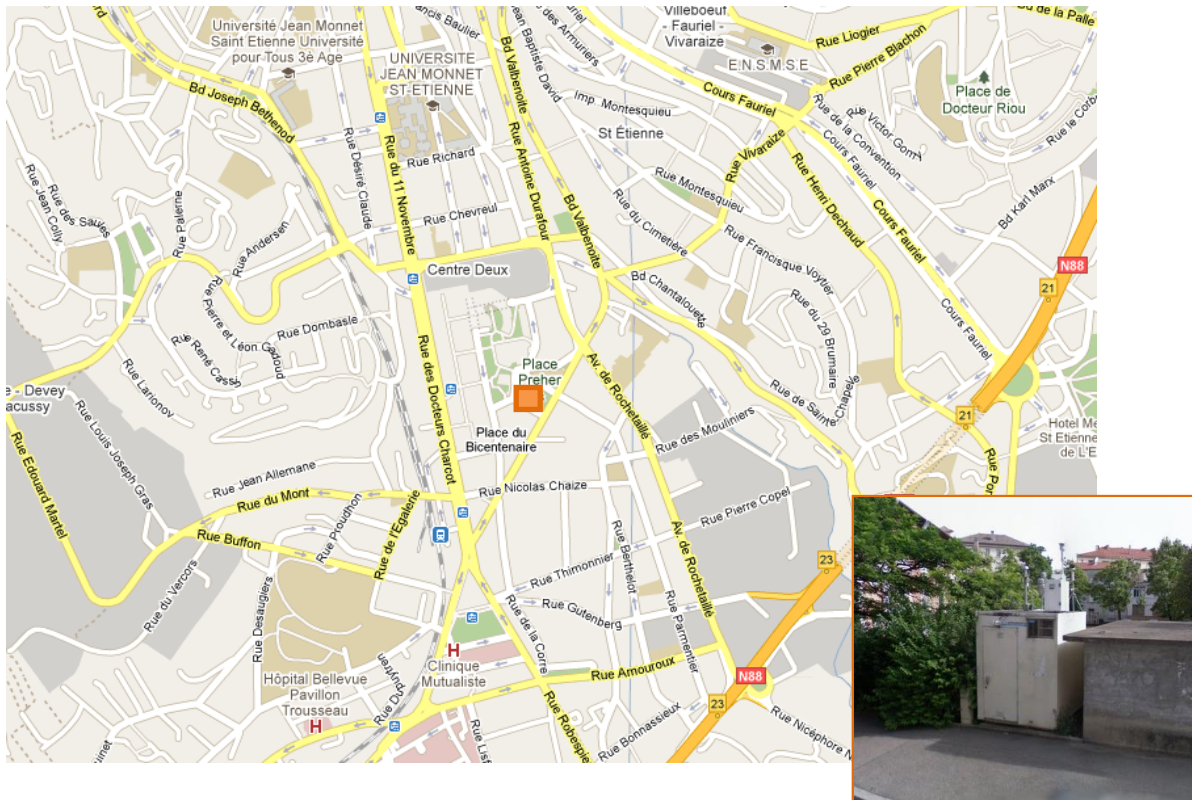


Figure 11 : Localisation de la station Saint-Etienne Sud. Photographie de la station de mesure.

2.4.3. La méthodologie de mise en œuvre adoptée

Le modèle de dispersion atmosphérique SIRANE calcule les concentrations en polluants sur la maquette géométrique avec des données sur la météorologie et sur la pollution de fond qui doivent être représentatif de ce domaine. Dans cette étude, étant donné la complexité et l'étendu du domaine (21 km x 31 km), le choix d'une seule météorologie et d'une seule pollution de fond aboutirait à des résultats non satisfaisants en termes de qualité mais également en termes d'efficacité puisque les temps de calculs s'avèreraient très longs. Idéalement, il serait nécessaire de disposer d'une météorologie et d'une pollution non uniforme spatialement et d'effectuer les calculs du champ de vent et de dispersion sur un maillage.

Pour palier à ces obstacles, le domaine d'étude a été divisé en quatre sous domaines sur lesquelles des conditions météorologiques et de pollution de fond différentes seront appliquées.

Des simulations tests ont été réalisées pour déterminer les conditions de pollution de fond adéquates à chaque domaine. Lors de ces simulations avec Saint-Etienne Sud en pollution de fond, la comparaison des valeurs de fond mesurées et modélisées a montré une surestimation des concentrations en oxydes d'azote simulées par SIRANE. La Figure 12 montre ce dépassement sur une période d'une journée. Les valeurs de fond urbain de Saint-Etienne Sud sont inférieures de 30% en moyenne sur l'année 2009 par rapport à la modélisation. Cette différence traduit une influence du trafic sur la mesure en oxydes d'azote. Il ressort de cette comparaison que le capteur de fond de Saint-Etienne Sud n'est pas représentatif de la pollution de fond sur le domaine de Saint-Etienne. En revanche, en l'absence de capteur de fond dans la vallée du Gier, le capteur de Saint-Etienne Sud est choisi par défaut pour représenter la situation de fond sur cette zone.

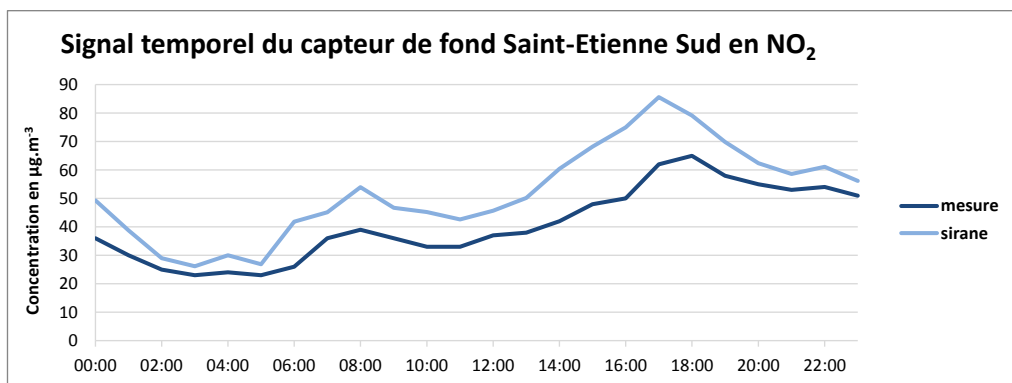


Figure 12 : Evolution temporelle de la pollution de fond mesurée et modélisée par SIRANE.

La Figure 13 expose ces sous domaines ainsi que les données d'entrées qui alimenteront le modèle.

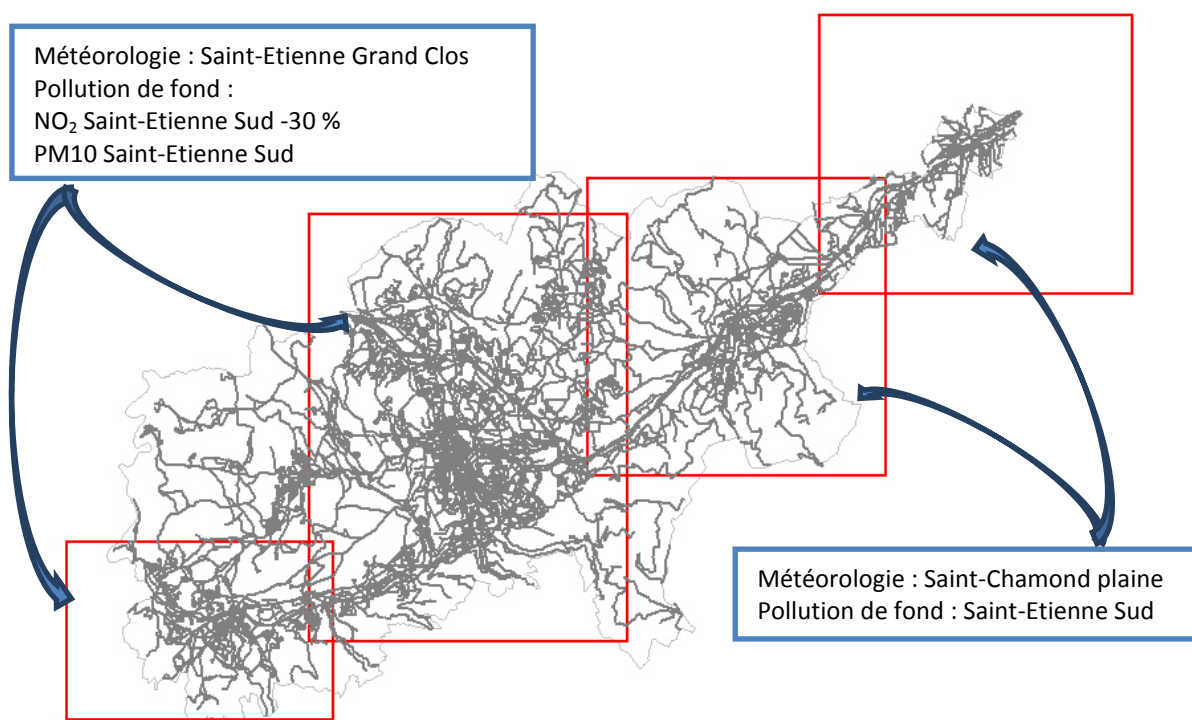


Figure 13 : Méthodologie de mise en œuvre du modèle SIRANE sur le domaine d'étude. Sous domaines de calculs en rouge.

5. Méthodologie de validation des simulations

2.5.1. Comparaison des simulations et des mesures par capteurs fixes

Le réseau de capteurs fixe mis en place par AMPASEL est composé de 6 stations sur le domaine d'étude en 2009. Le Tableau 2 présente ces capteurs et la Figure 14 indique leur localisation. Ces capteurs mesurent en permanence la concentration horaire des oxydes d'azote et des pm10.



Figure 14 : Localisation des stations du réseau fixe.

Nom	Typologie
Firminy	Urbaine
Saint-Etienne Sud	Urbaine
Saint-Etienne Rd-Pt	Trafic
Coubertin	Périurbaine
Saint-Chamond	Urbaine
Rive de Gier	Trafic

Tableau 2 : Typologie des stations du réseau fixe.

2.5.2. Comparaison des simulations et des mesures temporaires

Dans le cadre du Plan de Surveillance de la Qualité de l'Air (PSQA) de la région Rhône-Alpes, les communes de Saint-Etienne¹ et de Rive de Gier² ont bénéficié durant l'année 2009 d'une surveillance renforcée de la qualité de l'air en centre ville.

Les campagnes de mesures investiguées sur la commune de Saint-Etienne visent à établir un état des lieux des niveaux de pollution mesurés par rapport à la réglementation afin de quantifier l'impact du trafic routier (polluants: NOx et PM10) sur l'air respiré par la population du boulevard urbain. Le dispositif est déployé sur 4 périodes de mesures de 15 jours et comprend (Figure 15) :

- un moyen mobile, situé en bordure du boulevard urbain - Gare Le Clapier - fournissant des mesures en continue d'oxydes d'azote et en particules
- une cabine située le long de la rue de la république fournissant des mesures en continue d'oxydes d'azote uniquement
- quatre tubes à échantillonnage passifs d'oxydes d'azote uniquement

¹ Evaluation de la qualité de l'air en proximité d'axes routiers Saint-Etienne République et Saint-Etienne Boulevard urbain - Mesures réalisées en 2008 - 2009, Atmo-RhôneAlpes, 2011

² Évaluation de la qualité de l'air sur la commune de Rive de Gier (42) - PSQA, Atmo-RhôneAlpes, 2011

