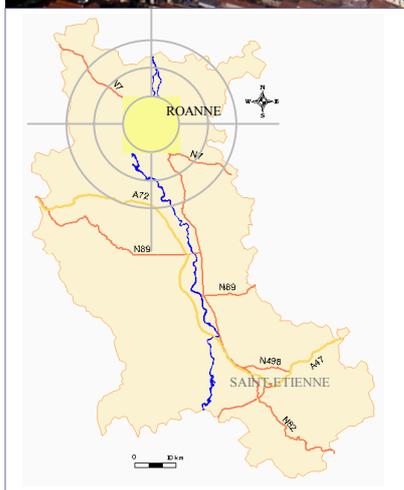


# Cartographie de l'ozone et du dioxyde d'azote sur l'agglomération roannaise



Eté 2001



Association de Mesure de la Pollution  
Atmosphérique de Saint-Etienne et  
du département de la Loire

2, Rue Chanoine Ploton  
42 000 Saint-Etienne  
Tél. : 04.77.91.18.80 / Fax : 04.77.91.18.84

Internet : [www.atmo-rhonealpes.org](http://www.atmo-rhonealpes.org)

**AMPASEL**  
**E-01.03/3**



Cette étude a reçu le soutien financier de l'ADEME.

Nous tenons à remercier particulièrement la ville de Roanne pour sa participation active à la réalisation de ce projet.

#### **Conditions de diffusion des données**

- ❖ Diffusion libre pour une réutilisation ultérieure des données à conditions que l'utilisation partielle ou totale de ce document fasse référence à l'Association AMPASEL.
- ❖ Données non rediffusées en cas de modification ultérieure des données.
- ❖ Sur demande, AMPASEL met à disposition les caractéristiques techniques de mesure et des méthodes d'exploitation des données mises en œuvre.



## Résumé

Cette étude de grande envergure, par la surface étudiée et les moyens mis en œuvre, a permis de visualiser à un instant donné la pollution atmosphérique de l'agglomération roannaise.

### Couverture de l'étude

Surface de 60 km<sup>2</sup>

population concernée : 80 000 habitants

### Moyens de mesure

Échantillonneurs passifs PASSAM AG O<sub>3</sub> (4 campagnes de 8 jours sur 58 sites)

Échantillonneurs passifs PASSAM AG NO<sub>2</sub> (2 campagnes de 15 jours sur 40 sites)

Station mobile : analyseurs de NO<sub>x</sub> - O<sub>3</sub>

Station fixe : NO<sub>x</sub> - O<sub>3</sub> - PM10 - SO<sub>2</sub>

### Logiciels d'exploitation

Interpolation géostatistique ISATIS® de la Société Géovariance

Système d'Information Géographique MAPINFO 6.5

Elle confirme la prédominance du dioxyde d'azote en centre ville de Roanne en raison d'une forte circulation automobile concentrée dans ce secteur très urbanisé. Mais il s'étend aussi à un secteur plus large comprenant les zones situées à proximité de la RN7 et la commune du Coteau. A noter, la rapide diminution des teneurs en NO<sub>2</sub> dès que l'on s'éloigne de ces sources d'émission.

Concernant l'ozone, le centre ville plus épargné semble jouer un rôle important sur les zones périurbaines et rurales à l'ouest de l'agglomération où on relève de l'ozone de fond en grande quantité. En fait, l'ozone produit en centre ville a la capacité de se déplacer dans les masses d'air pour venir s'accumuler en zone rurale pendant plusieurs jours tandis qu'il est détruit en ville au cours de la nuit. En situation de pic de pollution, la station fixe présente les mêmes profils d'ozone que la station mobile qui s'explique par une présence généralisée de ce polluant sur l'ensemble de l'agglomération.

Les concentrations mesurées sur la station fixe de Roanne, tant pour le NO<sub>2</sub> que pour O<sub>3</sub> sont bien représentatives des principaux phénomènes de pollution observés au cours de cette période, notamment pour les teneurs très élevées.

Un indice de qualité de l'air et une procédure d'information du public en cas de pic de pollution pourraient donc être diffusés à terme sur l'agglomération roannaise à partir de cette unique station de mesure.



## Table des matières

<b>INTRODUCTION</b>	<b>8</b>
<b>I - PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE</b>	<b>10</b>
<b>A - CHIMIE DE L'ATMOSPHÈRE</b>	<b>10</b>
1 - LES POLLUANTS PRIMAIRES	10
2 - LES POLLUANTS SECONDAIRES	10
<b>B - HISTORIQUE DE LA STATION FIXE DE ROANNE</b>	<b>12</b>
<b>C - MOYENS MIS EN ŒUVRE</b>	<b>14</b>
1 - ÉCHANTILLONNAGE PASSIF	14
2 - LES MOYENS MOBILES	15
<b>D - LA PÉRIODE DE MESURE</b>	<b>15</b>
<b>E - MAILLAGE DE LA ZONE D'ÉTUDE</b>	<b>16</b>
<b>D - DENSITÉ DE POPULATION</b>	<b>17</b>
<b>F - OCCUPATION DES SOLS</b>	<b>17</b>
<b>G - PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES</b>	<b>18</b>
1 - DIRECTION DU VENT	18
2 - LE RAYONNEMENT GLOBAL	19
3 - LA TEMPÉRATURE	19
<b>II - VALIDATION DES TUBES</b>	<b>21</b>
<b>A - L'ANALYSE DES FICHES DE SUIVI DES CAPTEURS</b>	<b>21</b>
<b>B - L'ANALYSE DES BLANCS</b>	<b>22</b>
<b>C - L'ANALYSE DES MULTIPLETS</b>	<b>22</b>
<b>E - CALCUL DES CONCENTRATIONS</b>	<b>23</b>
<b>III - COMPARAISON STATIONS FIXE ET STATION MOBILE</b>	<b>25</b>
<b>IV - CARTOGRAPHIE DU DIOXYDE D'AZOTE ET DE L'OZONE</b>	<b>29</b>
<b>A - MÉTHODOLOGIE</b>	<b>29</b>
1 - ANALYSE EXPLORATOIRE DES DONNÉES	29
2 - LA MODÉLISATION DU VARIOGRAMME EXPÉRIMENTAL	31
3 - LA VALIDATION CROISÉE	32
4 - LES TECHNIQUES DE KRIGEAGE	32
5 - L'ÉLABORATION DES CARTES	34
<b>B - REPRÉSENTATION SPATIALE DU DIOXYDE D'AZOTE</b>	<b>35</b>
<b>C - REPRÉSENTATION SPATIALE DE L'OZONE</b>	<b>37</b>
<b>CONCLUSION</b>	<b>41</b>
ANNEXE 1 : Cadre réglementaire pour la qualité de l'air ambiante	44
ANNEXE 2 : Adresse et localisation des sites de mesure ponctuels	45
ANNEXE 3 : Résultats du dioxyde d'azote par campagne	47
ANNEXE 4 : Résultats d'ozone par campagne	48



## **INTRODUCTION**

La surveillance de la qualité de l'air sur l'agglomération roannaise, deuxième agglomération du département de la Loire après celle de Saint-Etienne, a débuté en 1995 avec l'installation d'une station urbaine rue Gilbertès. Sur ce site sont mesurés en continu les principaux indicateurs de pollution urbaine, à savoir les oxydes d'azote, le dioxyde de soufre et les particules fines, ainsi que l'ozone traceur de la pollution photochimique.

En 1999, les premiers dépassements du seuil de recommandations et d'information de la population pour l'ozone ont été observés et se sont répétés au cours des étés 2000 et 2001. La Préfecture de la Loire a donc souhaité mettre en place une procédure d'information du public en cas d'épisode de pollution sur l'agglomération roannaise au même titre que celle appliquée sur Saint-Etienne depuis le 22 février 1999.

En préalable à ce projet d'arrêté, AMPASEL a désiré évaluer la répartition spatiale de l'ozone et du dioxyde d'azote à l'échelle de l'agglomération afin d'apprécier la représentativité de la station de mesure existante, dans le but :

- de déterminer l'application de cet arrêté préfectoral à partir d'une ou deux stations de mesure,
- de diffuser un indice de qualité de l'air quotidien, calculé sur la même base de l'indice ATMO de Saint-Etienne à partir d'une ou deux stations de mesure.

Ce projet de modélisation spatiale de pollution atmosphérique demande un grand nombre de points d'échantillonnage pour couvrir la majorité de la population. Pour ce faire, nous avons utilisé en complément des moyens de mesure automatique, la méthode de l'échantillonnage passif. Cette technique de mesure est basée sur la diffusion de l'air au travers de capteurs où sont piégés de manière sélective les polluants atmosphériques. Une analyse chimique ultérieure de ces tubes en laboratoire permet d'en déduire leur concentration.

L'objectif final de cette opération consiste à produire des cartes de concentration les plus proches de la réalité des deux polluants à risque sur l'agglomération. Ce travail a été réalisé à partir du logiciel de géostatistique Isatis® couplé au logiciel de cartographie MapInfo. Il permet de définir une incertitude attribuée à chaque valeur interpolée et d'affiner la précision de ces cartes en incluant des co-facteurs (densité de population, occupation des sols, relief) représentatifs de la zone d'étude et des phénomènes de pollution recherchés.



## I - PRESENTATION DE L'ETUDE

### A - Chimie de l'atmosphère

#### 1 - Les polluants primaires

La notion de polluants primaires regroupe l'ensemble des composés émis directement dans l'atmosphère par des sources anthropiques (automobiles, chauffage, industries).

Les principaux indicateurs mesurés sont les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, les composés organiques volatils, les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Ces molécules possèdent leur propre toxicité et jouent un rôle important dans la formation des polluants photochimiques.

#### 2 - Les polluants secondaires

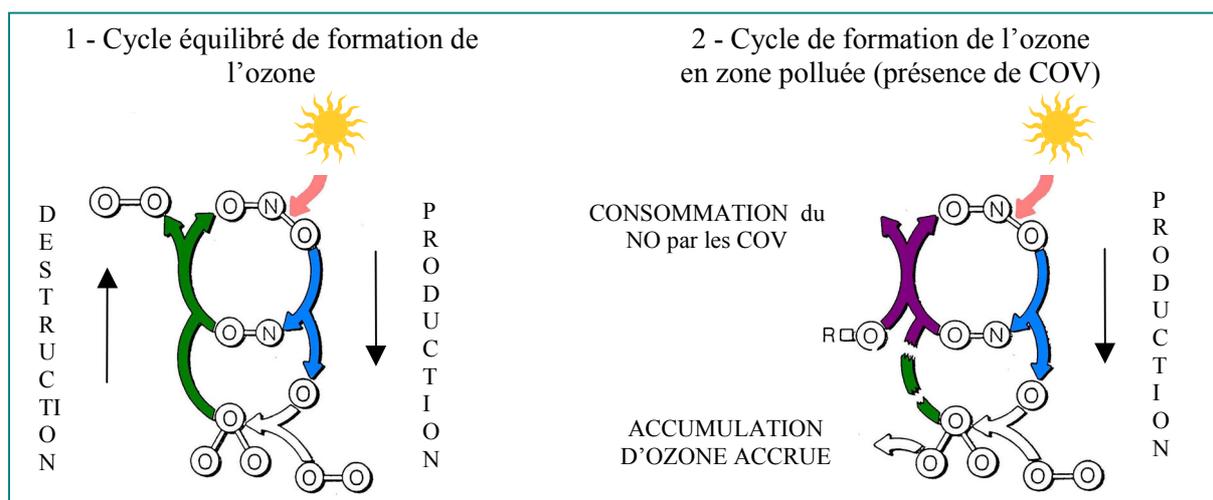
- Le cycle photochimique

L'ozone est un des composés clé de l'atmosphère, à la fois pour ces qualités réactives et radiatives. C'est un polluant secondaire issu de processus physico-chimique complexes.

En basse atmosphère, l'ozone est un polluant photochimique principalement présent en été et à l'origine ces dernières années de déclenchements de procédures de recommandations et d'information de la population.

Le rayonnement solaire est un paramètre essentiel dans le processus de formation de l'ozone puisqu'il va permettre la photodissociation des molécules chimiques.

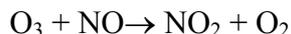
Description schématique du cycle de Chapman :



Quand les oxydes d'azote sont présents dans l'atmosphère (**cycle 1**), l'ozone peut résulter de la photolyse du dioxyde d'azote à des longueurs d'onde  $\lambda < 424$  nm.



Mais l'ozone ainsi formé peut réagir avec le monoxyde d'azote NO pour régénérer le dioxyde d'azote NO<sub>2</sub>. Ce cycle dit de Chapman permet ainsi une régulation de la production de l'ozone :



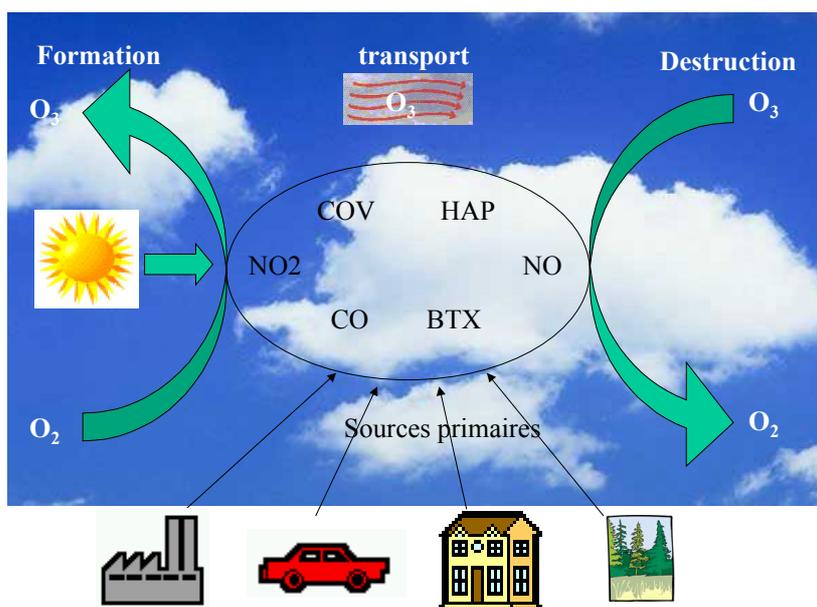
En atmosphère polluée, ces processus de formation et de destruction peuvent être déréglés par la présence d'autres polluants primaires (**cycle 2**).

C'est le cas pour certains hydrocarbures, les composés organiques volatils (COV) qui viennent perturber le cycle naturel NO<sub>x</sub>-O<sub>3</sub> décrit ci-dessus en produisant de l'ozone à partir de mécanismes d'oxydation initiés par les COV. L'oxydation s'effectue à travers une succession de réactions en présence de radicaux libres produits par le rayonnement solaire. Les radicaux résultant de ces réactions vont réagir avec le NO pour former du NO<sub>2</sub>. Le NO consommé par ces réactions n'intervient plus dans les réactions de destruction de l'ozone. La photodissociation de ce dernier conduit à la formation excessive d'ozone.