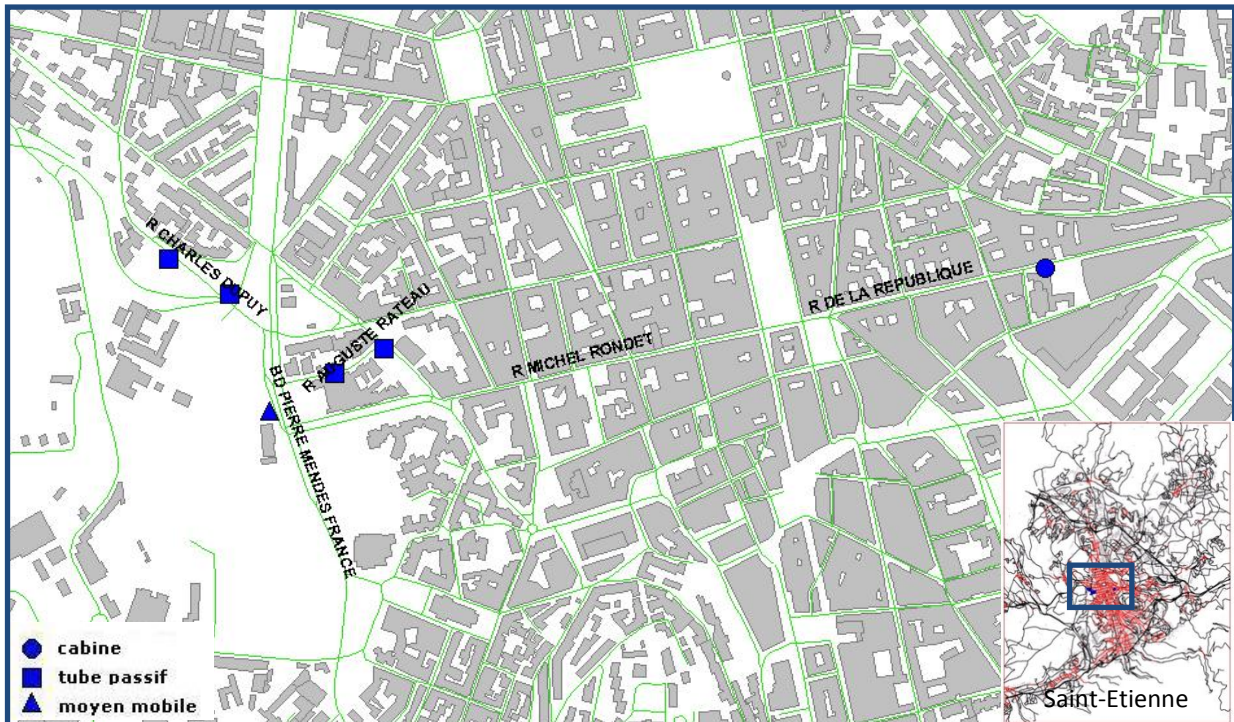


Figure 15 : Localisation des mesures temporaires déployées pour le PSQA de Saint-Etienne Boulevard urbain.

Les campagnes de mesures réalisées sur la commune de Rive de Gier ont pour objectifs de faire un état des lieux des niveaux de pollution par rapport à la réglementation en zone urbaine et à proximité trafic d'une part et d'autre part, identifier l'origine des fines particules mesurées sur le secteur de Rive de Gier, notamment à proximité de l'A47 sur la station permanente du réseau fixe d'AMPASEL.

La mise en place, pendant 4 périodes de mesures de 15 jours, d'un moyen mobile permettant des mesures continues associée à 3 tubes à échantillonnage passifs d'oxydes d'azote, ont permis d'effectuer un bilan des polluants réglementés (Figure 16).

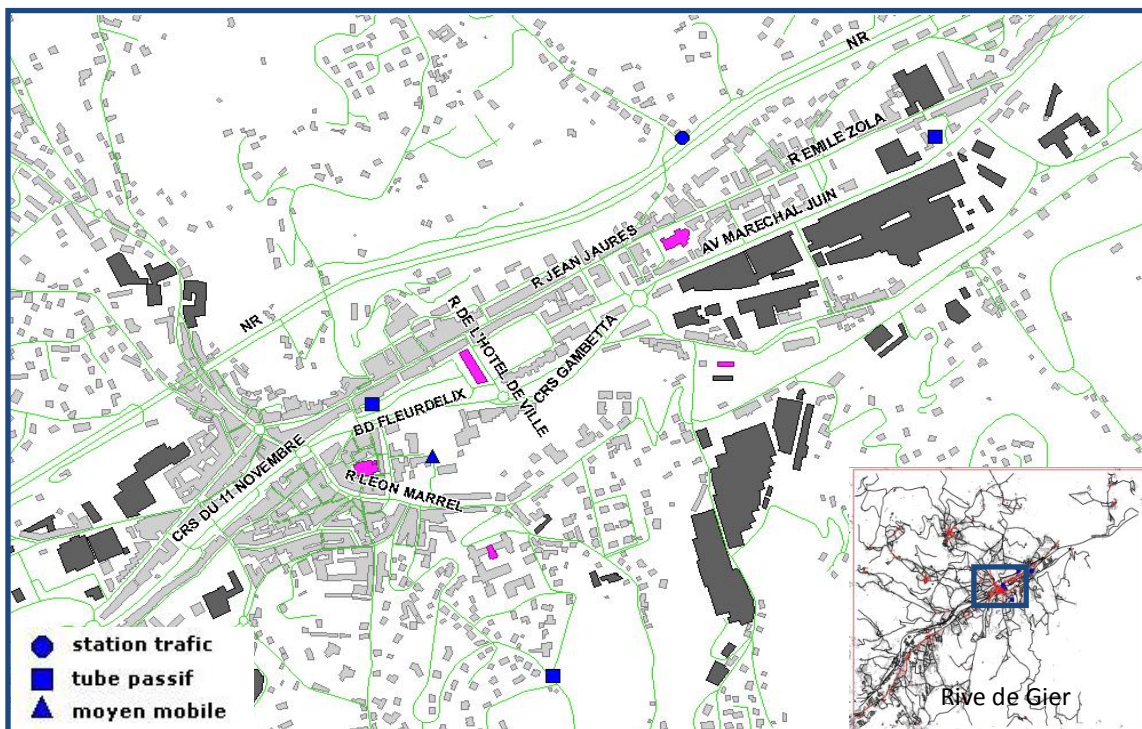


Figure 16 : Localisation des mesures temporaires déployées pour le PSQA de Rive de Gier.

2.5.3. Les paramètres statistiques

Pour évaluer le comportement du modèle SIRANE sur l'année ou sur les campagnes de mesures, les résultats de modélisation seront confrontés à la mesure de chaque capteur via les indicateurs statistiques suivants :

- Box-plot
- Quantile-Quantile plot
- Histogramme des erreurs
- Moyenne sur l'année ou sur les 4 périodes de mesure représentative d'une année appelée moyenne partielle
- Médiane
- Percentile 98
- Coefficient de corrélation
- Biais fractionnel
- Variance des erreurs modèle-mesure et l'écart type associé
- RMSE (root mean squared error)

3. Présentation et validation des résultats sur l'année 2009

1. Comparaison des simulations et des mesures par capteurs fixes

Le détail des évaluations statistiques est proposé en annexe.

De manière générale les résultats montrent que le modèle SIRANE simule correctement les concentrations en oxydes d'azote et en PM10. Pour les PM10, il y a moins de variabilité dans les concentrations modélisées que pour les oxydes d'azote. Toutefois, dans l'ensemble, SIRANE décrit mal les valeurs de concentrations élevées.

A noter la présence de quelques valeurs aberrantes sur les box-plot des PM10 certainement dues à des données d'entrées de fond invalides puisqu'elles sont présentes sur le box-plot des mesures de Saint-Etienne Sud (Figure 17).

Le capteur de Saint-Etienne Sud a été utilisé comme pollution fond en entrée du modèle. Les résultats de modélisation pour les particules particulièrement sont logiquement fidèles à la mesure en ce capteur (Figure 17). Des écarts plus grands l'hiver que l'été sont observés pour les oxydes d'azote car le fond utilisé en entrée a été réduit par un coefficient moyen 30%, valeur moyenne de l'influence du trafic.

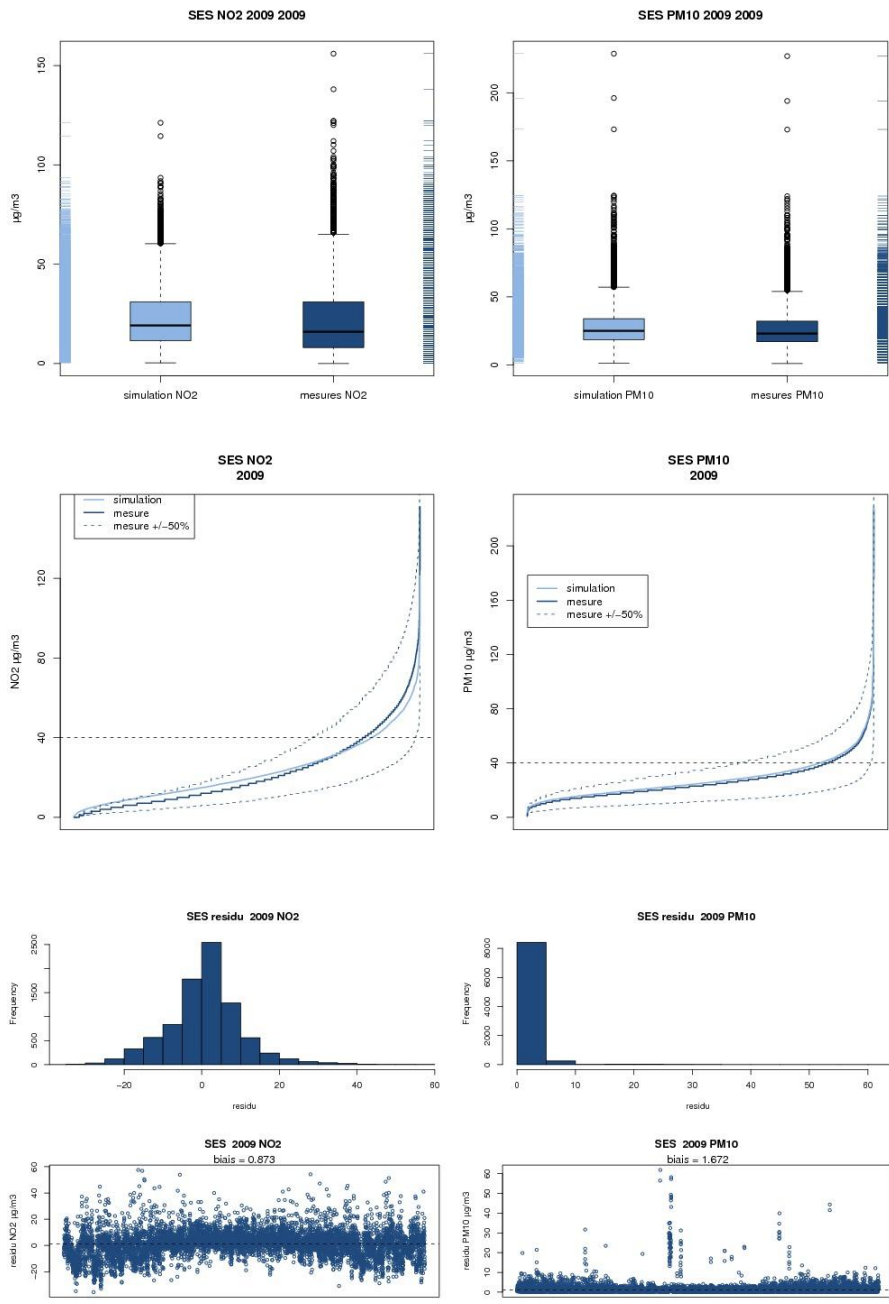


Figure 17 : Box-Plot, Quantile-Quantile plot des concentrations simulées et mesurées et histogramme des erreurs au capteur Saint-Etienne Sud.

Au capteur de Firminy, la position de la médiane, la largeur de la boîte et la position des moustaches sont sensiblement similaires pour les valeurs simulées et les valeurs mesurées que ce soit au regard du dioxyde d'azote ou des PM10. Le modèle modélise donc correctement la distribution des concentrations (Figure 18).