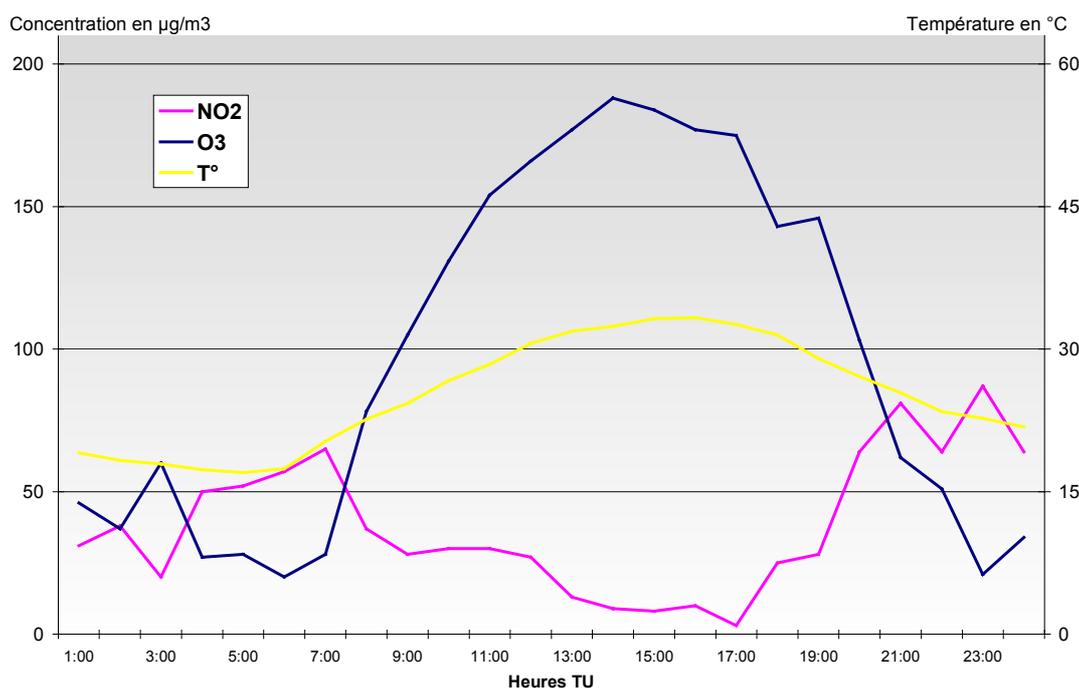
Pour étudier l'ozone, il est donc important de connaître le rapport COV/NO<sub>x</sub>. Si ce rapport est faible, synonyme d'un excès de NO<sub>x</sub> et principalement de NO, la formation d'ozone est ralentie. Cette situation se rencontre principalement dans les centres villes des agglomérations. En périphérie de ces agglomérations, la tendance est inversée avec un rapport plus fort. Les niveaux d'ozone peuvent alors atteindre des concentrations plus élevées qu'en centre ville.

La pollution photochimique par l'ozone s'effectue sous forme de pics soudain et intenses en milieu urbain alors que les niveaux relevés en zone rurale sont assez homogènes dans le temps. En effet, les émissions de polluants primaires en milieu rural sont minimales.

L'ozone produit en centre ville a une durée de vie maxi de quelques jours dans l'atmosphère. Par l'intermédiaire des masses d'air, ce polluant peut être transporté dans les zones rurales ou vers d'autres agglomérations. Dans ce dernier cas, l'ozone transporté s'ajoute à l'ozone produit sur place et induit des niveaux encore plus élevés.



- Profil journalier type



Le profil type de l'ozone est en forme de cloche : en début de matinée (entre 7h et 10h), on observe une augmentation des concentrations en polluants primaires liée aux déplacements automobiles entre le lieu de résidence et le lieu de travail. Sous l'action du rayonnement solaire, ces composés vont conduire à la formation et à l'accumulation de l'ozone dans l'atmosphère.

Les niveaux de pointe sont généralement atteints entre 15 et 17 heures, période de la journée où l'insolation est maximale. L'ozone rentre dans une phase stationnaire où il reste à des concentrations élevées.

Le soir, avec la diminution de l'insolation solaire et une seconde hausse du trafic routier, le cycle s'inverse : la réaction de destruction de l'ozone devient prédominante. On observe ainsi une augmentation des teneurs en dioxyde d'azote et une forte baisse des teneurs d'ozone.

Cette fluctuation des concentrations en ozone est propre aux zones urbaines. En milieu rural, ce profil est beaucoup moins marqué puisque les concentrations restent relativement homogènes au cours de la journée.

## B - Historique de la station fixe de Roanne

En 1995, à l'initiative de la ville de Roanne, AMPASE (Association de Mesure de la Pollution Atmosphérique sur Saint-Etienne) a étendu sa zone de surveillance en implantant une station de mesure en continu rue Gilbertès.

Le réseau prend alors une dimension départementale et devient AMPASEL, Association de Mesure de la Pollution Atmosphérique sur Saint-Etienne et le département de la Loire.

Parmi les 5 indicateurs de pollution atmosphérique mesurés sur ce site depuis 7 ans, seuls l'ozone et le dioxyde d'azote présentent des risques de dépassement des seuils réglementaires.

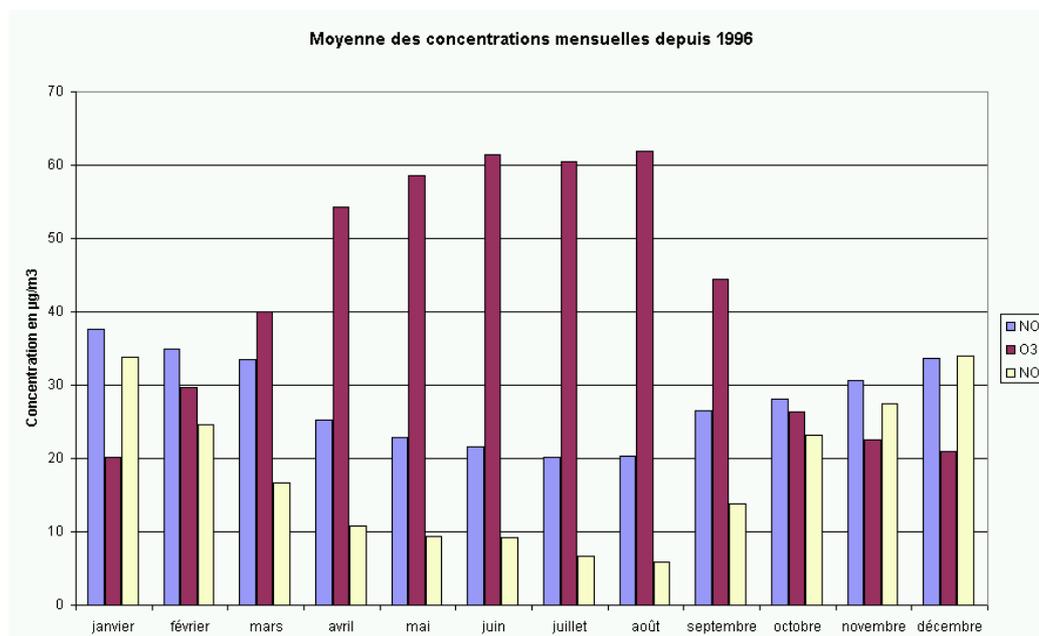
Bilan annuel de la station urbaine de Roanne

\* normes réglementaires en Annexe 1

	<i>Polluants</i>	<i>1996</i>	<i>1997</i>	<i>1998</i>	<i>1999</i>	<i>2000</i>	<i>2001</i>
Moyenne annuelle ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO <sub>2</sub>	32	33	27	24	25	26
	NO	21	20	19	17	15	13
Maximum horaire( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO <sub>2</sub>	122	182	142	123	136	107
	NO	586	674	389	481	358	301
Nombre de dépassements horaires du seuil de recommandation *	NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0
Moyenne annuelle ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	O <sub>3</sub>	41	38	42	44	42	43
Maximum horaire( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	O <sub>3</sub>	161	163	166	203	210	194
Nombre de dépassements horaires du seuil de recommandation *	O <sub>3</sub>	0	0	0	4	3	3

Depuis 1996, les moyennes annuelles en ozone de Roanne sont stables. Cependant, les maxima horaires ont très nettement augmenté depuis 1999, date à laquelle le réseau enregistre les premiers dépassements de seuil de  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur la ville de Roanne.

En revanche, les concentrations moyennes des polluants primaires NO et NO<sub>2</sub> n'ont pas cessé de diminuer depuis 1996. Ceci s'explique en partie par l'évolution du parc automobile moins polluant grâce aux réglementations plus sévères sur les carburants et les constructeurs automobiles en matière d'objectifs de réduction de rejets polluants.

Profil moyen mensuel

Le graphique ci-dessus montre le profil moyen des concentrations mensuelles en NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> sur les six dernières années. L'ozone intervient de façon prépondérante dans la chimie de l'atmosphère entre les mois d'avril et septembre.

A contrario, les valeurs les plus fortes en polluants primaires se rencontrent essentiellement en période hivernale. L'anti-corrélation  $O_3$ - $NO_x$  évoquée lors du paragraphe dédié à la chimie de l'ozone se vérifie.

## C - Moyens mis en œuvre

### 1 - Echantillonnage passif

L'échantillonnage passif est une technique de mesure basée sur le principe de la diffusion moléculaire d'un polluant à travers une couche d'air délimitée par un tube jusqu'à un milieu absorbant ou adsorbant.

Cette technique de piégeage des polluants présente de nombreux intérêts :

- possibilité d'utilisation en grand nombre,
- facilité de mise en œuvre,
- faible coût,
- aucun calibrage sur le terrain.

Plusieurs laboratoires sont spécialisés dans la fabrication et l'analyse des tubes à diffusion passive (Passam, Radiello, Gradko, Ogawa). Des études de comparaison ont permis de montrer les caractéristiques de chacun d'eux. Le groupe de travail échantillonneurs passifs a effectué des tests sur ces différents types d'échantillonneurs (répétabilité, écart tube-analyseur). Les résultats ont montré que la technologie PASSAM correspondait aux objectifs de cette étude pour l'ozone et le dioxyde d'azote.

Les capteurs passifs se présentent sous forme de tubes cylindriques :

- Les capteurs  $NO_2$  sont constitués d'une grille imprégnée d'une substance absorbante : La triéthanolamine. Comme il s'agit d'absorption, il y a réaction chimique entre l'absorbât et le polluant. La quantité de  $NO_2$  échantillonné est déterminée par colorimétrie à 540 nm selon la réaction de Saltzman.
- Les capteurs  $O_3$  possèdent à l'intérieur du tube un filtre en fibre de verre imprégné de 1,2di(4pyridyl)éthylène (DPE). L'échantillonnage passif de l'ozone est basé sur la décomposition par oxydation du DPE et la détermination de la concentration en ozone par la méthode MBTH.

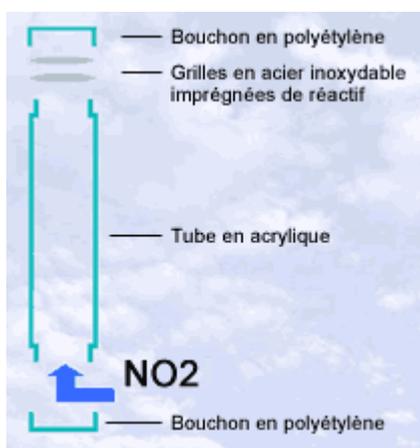


Schéma d'un tube  $NO_2$



Tubes et boîte de protection  $O_3$

## 2 - Les moyens mobiles

Une cabine mobile équipée d'analyseurs NO<sub>x</sub> et O<sub>3</sub> a permis de doubler les points de mesure en continu sur l'agglomération roannaise dans le but de comparer les données de la station urbaine existante à un second site placé dans un autre quartier urbain de Roanne.

Il a été recherché un site respectant les critères du guide ADEME relatif à l'implantation des stations de mesure automatique à partir de la densité de population, de l'éloignement des axes routiers, ...

Avec l'accord de la ville de Roanne, la station mobile a été implantée dans la cour de l'école des deux Faubourgs située à l'angle des rues Saint Alban et Georges Plasse. Ce site présente une grande cour dégagée de tout obstacle, protégée contre les risques de vandalisme et correspondant parfaitement aux critères des stations urbaines.



Cabine mobile dans la cour de l'école des deux Faubourgs

## D - La période de mesure

Selon l'expérience acquise par les réseaux de mesure français, le groupe de travail échantillonneurs passifs a défini les temps d'exposition optimums suivants :

	8 jours	15 jours
O <sub>3</sub>	*	
NO <sub>2</sub>		*

Temps d'exposition

L'étude s'est déroulée sur 6 semaines du 10 juillet, date d'installation de la cabine mobile au 23 août avec 4 campagnes O<sub>3</sub> et 2 campagnes NO<sub>2</sub> en parallèle selon les temps d'exposition requis.

A la fin de la période d'exposition, les capteurs sont récupérés puis conservés au réfrigérateur pour éviter toute réaction chimique parasite ou évaporation du réactif avant d'être envoyés en Suisse dans le laboratoire d'analyse environnementale de la société PASSAM AG.

## E - Maillage de la zone d'étude

Pour obtenir un résultat cartographique réaliste, il est nécessaire de couvrir le territoire de façon homogène. Pour cela, il faut établir un maillage dont la géométrie dépend de plusieurs critères :

- densité de population
- superficie
- topologie
- conditions météorologiques
- exigences du logiciel d'interpolation

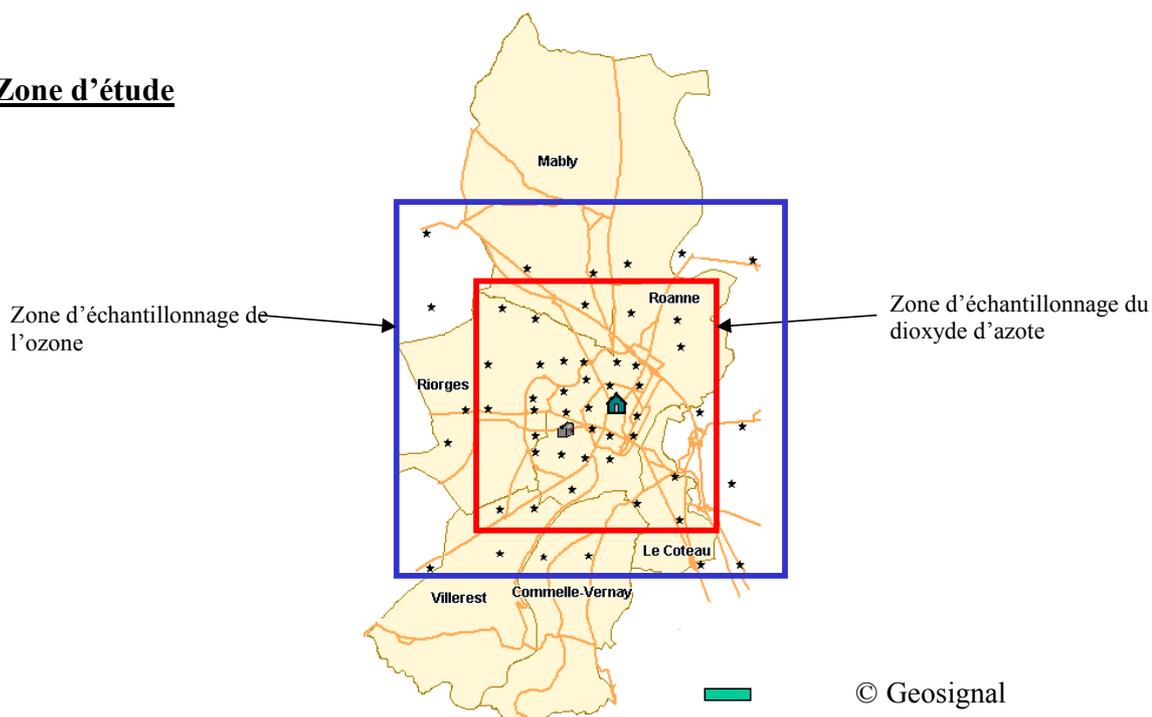
La cartographie de la pollution photochimique a imposé une zone d'étude suffisamment grande pour échantillonner les zones urbaines et rurales. En effet, l'ozone se forme en zone urbaine mais il peut être transporté par les masses d'air en des lieux plus éloignés.