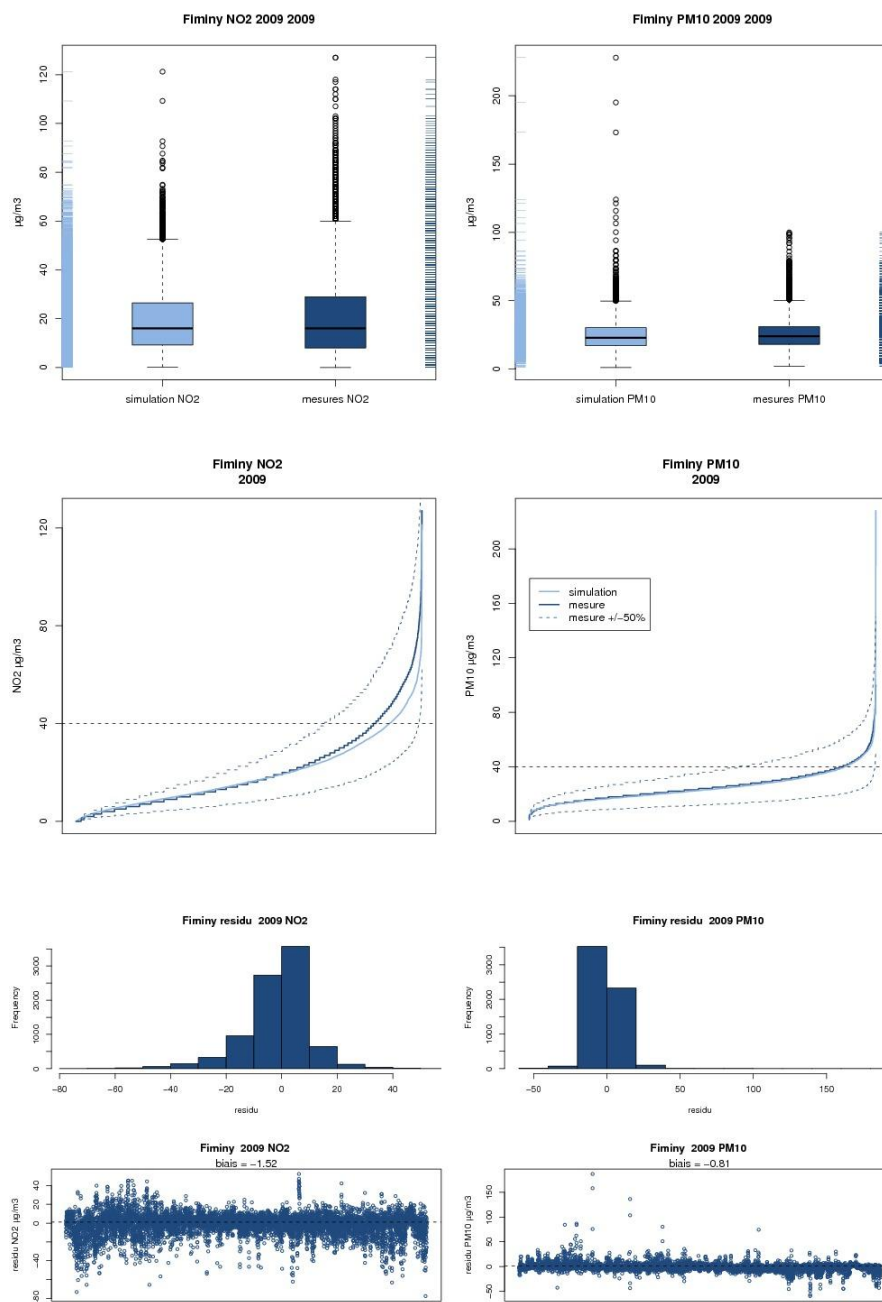


Figure 18 : Box-Plot, Quantile-Quantile plot des concentrations simulées et mesurées et histogramme des erreurs au capteur Fiminy.

Au niveau de la station trafic Saint-Etienne Rond-Point, le champ de concentration simulé par SIRANE est très satisfaisant pour les deux polluants étudiés. Les distributions des valeurs simulées et observées s'accordent bien. Cette concordance s'explique par la proximité de la pollution de fond adopté pour la mise en œuvre du modèle. Toutefois, pour les fortes valeurs le modèle peine à les représenter (Figure 19).

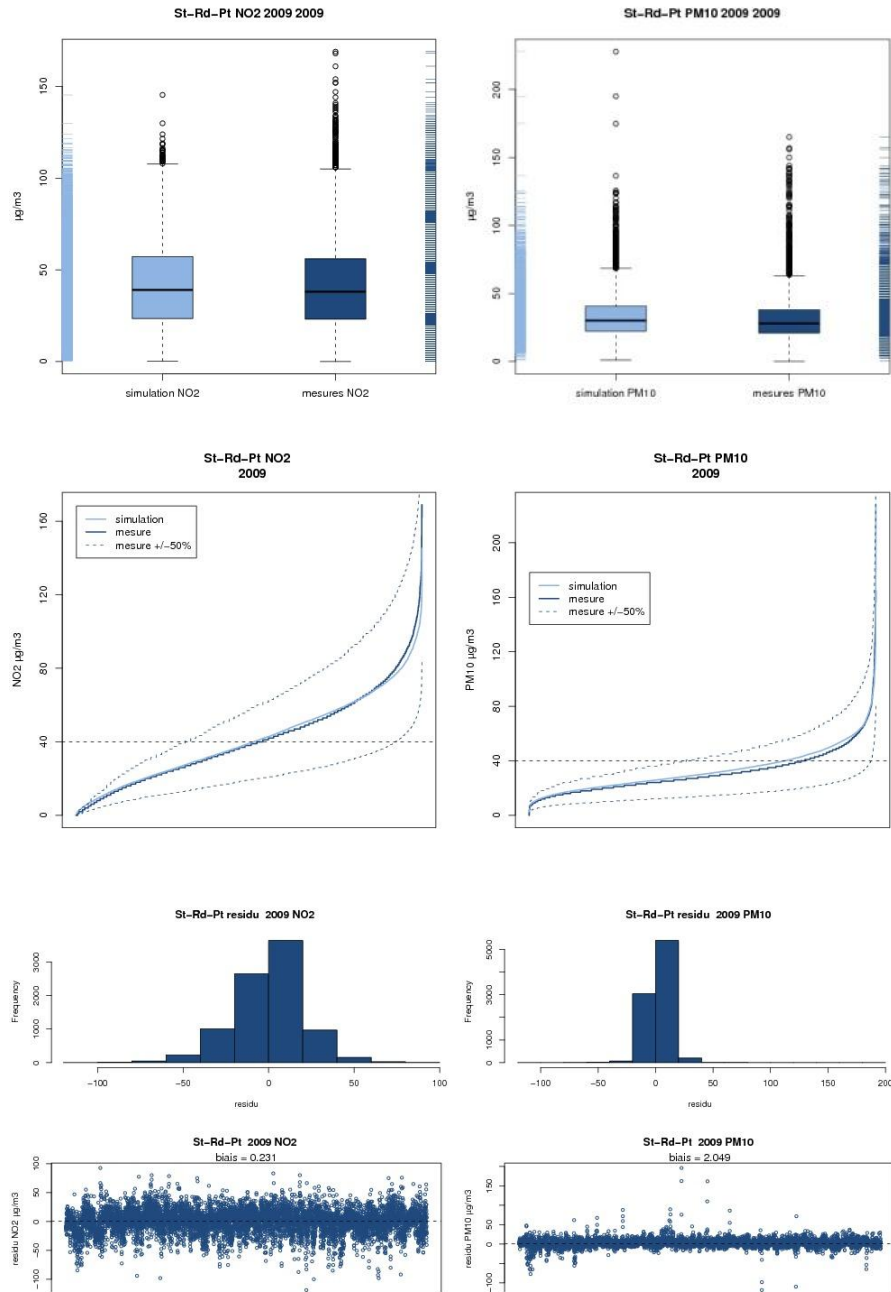


Figure 19 : Box-Plot, Quantile-Quantile plot des concentrations simulées et mesurées et histogramme des erreurs au capteur Saint-Etienne Rond-Point.

Au capteur de Coubertin, les graphiques montrent une tendance générale de sous-estimation des résultats modélisés en particulier pour les valeurs hautes où l'étendue des valeurs élevées est plus grande pour la mesure que pour la simulation (Figure 20). L'erreur modèle mesure reste très convenable. Il s'agit du capteur le moins bien représenté par SIRANE. Le capteur est situé dans la continuité l'A72 et subit l'influence directe de cet axe à fort trafic dans des conditions de vents de sud. Les écarts peuvent être expliqués par une météorologie et une pollution de fond non adéquat pour cette partie du domaine. Des mesures complémentaires dans cette zone renforceraient la connaissance de la météorologie et de la qualité de l'air. Ces données seraient aussi utiles à l'amélioration des simulations du modèle.

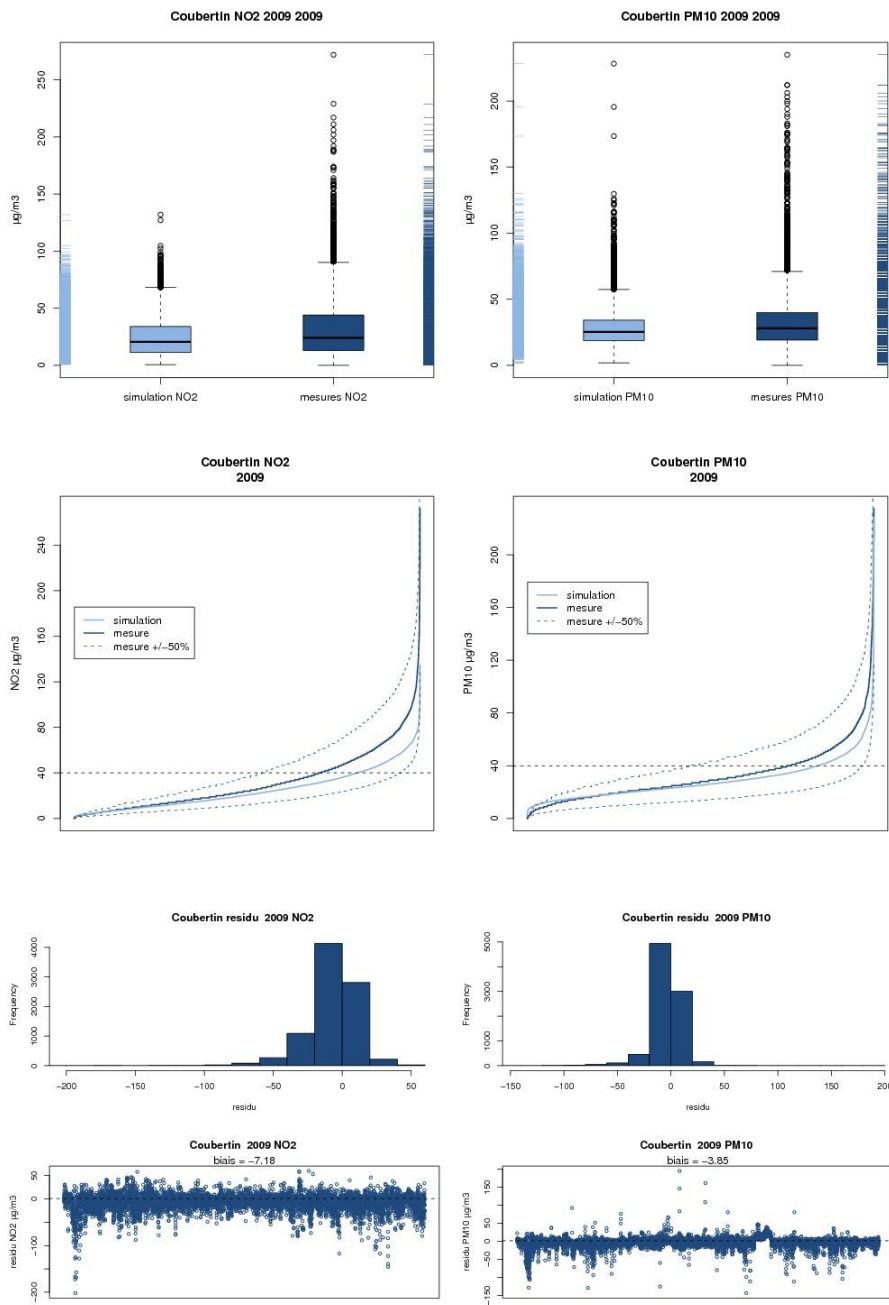


Figure 20 : Box-Plot, Quantile-Quantile plot des concentrations simulées et mesurées et histogramme des erreurs au capteur Coubertin.

Au capteur de Saint-Chamond, la distribution des concentrations est modélisée par SIRANE de manière pertinente malgré une légère tendance générale à la sous-estimation des valeurs mesurées (Figure 21). La distribution des erreurs est symétrique.