L'objectif était aussi de couvrir la majorité de la population résidant dans l'agglomération estimée à 80 000 personnes.

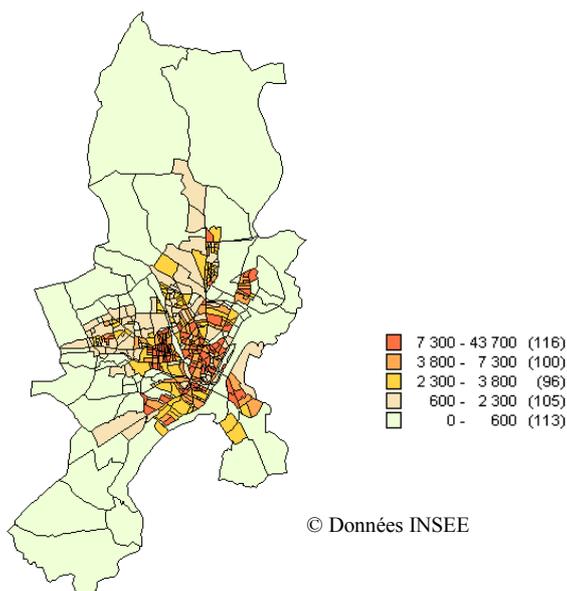
Pour cela, un double maillage a été défini pour couvrir par des mailles de 1250 m une grande superficie d'environ 60 km<sup>2</sup> tout en gardant des mailles plus fines de 650 m au niveau de la zone urbaine dense afin de connaître précisément la répartition des niveaux de pollution.

Au total, on comptabilise 56 sites ozone et 40 sites de dioxyde d'azote. Le NO<sub>2</sub> étant un polluant émis principalement par le trafic automobile, son suivi n'a pas été étendu à l'ensemble de la zone d'étude (bleue) mais s'est axé sur le secteur le plus urbanisé en rouge. Trois équipes ont assuré la pose et la dépose des tubes dont 2 personnes de la Ville de Roanne.

### Zone d'étude

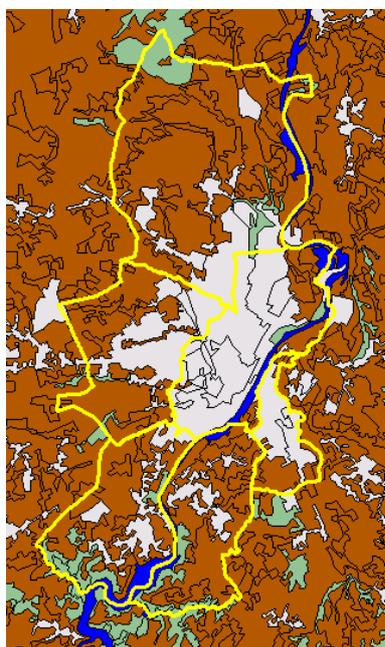


## D - Densité de population



L'essentiel de la population se concentre sur le centre ville de Roanne et la proche périphérie.

## F - Occupation des sols



Les villes de Roanne et du Coteau présentent un fort pourcentage de surface bâtie. Celles-ci possèdent un tissu urbain plus dense.

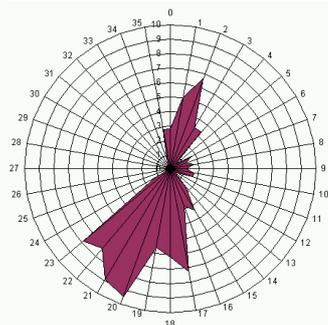
Les autres communes de l'agglomération roannaise sont densément peuplées en proche périphérie de Roanne. Dès que l'on s'éloigne du pôle d'activité roannais, on retrouve essentiellement des zones agricoles.

## G - Paramètres météorologiques

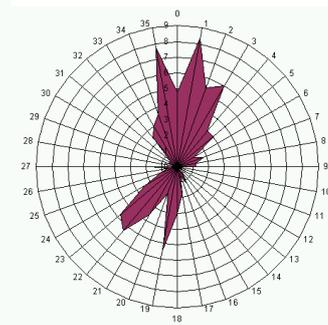
Il existe trois stations météorologiques sur l'agglomération roannaise : Perreux, Riorges et Villerest. Les données ont été mises à disposition par Météo France et EPALA que nous remercions pour leur collaboration.

### 1 - Direction du vent

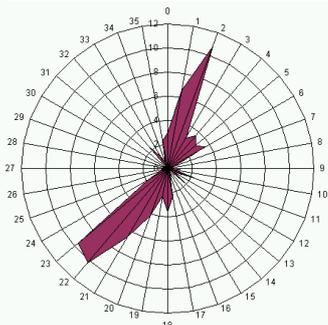
Semaine 1 : 12 au 19 juillet



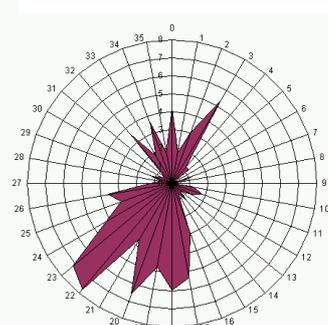
Semaine 2 : 19 au 26 juillet



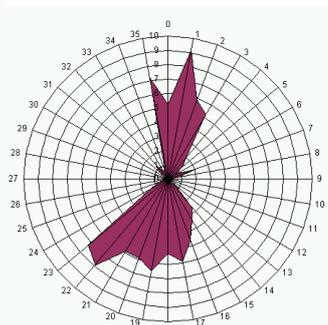
Semaine 3 : 26 au 02 août



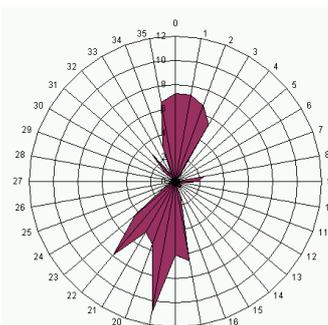
Semaine 4 : 02 au 09 août



Semaine 5 : 09 au 16 août



Semaine 6 : 16 au 23 août



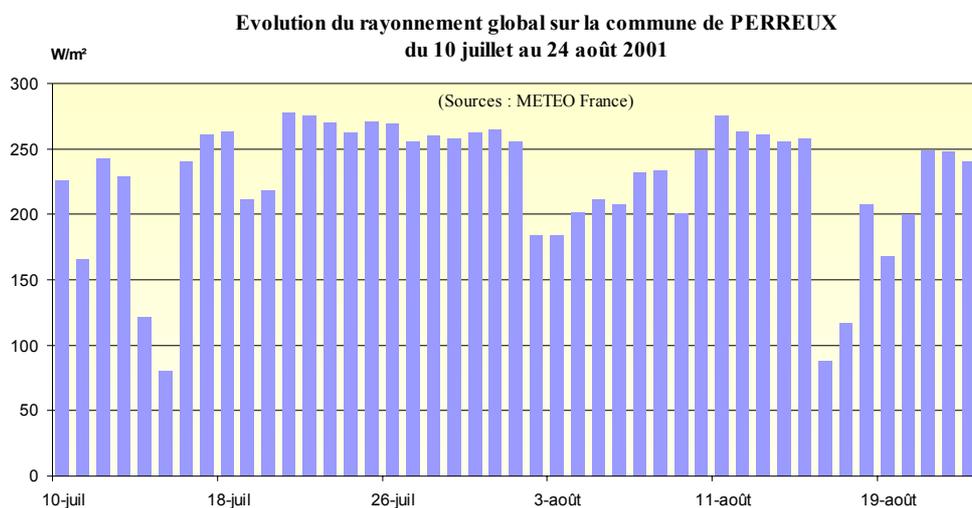
Série	1	2	3	4	5	6
% de vent $\geq$ à 5 m/s	21	2	4	5	19	6

Les données de vent sont issues de la station météorologique située au niveau du barrage de Villerest. Il n'a pas été possible d'exploiter les données de la station de Riorges Aéroport en raison de fortes interférences générées par son environnement proche (turbulences créées par des bâtiments).

Deux directions de vent privilégiées ressortent de l'analyse des cartes : le Nord - Nord Est et le Sud - Sud Ouest. Sur l'ensemble de l'étude, il y a peu de différence de direction du vent d'une campagne à l'autre. Toutefois, on retiendra que les 1<sup>ère</sup> et 4<sup>ème</sup> semaines d'échantillonnage sont caractérisées par la dominance d'un vent de secteur Sud - Sud Ouest, les vents de secteur Nord - Nord Est et Sud - Sud Ouest alternent à parts égales durant la 3<sup>ème</sup> et la 6<sup>ème</sup> semaine et enfin, le vent de secteur Nord - Nord Est domine la 2<sup>ème</sup> semaine.

Au cours des 1<sup>ère</sup> et 5<sup>ème</sup> semaines, on relève des journées avec des vents forts supérieurs à 5 m/s favorables à la dispersion des polluants atmosphériques.

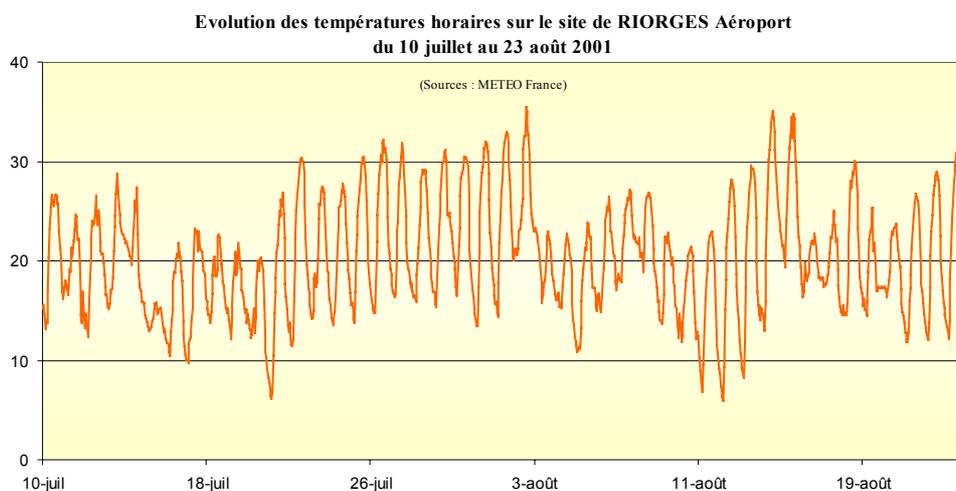
## 2 - Le rayonnement global



Le rayonnement solaire a été intense 50 % du temps : les 15 derniers jours de juillet ainsi que la 2<sup>ème</sup> semaine d'août.

Ces conditions sont favorables à la production photochimique de l'ozone

## 3 - La température



Les variations de température sont logiquement bien corrélées à celles du rayonnement global.

La 2<sup>ème</sup> quinzaine de juillet est caniculaire avec 9 jours > à 30°C.

Résumé

Stations	Vitesse du vent (m/s)	Précipitation (mm)	Humidité R. (%)	Température (°C)	Rayonnement global (W/m <sup>2</sup> )
<b>Riorges</b>					
Sem. 1	1,6	38,2	79	18,2	
Sem. 2	0,9	5,6	77	19,6	
Sem. 3	0,7	1,8	74	23,8	
Sem. 4	1,2	20,8	76	20,7	
Sem. 5	1,0	6,4	68	20	
Sem. 6	1,0	15,8	84	20,2	
<b>Perreux</b>					
Sem. 1			75	17,9	56
Sem. 2			75	19,1	87
Sem. 3			72	23,3	84
Sem. 4			73	20,2	60
Sem. 5			63	19,7	78
Sem. 6			81	19,9	59
<b>Villerest</b>					
Sem. 1	3,0	40,6	71	17,8	60
Sem. 2	1,9	10,8	70	19,4	94
Sem. 3	2,0	1,8	67	23,6	88
Sem. 4	2,2	18,8	67	20,3	66
Sem. 5	2,7	4,6	58	20,1	90
Sem. 6	2,2	13,4	77	20,1	69

Le bilan climatique de cette étude est intéressant :

Au cours des six semaines d'échantillonnage, trois semaines se sont déroulées sous un ciel nuageux avec la présence de précipitations voir de pluies orageuses. Le vent lors de ces périodes est omniprésent, particulièrement la 1<sup>ère</sup> et la 5<sup>ème</sup> semaine.

Le reste du temps se caractérise par un temps estival favorable à la pollution photochimique : températures caniculaires supérieures à 30°C, accompagnées d'un ciel d'azur, très stable.

L'alternance de ces conditions météorologiques est très intéressante pour étudier le comportement de ces deux polluants atmosphériques sur l'agglomération roannaise. Toutefois, les températures élevées ont pu nuire à la représentativité des mesures d'ozone en raison de la grande sensibilité du réactif. Ce paramètre sera donc pris en compte dans la validation des concentrations obtenues par les échantillonneurs passifs.

## II - VALIDATION DES TUBES

Lors de chaque campagne, un tube NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> ont été exposés par site. Pour déterminer la précision et la répétabilité de ces mesures, six tubes par polluant ont été placés en parallèle des deux stations de mesure automatique.

A chaque campagne, afin de mettre en évidence une éventuelle dérive des tubes durant les opérations de pose et de ramassage, les 3 équipes avaient en supplément un tube « blanc », tube non exposé.

De même, des blancs frigo ont été conservés pendant l'intégralité de l'étude au réfrigérateur. Ceux-ci permettent d'étudier le comportement des tubes par rapport à la durée de l'étude et au transport entre le fournisseur et l'association.

### A - L'analyse des fiches de suivi des capteurs

Lors des opérations de pose et de ramassage, chaque équipe devait relever des anomalies éventuelles au niveau du dispositif de prélèvement (insectes, activité exceptionnelle à proximité du site, ...)

La notification de toile d'araignée ou de pincettes oreilles à l'intérieur du tube a conduit à une invalidation automatique des résultats (mauvaise diffusion de l'air à l'intérieur du tube) de même que les tubes mal refermés.