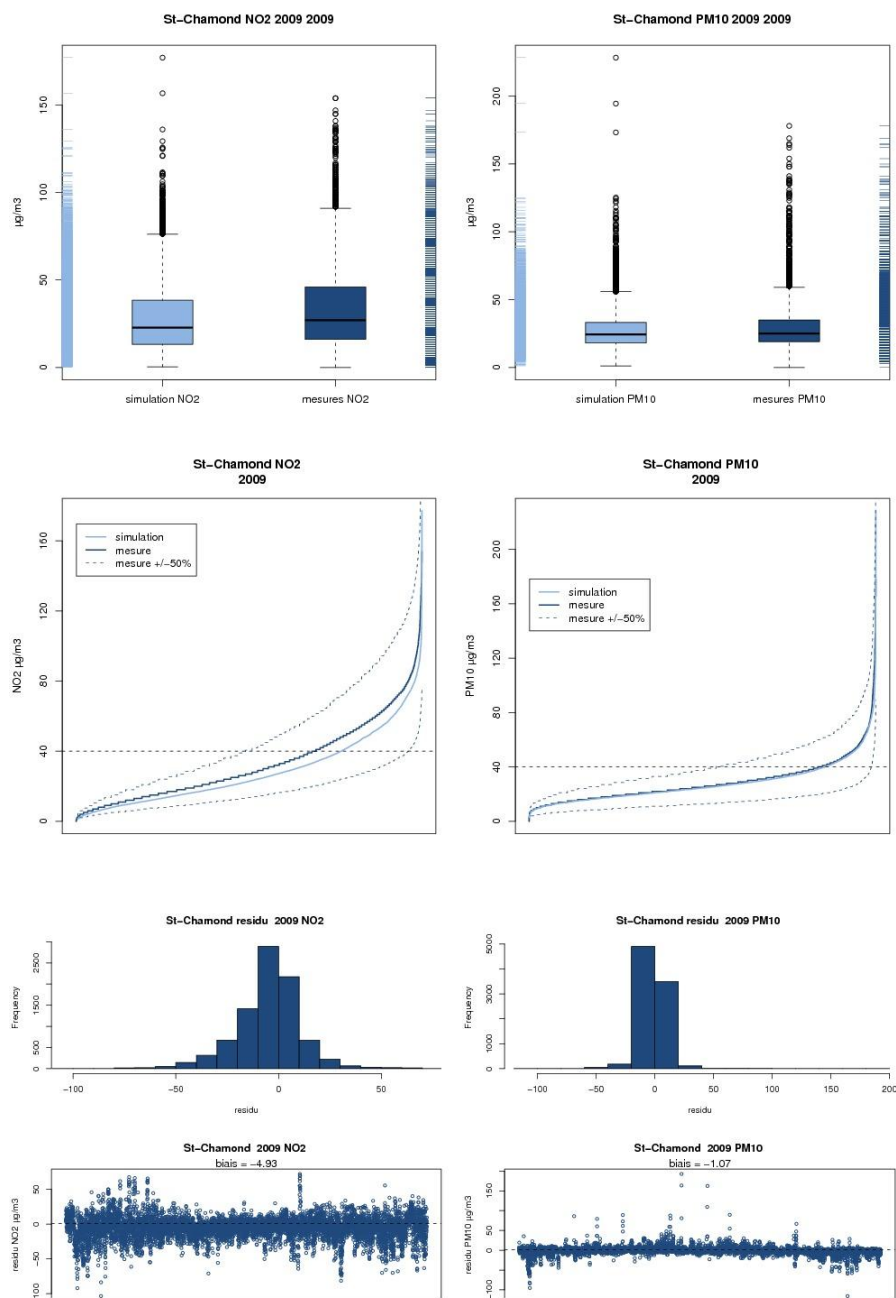


Figure 21 : Box-Plot, Quantile-Quantile plot des concentrations simulées et mesurées et histogramme des erreurs au capteur Saint-Chamond.

A la station trafic Rive de Gier, d'après la Figure 21, une sous-estimation des valeurs faibles à moyennes est observée notamment pour le dioxyde d'azote.

Une valeur de fond spécifique à ce domaine en entrée du modèle renforcerait la modélisation même si les résultats respectent les intervalles de tolérance. La ville de Rive de Gier possède une activité industrielle non négligeable, cette composante peut faire défaut au calcul des concentrations. Du point de vue de la météorologie, les vents mesurés par la station météorologique Saint-Chamond Plaine pose des interrogations quant à sa représentativité pour l'aérodologie de la ville de Rive de Gier levées par l'absence de vent provenant du nord-est (Figure 10).

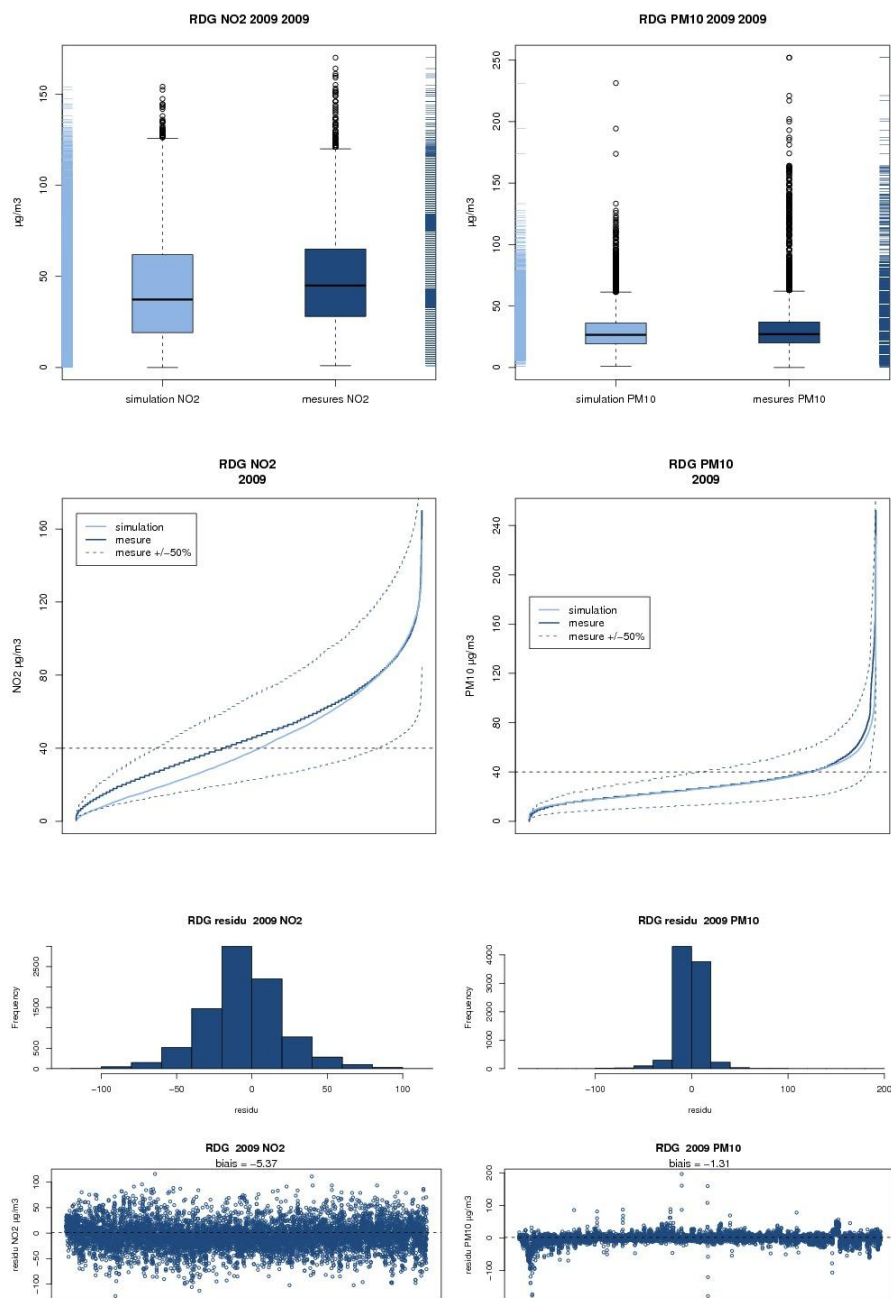


Figure 22 : Box-Plot, Quantile-Quantile plot des concentrations simulées et mesurées et histogramme des erreurs à au capteur Rive de Gier.

2. Comparaison des simulations et des mesures temporaires

3.2.1. PSQA de Saint-Etienne

Le modèle reproduit l'évolution des concentrations au niveau du moyen mobile de manière très convenable (Figure 23). En revanche, au niveau de la cabine mobile, les niveaux de concentration modélisés sont nettement surestimés par SIRANE (Figure 24).

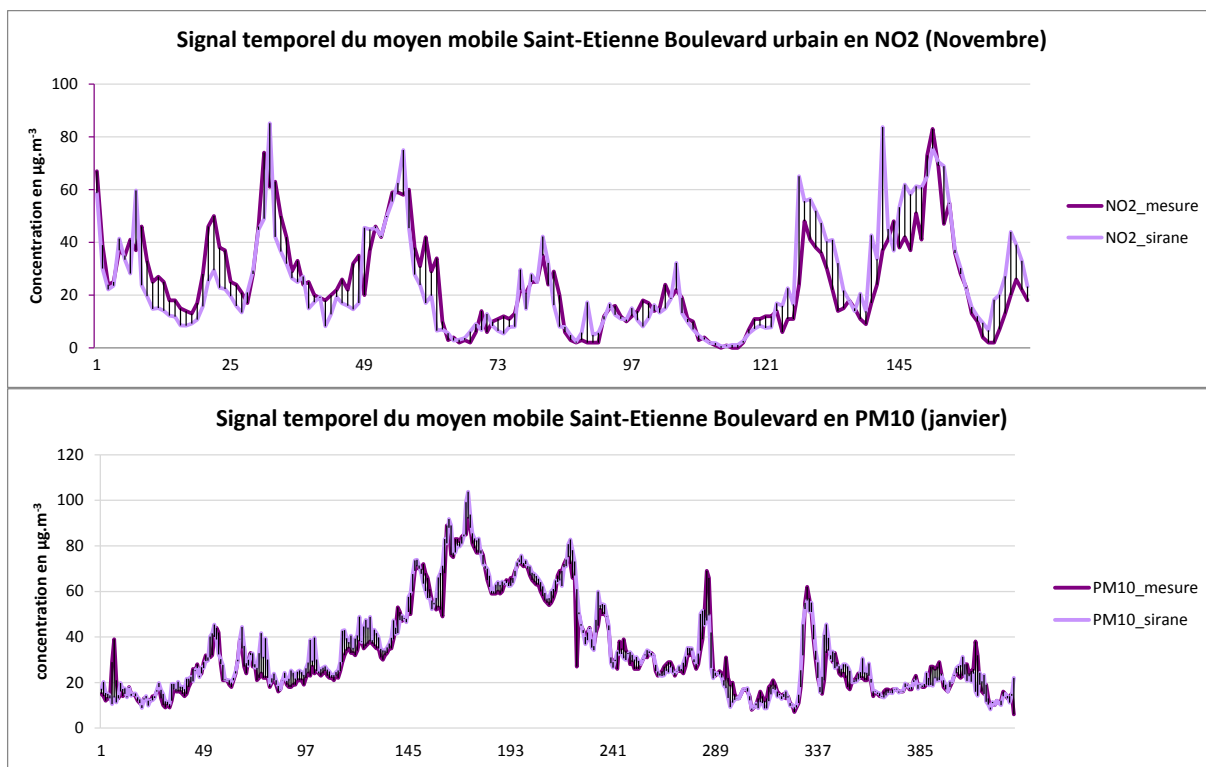


Figure 23 : Evolution temporelle de la concentration mesurée par le mobile au cours de la campagne d'hiver. Comparaison avec la simulation SIRANE.

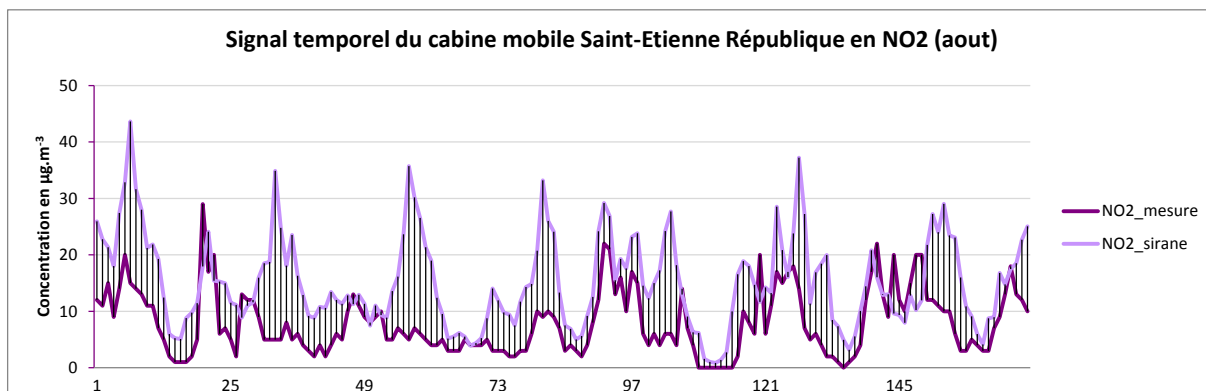


Figure 24 : Evolution temporelle de la concentration mesurée par la cabine mobile au cours de la campagne d'été. Comparaison avec la simulation SIRANE.