Type de tube	N° période	Code du site	Observations	Type de tube	N° période	Code du site	Observations
NO2	1	35	Pincettes oreilles	O3	2	52	Pincettes oreilles
NO2	1	36	Pincettes oreilles	O3	3	9	Insectes
NO2	1	44	Toile d'araignée	O3	3	29	Toile d'araignée
NO2	2	56	Toile d'araignée	O3	3	40	Toile d'araignée
O3	1	36	Insectes	O3	3	52	Insectes
O3	1	52	Pincettes oreilles	O3	4	11	Toile d'araignée
O3	2	4	Pincettes oreilles	O3	4	24	Toile d'araignée
O3	2	36	Pincettes oreilles	O3	4	36 - 45	Toile d'araignée

#### Tubes invalidés

Sur l'ensemble de la campagne, 17 tubes ont été perdus pour un total de 380 tubes utilisés, soit 96 % de données exploitables.

## B - L’analyse des blancs

La mesure des tubes blancs permet d’évaluer l’éventuelle dérive des solutions chimiques aussi bien pendant leur préparation qu’au cours de leur conservation au cours de l’étude. L’ensemble des tubes non exposés ont donné des valeurs inférieures au seuil de quantification analytique. L’absorbance relevée sur les blancs est moyennée par campagne puis soustraite à la valeur de chaque tube avant le calcul des concentrations.

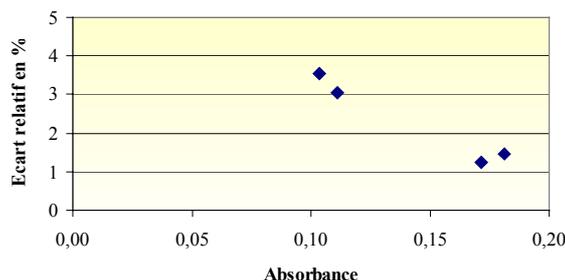
## C - L’analyse des multiplets

La répétabilité des tubes (écarts de concentration entre plusieurs tubes placés sur un même site) sert à montrer la précision de la mesure. Pour cela, tubes et capteurs ont été placés dans les conditions opératoires similaires. Des multiplets de 6 tubes par polluants ont été utilisés.

Le fournisseur PASSAM AG garantit une précision de 7% en moyenne pour ces deux polluants . Cette précision est calculée à l’aide de l’écart-type relatif suivant :

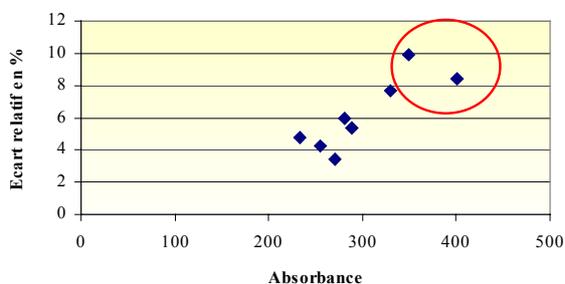
$$ER=(\text{écart-type du multiplet} / \text{moyenne des absorbances}) \cdot 100$$

- Le dioxyde d’azote (NO<sub>2</sub>)

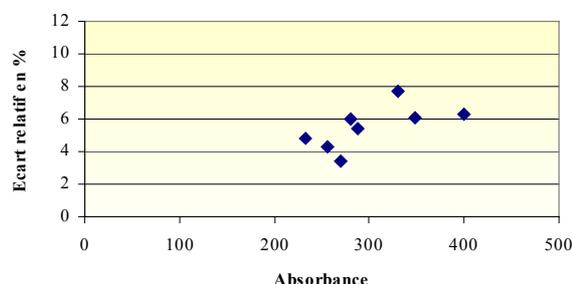


Avec un écart relatif compris entre 1 et 4%, la répétabilité des multiplets de NO<sub>2</sub> est bonne. D’après ces résultats, plus l’absorbance est importante et plus la précision des tubes est meilleure. C’est la cas sur le site de mesure de Roanne.

- L’ozone (O<sub>3</sub>)



Écarts relatifs O<sub>3</sub> avant correction



Écarts relatifs O<sub>3</sub> après correction

Une variabilité plus importante est observée pour l’ozone, de 3 à 10%. Les absorbances de la 3<sup>ème</sup> campagne présentent un écart relatif élevé (point entouré d’un cercle rouge) et donc une plus grande dispersion des multiplets. Elle est étudiée avec plus de précision :

Absorbances du site 25 (Station mobile – École des Faubourgs)

405	374	411	447	414	<b>350</b>
-----	-----	-----	-----	-----	------------

Absorbances du site 34 (Station fixe – Rue Gilbertès)

<b>291</b>	390	351	349	336	376
------------	-----	-----	-----	-----	-----

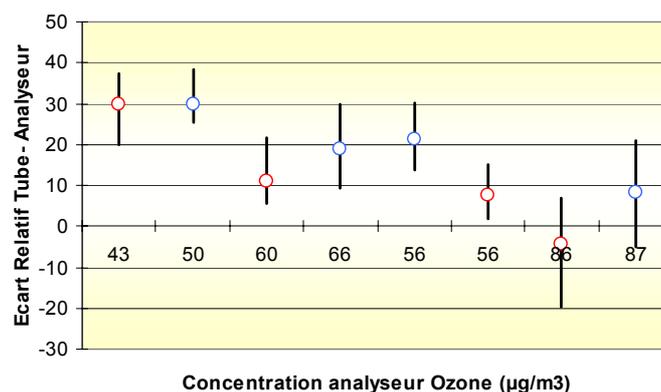
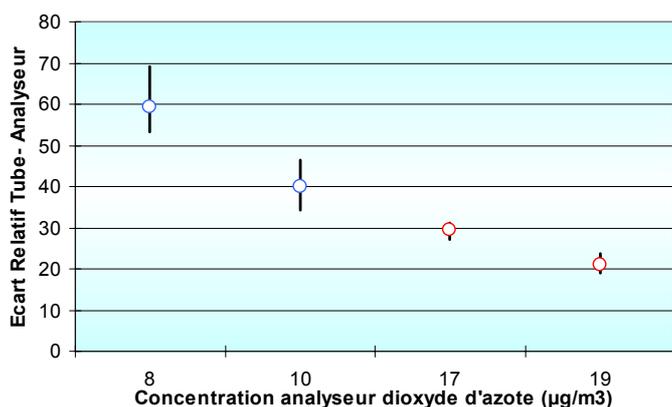
Les valeurs surlignées en gras ne sont pas cohérentes avec les autres valeurs. Ceci peut s'expliquer par les températures très élevées observées lors de cette période. Ces absorbances sont donc invalidées. Le calcul de l'écart relatif après correction permet de réduire l'erreur de 3 et 8 %. Ce gain est nécessaire par la suite pour estimer une concentration des tubes au plus près.

## E - Calcul des concentrations

D'après les concentrations fournies par la laboratoire PASSAM AG, calculées à partir d'un facteur de conversion constant, les tubes NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> surestiment les mesures de références obtenues par les analyseurs, de 20 à 60 % pour le NO<sub>2</sub> et jusqu'à 30 % pour l'O<sub>3</sub> selon les différentes campagnes de mesure.

Cet écart récurrent entre la réponse moyenne des tubes et la concentration de référence des analyseurs s'explique par un biais systématique induit d'une part par la différence de technique métrologique utilisée (chimiluminescence et réactif chimique) mais surtout par les paramètres externes comme la température, la vitesse du vent ou l'humidité qui ne sont pas pris en compte dans ce facteur de conversion.