Les comparaisons modèle/mesure sur la moyenne partielle (moyenne des quatre périodes de mesures) révèlent une bonne description du champ de concentration sur l'ensemble de la zone investiguée du boulevard urbain. L'erreur maximum est de 6%. L'exception à ces bons résultats est observée au niveau de la cabine mobile où SIRANE surévalue de 24% la moyenne partielle (Figure 25). L'origine de cet écart provient de l'année de quantification des émissions. Les données d'entrées ayant été utilisées dans la modélisation du trafic 2009 sont issues de l'année 2006, avant la modification de la voie en sens unique.

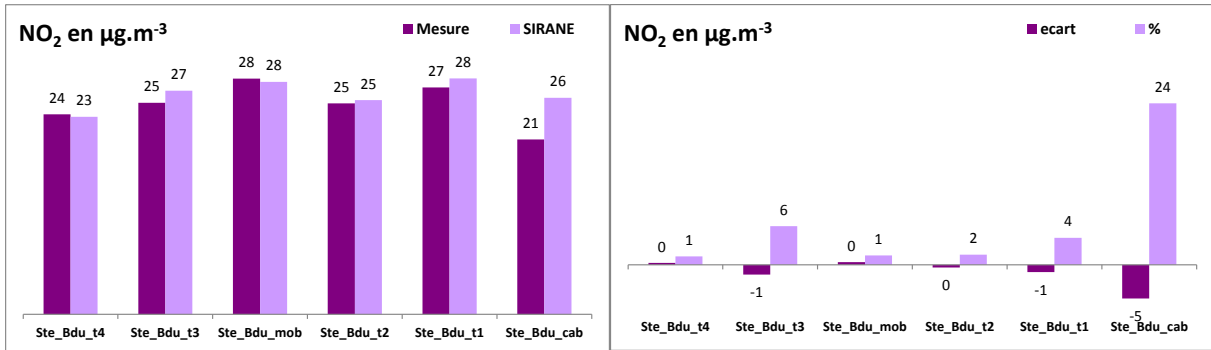


Figure 25 : Concentration en dioxyde d'azote moyennée sur les 4 périodes de mesures de 15 jours. Ecart relatif à la mesure et pourcentage d'erreur associé.

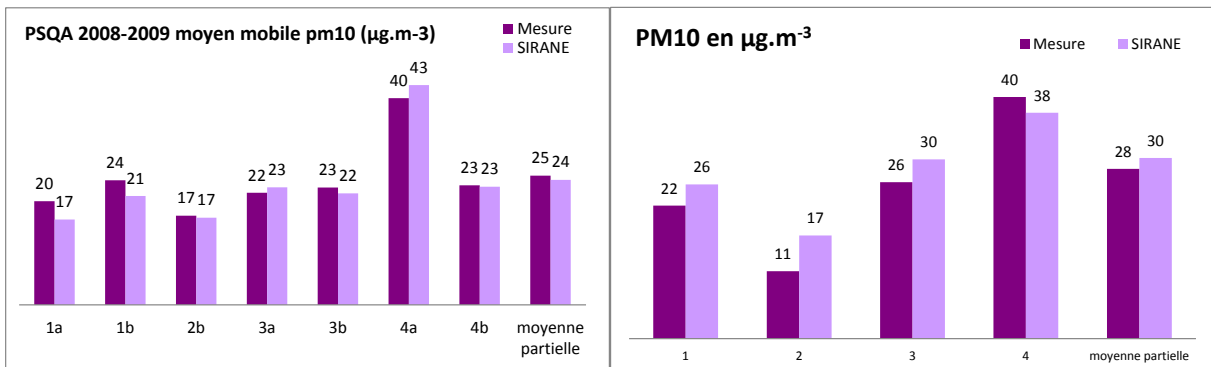


Figure 26 : Concentrations en PM10 mesurées et simulées au niveau du moyen mobile sur les 4 périodes de mesures de 15 jours.

Lorsque les concentrations simulées sur chaque période de mesure sont confrontées aux mesures (Figure 27) une bonne corrélation est observée.

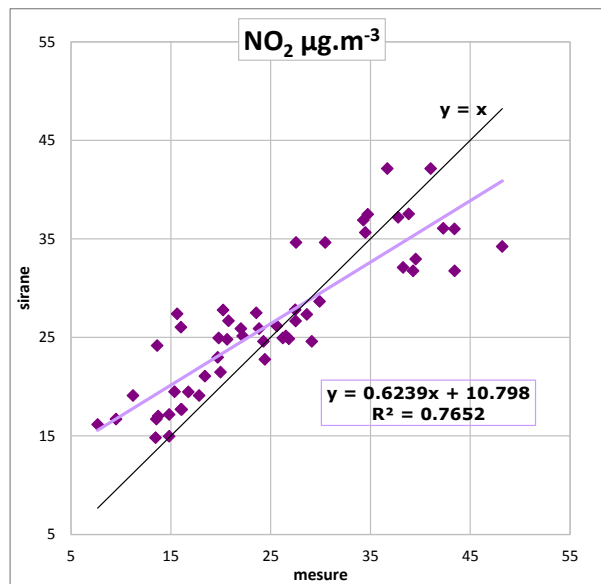


Figure 27 : Scatter-plot des concentrations modélisées sur chaque campagne en fonction des valeurs mesurées

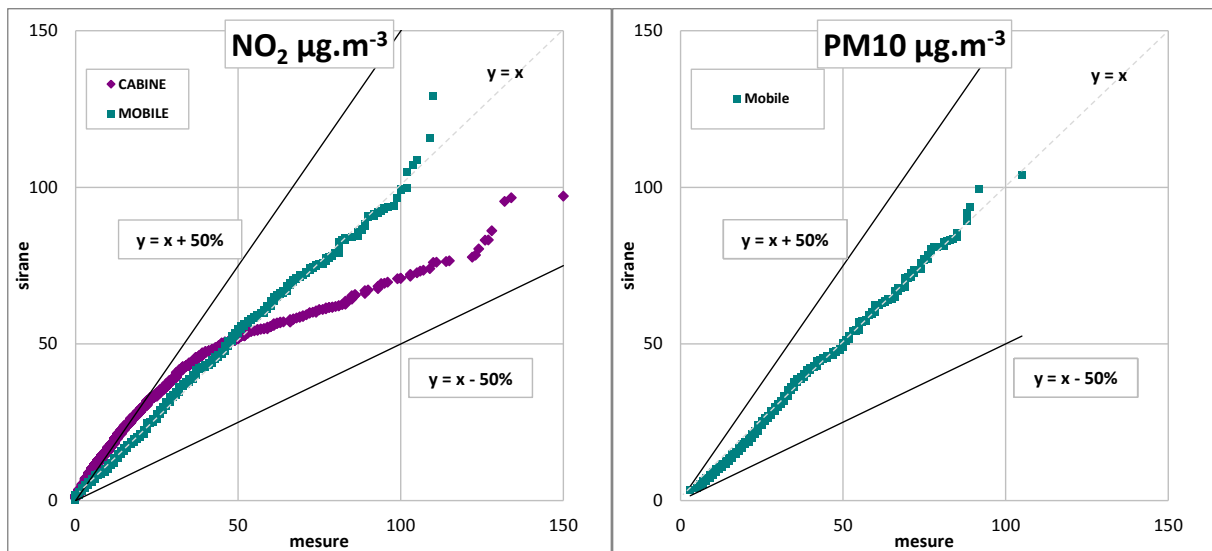
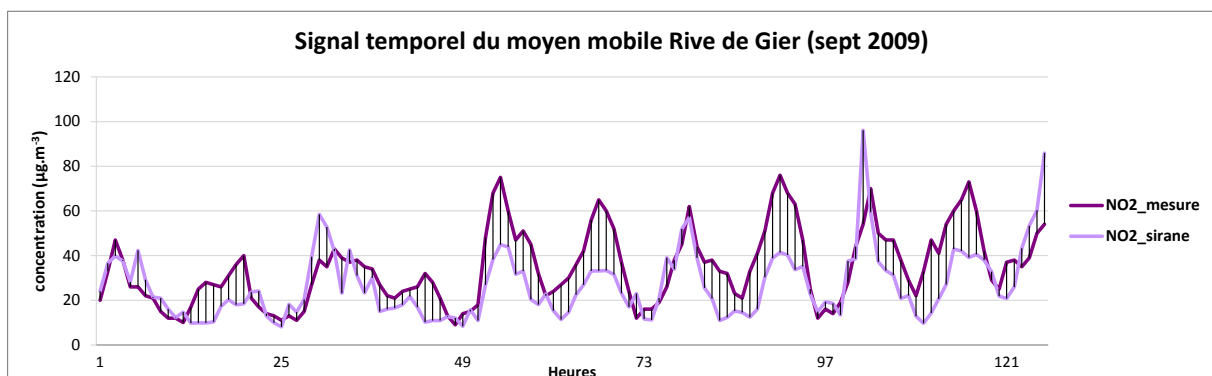


Figure 28 : Quantile-Quantile Plot des concentrations horaires au niveau du moyen mobile et de la cabine mobile sur l'ensemble des périodes de mesures.

Les graphiques de la Figure 28 montrent que les distributions des concentrations horaires modélisées en NO₂ et en PM₁₀ sont en adéquation avec les distributions des concentrations mesurées correspondantes et ne dépassent pas les 50% d'erreur pour le moyen mobile. En ce qui concerne la cabine mobile la distribution des concentrations modélisées est surestimée pour les valeurs faibles et sous-estimée pour les valeurs fortes.

3.2.2. PSQA de Rive de Gier

La modélisation des niveaux de pollution par SIRANE au cours des campagnes de mesures investiguées dans le cadre du PSQA de Rive de Gier produit de bons résultats en dépit d'une légère sous-estimation générale. Cette tendance a également été constatée lors de l'analyse des résultats par comparaison au capteur fixe (Figure 22). La donnée utilisée comme pollution de fond en entrée du modèle ne prend pas en compte une composante industrielle non négligeable.



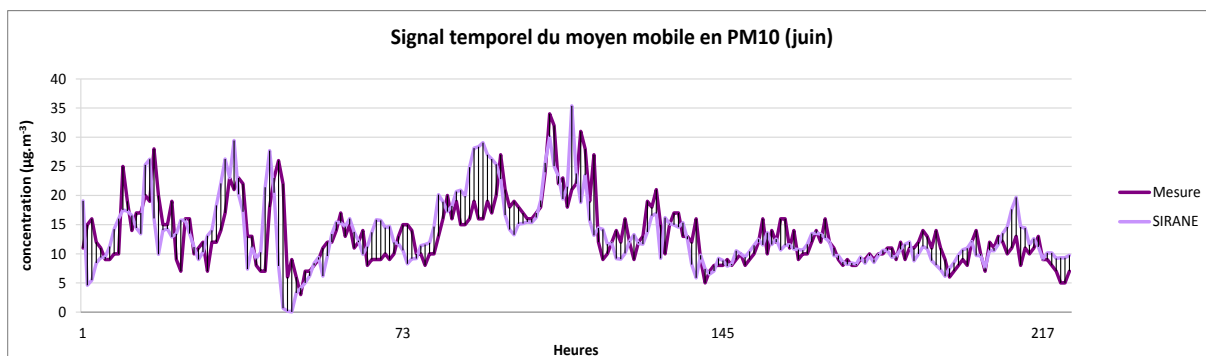


Figure 29 : Evolution temporelle de la concentration mesurée par le moyen mobile au cours des périodes investiguées. Comparaison avec la simulation SIRANE.

Les Figure 29 et Figure 30 illustrent l'adéquation des concentrations modélisées et mesurées au cours du temps.

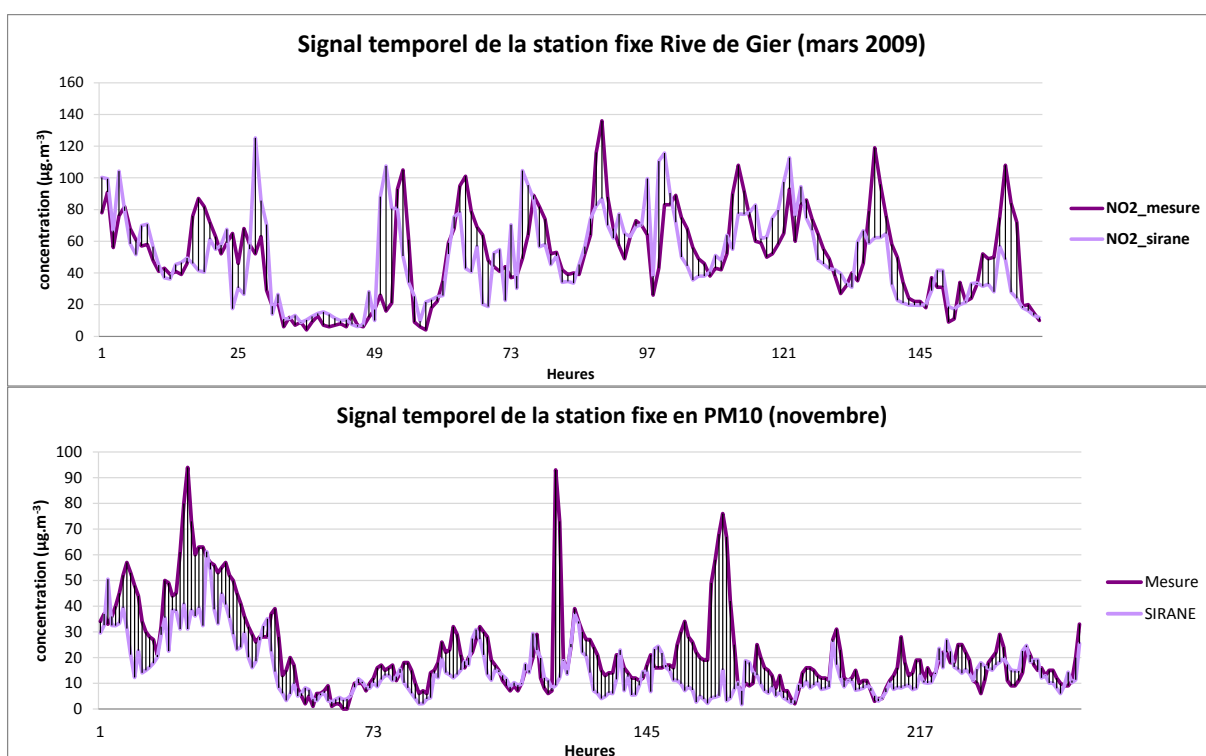


Figure 30 : Evolution temporelle de la concentration mesurée par la station Rive de Gier au cours des périodes investiguées. Comparaison avec la simulation SIRANE.

En moyenne sur les quatre périodes de mesure, à l'exception du tube n°3, les erreurs du modèle sont inférieures à 20% (Figure 31). Le tube n°3 est positionné sur un flanc de la vallée du Gier. Il est donc en hauteur par rapport aux autres sites surveillés. Le niveau de pollution de fond en ce point doit certainement être plus faible qu'au fond de la vallée.

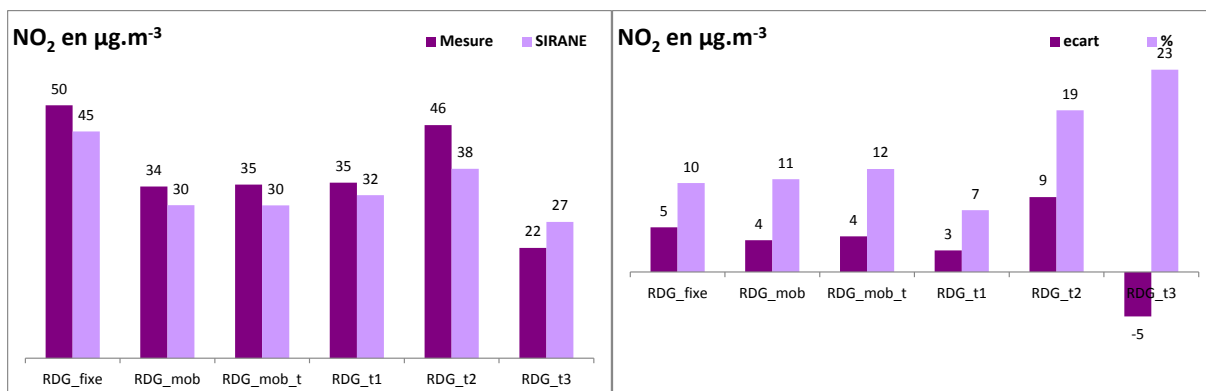


Figure 31 : Concentration en dioxyde d'azote moyennée sur les 4 périodes de mesures de 15 jours

En pm10, les erreurs de modélisation varient en fonction de la période de mesure. Les moyennes partielles – représentatives d'une année complète – modélisées, concordent bien avec la réalité (Figure 32).

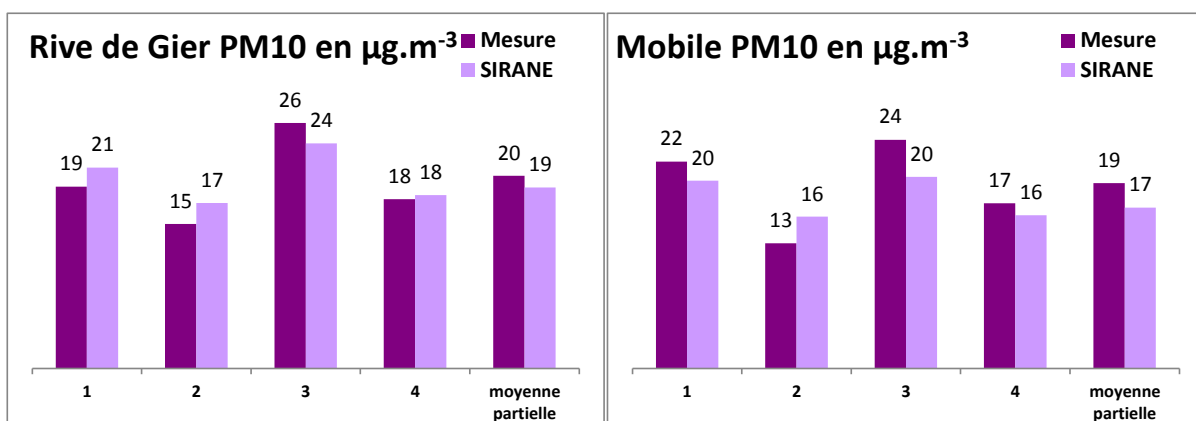


Figure 32 : Concentrations en PM10 mesurées et simulées au niveau de la station fixe Rive de Gier et du moyen mobile sur les 4 périodes de mesures de 15 jours.

D'après la Figure 33, les concentrations simulées et mesurées sont corrélées à 72%.

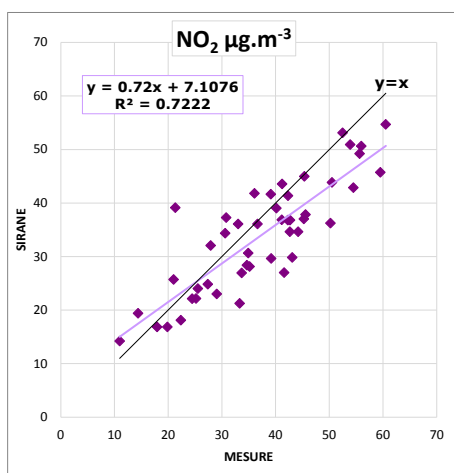


Figure 33 : Scatter-plot des concentrations modélisées sur chaque campagne en fonction des valeurs mesurées

Les distributions des concentrations horaires estimées par SIRANE au niveau de la station fixe et du moyen mobile respectent l'intervalle de tolérance comme le montre les graphes de la Figure 34.

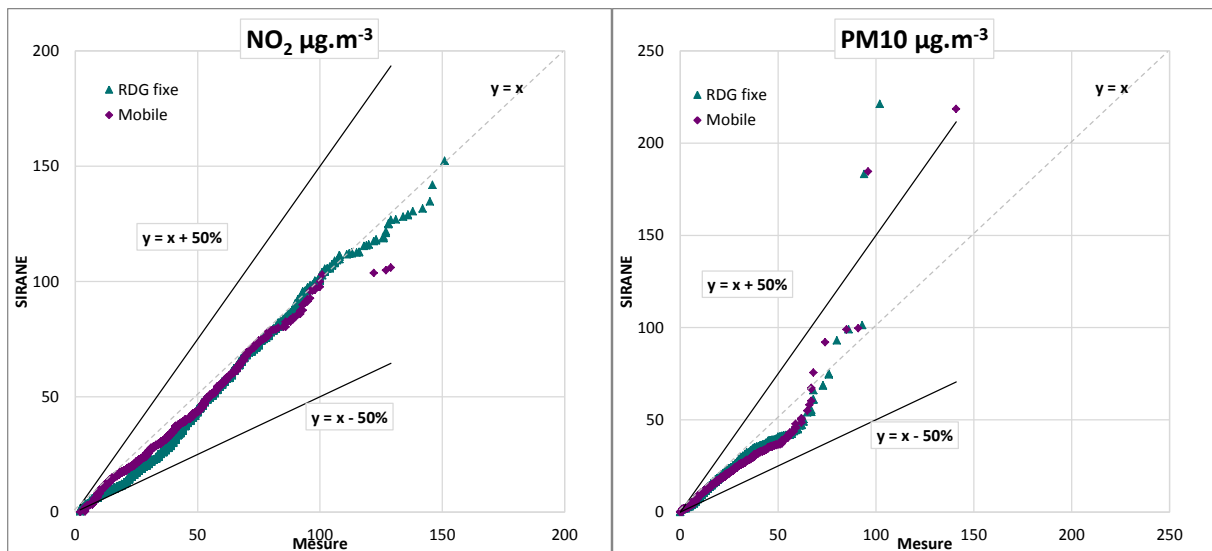


Figure 34 : Quantile-Quantile Plot des concentrations horaires au niveau du moyen mobile et de la cabine mobile sur l'ensemble des périodes de mesures.

Conclusion : Cette étape de validation, effectuée par comparaison aux mesures permanentes et temporaires, a permis de vérifier la capacité du modèle à simuler convenablement les concentrations en dioxyde d'azote et en PM10. Le modèle est validé.

3. Cartographies annuelles

La Figure 35 donne une représentation cartographique des niveaux de concentration calculés par le modèle SIRANE sur le domaine d'étude. La Figure 36 fournit un exemple d'analyse de ces cartographies par rapport aux valeurs réglementaires.

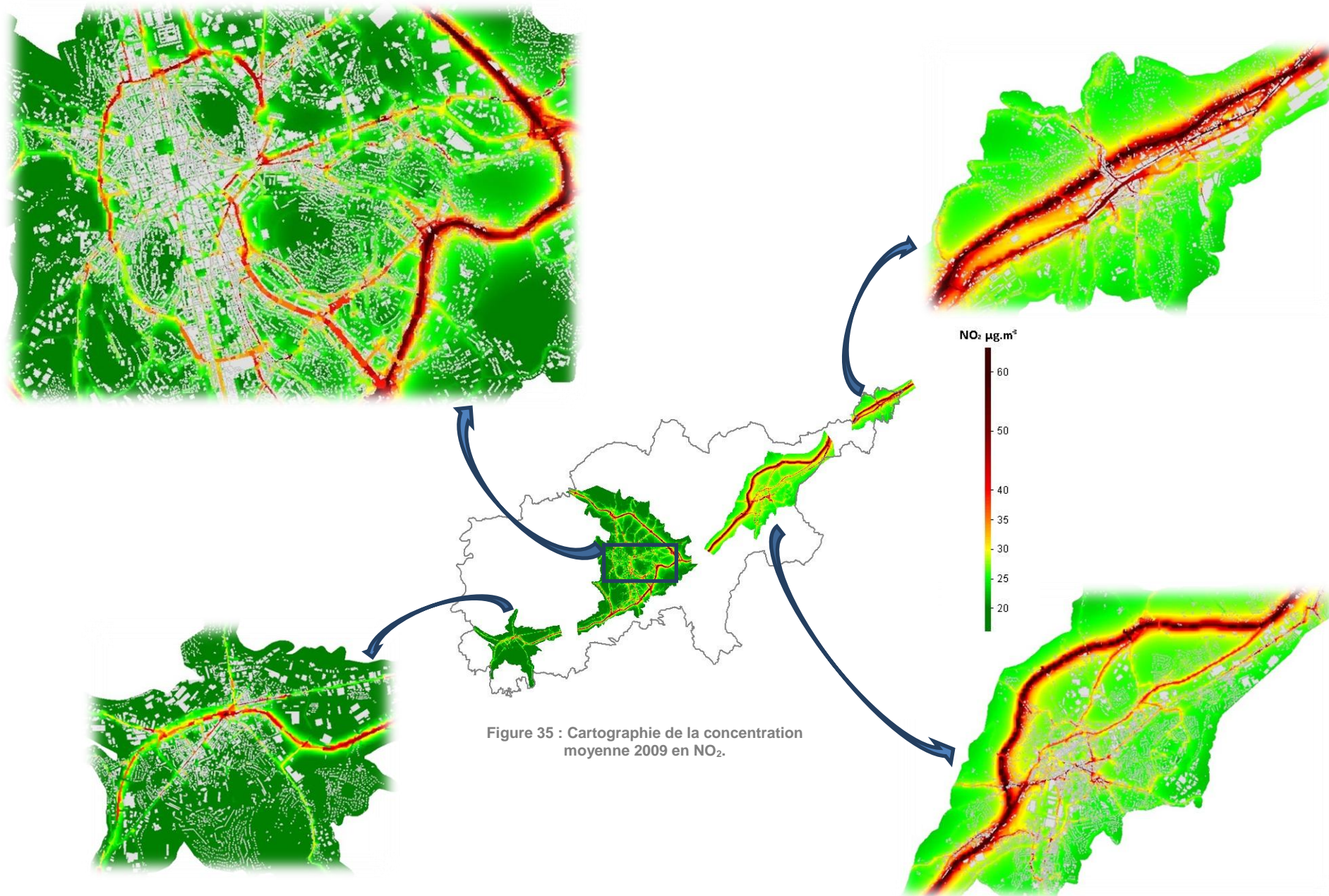


Figure 35 : Cartographie de la concentration moyenne 2009 en NO₂.

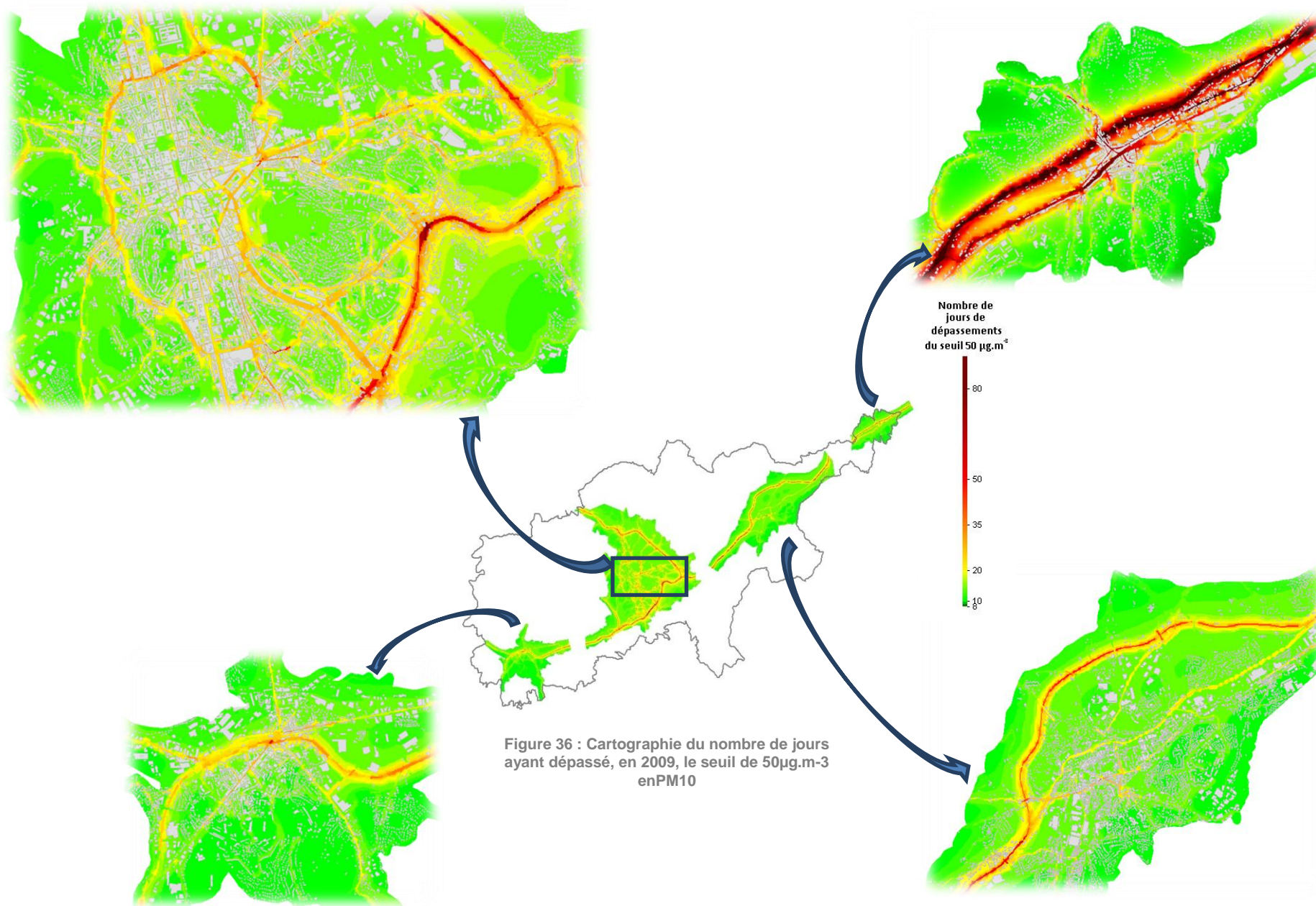


Figure 36 : Cartographie du nombre de jours ayant dépassé, en 2009, le seuil de 50µg.m⁻³ enPM10

4. Evaluation d'un scénario prospectif

Cette évaluation repose sur la comparaison d'un état de base et d'un état prospectif, tous deux simulés par SIRANE. Dans le cadre de l'évaluation du PPA de l'agglomération stéphanoise, l'année 2007 a été définie comme l'état de base et l'année 2015 comme l'état prospectif.

Pour la simulation de l'état de base, la méthodologie ayant servi à valider l'année 2009 a été appliquée sur l'année 2007.

Pour la simulation de l'état prospectif, seule la météorologie 2007 est conservée tandis que la pollution de fond et les émissions routières sont modifiées.

La pollution de fond mesurée par la station de Saint-Etienne Sud est ajustée avec le coefficient d'évolution des concentrations entre 2007 et 2015 obtenu grâce à la modélisation régionale. L'une des hypothèses retenues pour la modélisation régionale de la prospective 2015 est une réduction des intrants de 40% pour les oxydes d'azote (contribution des émissions d'oxyde d'azotes provenant de l'extérieur de l'agglomération stéphanoise).

Concernant les émissions routières, elles sont ajustées avec le coefficient d'évolution des trafics et du parc de véhicules roulant.

Les Figure 37, Figure 38 et Figure 39 illustrent le gain de concentration en dioxyde d'azote par rapport à l'état de base. En 2015, avec ces hypothèses, une réduction de 6 à 8 $\mu\text{g.m}^{-3}$ est estimée sur le centre de la ville de Saint-Etienne.

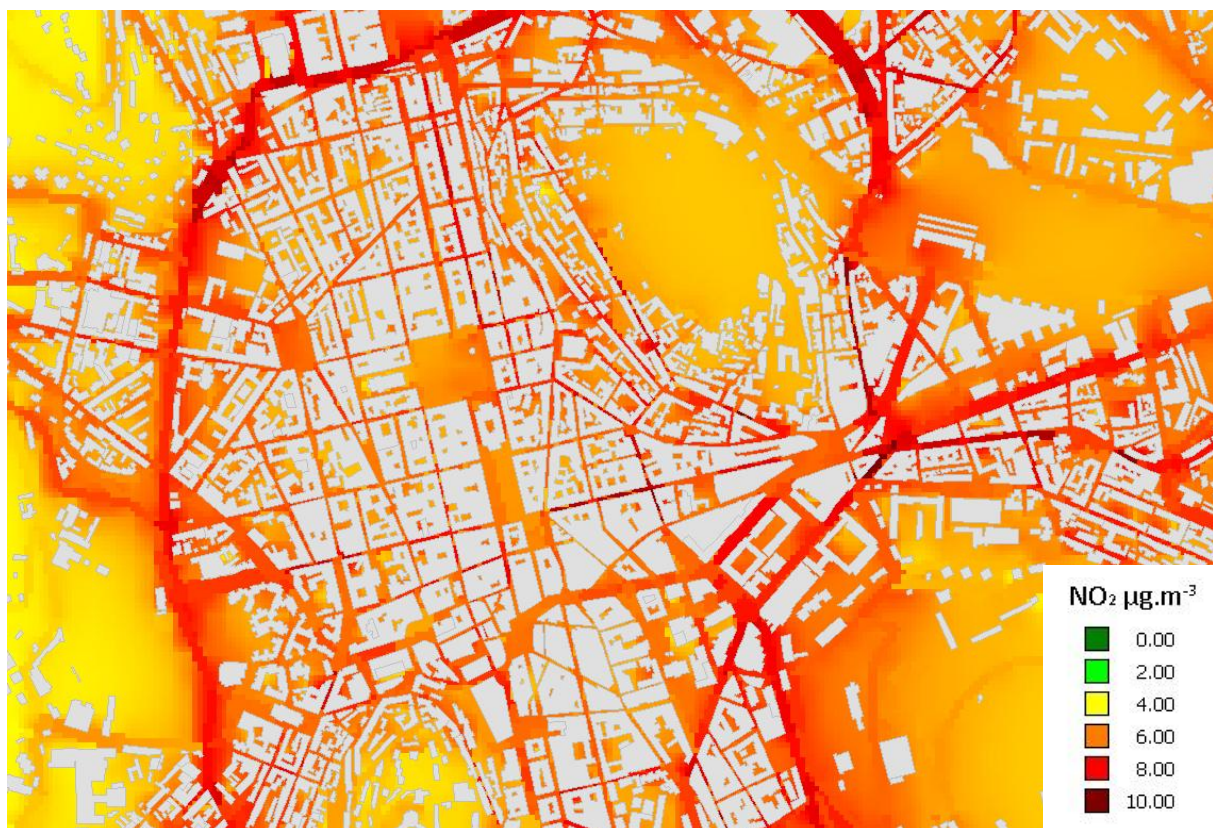


Figure 37 : Cartographie de la différence entre l'état de base 2007 et la prospective 2015. Zoom sur le centre de l'agglomération de Saint-Etienne.

En 2015, le modèle prévoit une réduction supérieure à $20 \mu\text{g.m}^{-3}$ en dioxyde d'azote au niveau de l'A47. En revanche, en centre ville de Saint-Chamond le gain ne dépasse pas les $20 \mu\text{g.m}^{-3}$ en dioxyde d'azote.

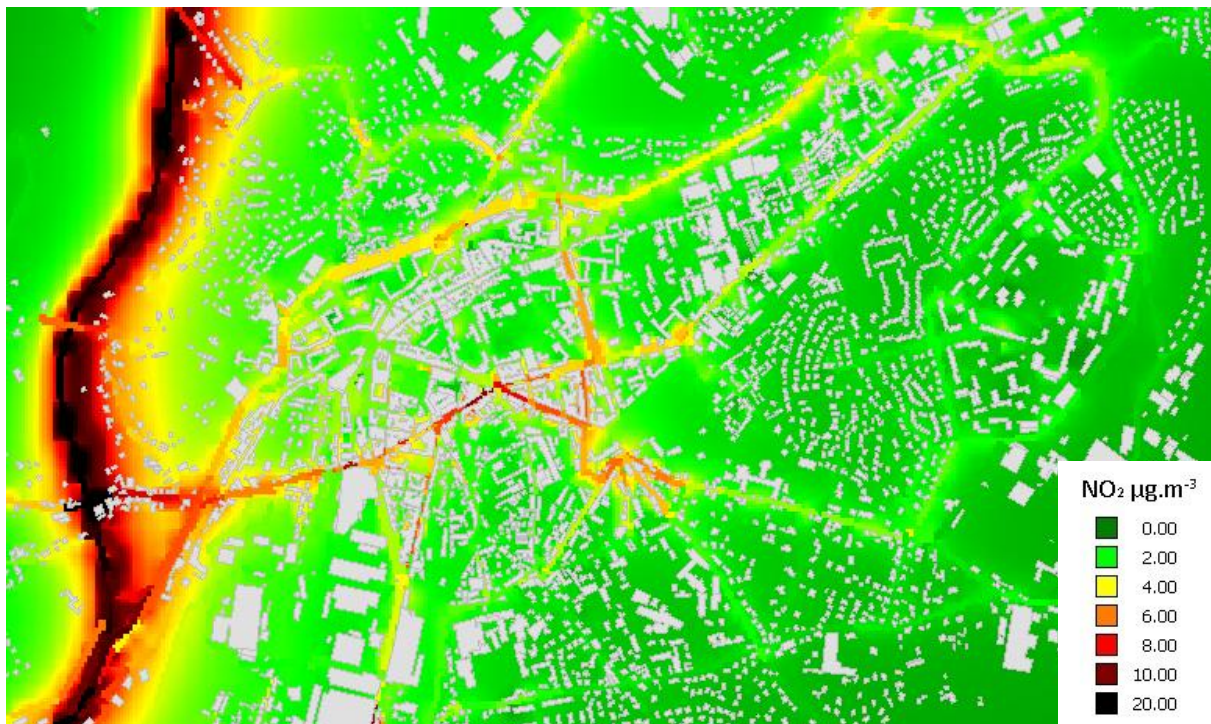


Figure 38 : Cartographie de la différence entre l'état de base 2007 et la prospective 2015. Zoom sur le centre de l'agglomération de Saint-Chamond.

Un gain de supérieur à $20 \mu\text{g.m}^{-3}$ en dioxyde d'azote est aussi attendu sur la portion de l'A47 de Rive de Gier en 2015 suivant les hypothèses prises en compte. Dans la rue principale, un gain d'environ 8 à $10 \mu\text{g.m}^{-3}$ est estimé par SIRANE.

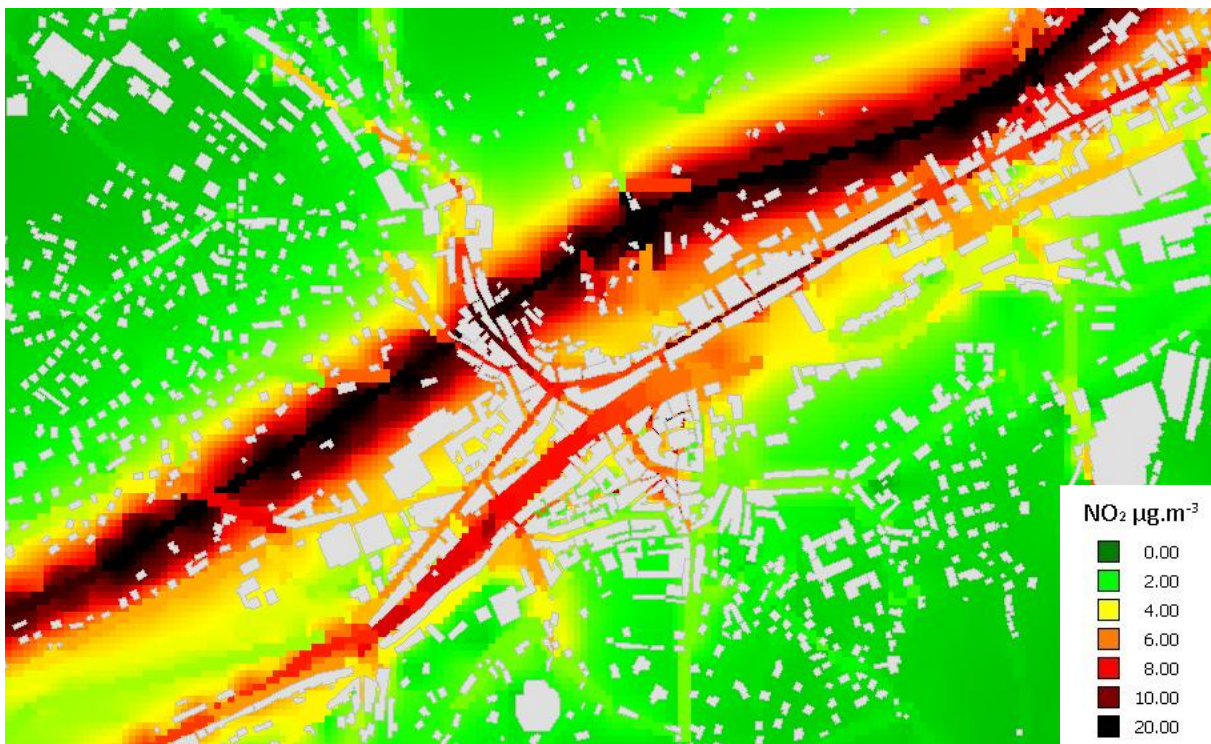


Figure 39 : Cartographie de la différence entre l'état de base 2007 et la prospective 2015. Zoom sur le centre de l'agglomération de Rive de Gier.

Conclusions et perspectives

Ce travail a permis, par la création d'un réseau de rues, par la quantification des sources émettrices, par l'analyse de conditions météorologiques et de pollution de fond de mettre place un modèle fine échelle (SIRANE) sur la zone du PPA de l'agglomération stéphanoise.

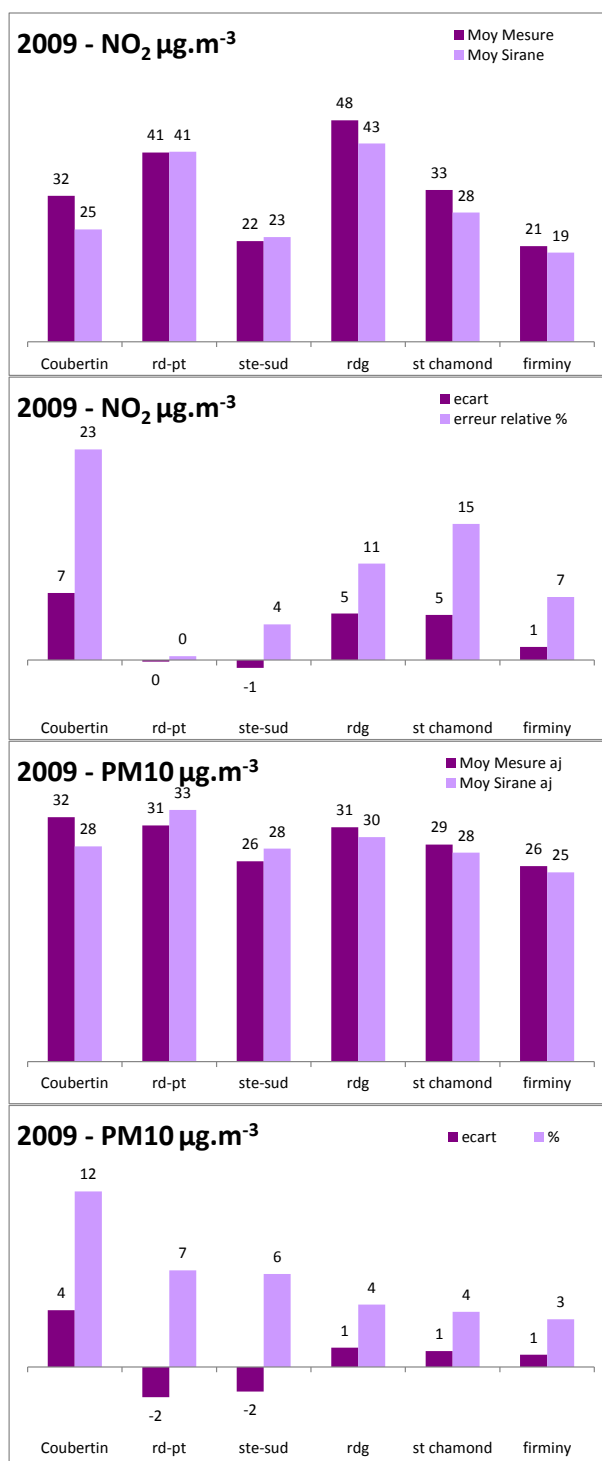
Les stations du réseau fixe et les campagnes de mesures temporaires ont participé à la phase de calage et de validation du modèle sur l'année 2009. De cette phase, il ressort que le modèle simule la dispersion des polluants (NO₂ et PM10) avec des erreurs acceptables par rapport à la mesure. L'observatoire de l'air géré par AMPASEL est désormais composé d'un réseau de mesures et d'outils de modélisation. Il permet de présenter un diagnostic plus précis de la qualité de l'air à l'échelle du territoire et contribuera au suivi annuel de l'évolution de la qualité de l'air.

Ce travail a également mis en évidence des points sur lesquels des améliorations sont à envisager :

- Dans le voisinage de la station Coubertin, où les niveaux de concentrations modélisées par SIRANE sont inférieurs à l'observation. Cette zone est densément habitée et constitue un enjeu dans la protection des populations. Des campagnes de mesures de qualité de l'air supplémentaires permettraient d'identifier les causes et de confirmer les hypothèses émises à savoir l'impact de l'A72 en conditions de vents de sud.
- A Rive de Gier, où une sous-estimation des résultats de modélisation a été observée. Ici ce sont des mesures complémentaires en termes de pollution de fond et de météorologie qui appuieraient la modélisation.
- Une actualisation des données utilisées pour la modélisation du trafic
- Dans les zones interurbaines où aucune information liée à la qualité de l'air n'est disponible et où le modèle n'est pas validé, des mesures s'avèrent nécessaires.

Enfin concernant la simulation de scénario d'émission, la plateforme de modélisation urbaine est à même d'apporter des éléments d'aide à la décision dans le cadre de politiques publiques d'aménagement ou de déplacements (PDU par exemple) en évaluant l'impact d'actions définies sur la qualité de l'air.

ANNEXE



Concentrations mesurées et modélisées en dioxyde d'azote et particule 10 moyennées sur l'année 2009 et les erreurs relatives associées à la mesure

NO₂	Coubertin	Saint Etienne Rond-Point	Saint-Etienne Sud	Rive de Gier	Saint Chamond	Firminy
Moyenne Mesure	32	41	22	48	33	21

Moyenne SIRANE	25	41	23	43	28	19
Médiane Mesure	24	38	16	45	27	16
Médiane SIRANE	21	39	19	37	23	16
Percentile 98 mesure	103	103	74	109	91	69
Percentile 98 SIRANE	68	95	63	112	80	56
Biais Fractionnel	-0.26	0.01	0.03	-0.11	-0.16	-0.07
R2	0.74	0.65	0.86	0.55	0.74	0.75
RMSE	19.6	20.1	9.7	26.6	16.5	11.6
Moyenne des erreurs	-7.2	0.2	0.9	-5.4	-4.9	-1.5
Ecart-type des erreurs	18	20	10	26	16	12

Indicateurs statistiques modèle-mesure pour l'année 2009 en dioxyde d'azote.

PM10	Coubertin	Saint Etienne Rond-Point	Saint-Etienne Sud	Rive de Gier	Saint Chamond	Firminy
Moyenne Mesure	32	31	26	31	29	26
Moyenne SIRANE	28	33	28	30	28	25
Médiane Mesure	25	30	25	27	24	23
Médiane SIRANE	28	28	23	27	25	24
Percentile 98 mesure	93	74	69	83	71	56
Percentile 98 SIRANE	71	76	70	73	70	53
Biais Fractionnel	-0.13	0.06	0.06	-0.04	-0.04	-0.03
R2	0.77	0.83	0.98	0.73	0.81	0.71
RMSE %	14.4	9.6	3.6	13.7	9.5	8.9
Moyenne des erreurs	-3.9	2.0	1.7	-1.3	-1.1	-0.8
Ecart-type des erreurs	14	9	3	14	9	9

Indicateurs statistiques modèle-mesure pour l'année 2009 en PM10.