La comparaison des concentrations obtenues par les deux techniques est présentée ci-après :



La représentation de ce biais n'est pas linéaire. A faible concentration, l'écart est plus élevé, notamment pour le NO<sub>2</sub> proche de la limite de détection, tandis qu'à une concentration élevée la différence se réduit fortement avec une meilleure précision des multiplets.

A noter, une exception lors de la 3<sup>ème</sup> campagne d'ozone (concentrations moyennes supérieures à 85 µg/m<sup>3</sup>) où on observe une plus forte variation des multiplets liée aux températures caniculaires qui ont certainement influencé la diffusion de l'ozone et le réactif.

Il ne sera pas tenu compte des résultats en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  fournis par PASSAM AG.

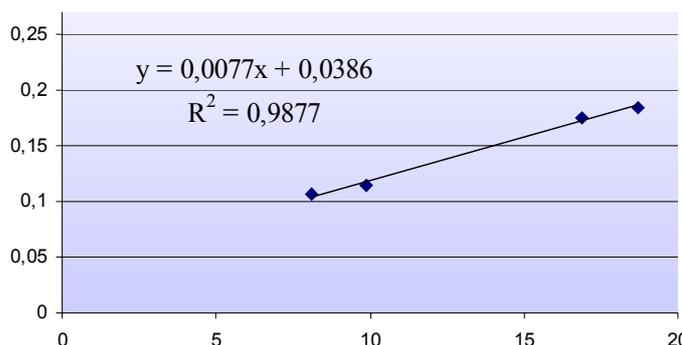
Pour contourner ce biais introduit lors de la conversion, il suffit de tracer une droite de corrélation entre l'absorbance des multiplets et la concentration mesurée par les analyseurs. Ainsi, à partir de l'équation obtenue, on pourra recalculer les valeurs en concentration pour chaque tube exposé.

Estimer les concentrations par une droite de régression permet de conserver la répartition spatiale du polluant tout en se rapprochant des concentrations réelles mesurées par les analyseurs.

- Le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ )

La régression linéaire du couple Absorbance / Concentration analyseur, à partir des deux campagnes de mesure, permet d'obtenir le facteur de conversion suivant pour les tubes  $\text{NO}_2$  :

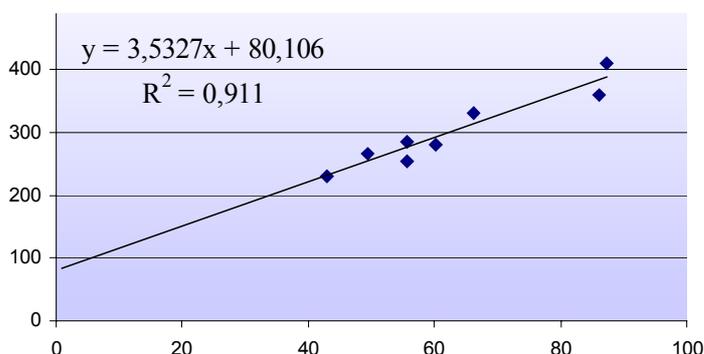
$$Y \text{ (en } \mu\text{g}/\text{m}^3) = 0.0077 x_{\text{Abs}} + 0.0386$$



- L'ozone ( $\text{O}_3$ )

Le nombre supplémentaire de campagnes réalisées pour ce polluant permet d'établir la régression linéaire Absorbance / Concentration analyseur avec le double de point. Le facteur de conversion est :

$$Y \text{ (en } \mu\text{g}/\text{m}^3) = 3.5327 x_{\text{Abs}} + 80.106$$



Ces résultats sont ensuite appliqués aux valeurs des absorbances validées sur l'ensemble de cette étude pour permettre l'exploitation des résultats par interpolation géostatistique.

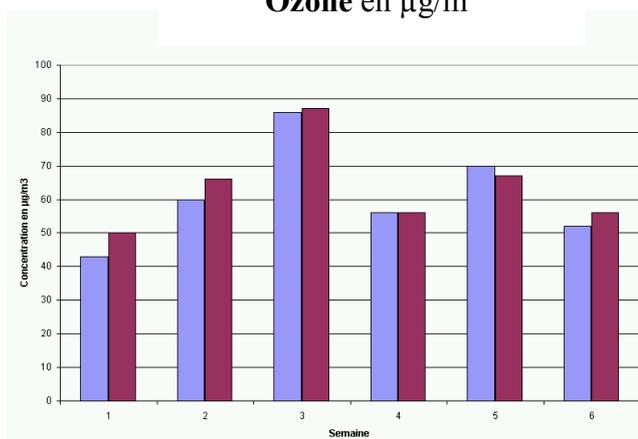
### III - COMPARAISON STATION FIXE ET STATION MOBILE

Les deux stations se situent sur la ville de Roanne dans un tissu urbain dense.

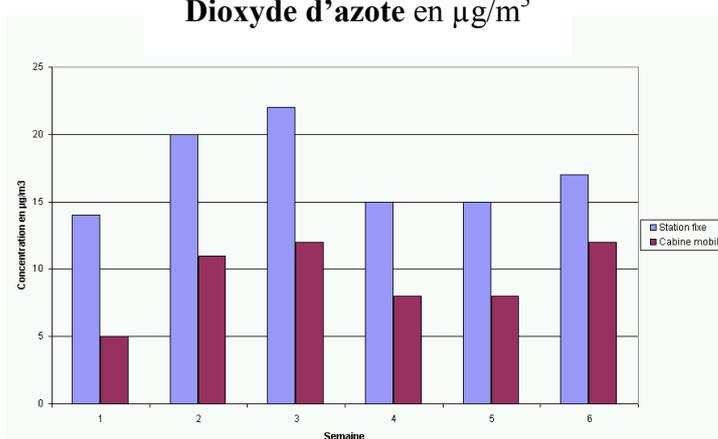


Positionnement des stations de mesure en continu

**Ozone en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**



**Dioxyde d'azote en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**



Évolution hebdomadaire des concentrations en  $\text{O}_3$  et  $\text{NO}_2$  sur les deux stations

## Comparaison station fixe et station mobile

		Ozone St Roanne	Ozone Cabine Mobile	NO <sub>2</sub> St Roanne	NO <sub>2</sub> Cabine mobile
12/07-19/07	Moyenne	43	50	14	5
	Mini	3	14	0	0
	Maxi	82	83	37	31
	Ecart type	15	13	7	6
19/07-26/07	Moyenne	60	66	20	11
	Mini	0	10	4	0
	Maxi	146	144	114	52
	Ecart type	33	33	11	10
26/07-02/08	Moyenne	86	87	22	12
	Mini	0	14	3	0
	Maxi	165	152	70	67
	Ecart type	43	38	12	10
02/08-09/08	Moyenne	56	56	15	8
	Mini	2	14	2	0
	Maxi	140	128	67	67
	Ecart type	28	24	9	8
09/08-16/08	Moyenne	70	67	15	8
	Mini	1	12	1	0
	Maxi	146	128	61	48
	Ecart type	34	28	9	8
16/08-23/08	Moyenne	52	56	17	12
	Mini	0	10	4	0
	Maxi	128	114	67	53
	Ecart type	31	28	9	9

\* valeurs exprimées en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

A l'analyse de ces résultats, les concentrations en NO<sub>x</sub> sont nettement plus élevées au niveau de la station fixe. Ceci s'explique par le fait que cette dernière est plus influencée par le trafic routier. En effet, elle se trouve au bord d'un axe comptabilisant environ 17 000 véhicules/jour responsables d'une production d'oxydes d'azote. Malgré les écarts importants obtenus sur la concentration moyenne en dioxyde d'azote, nous remarquons que les maxima horaires sont du même ordre de grandeur.

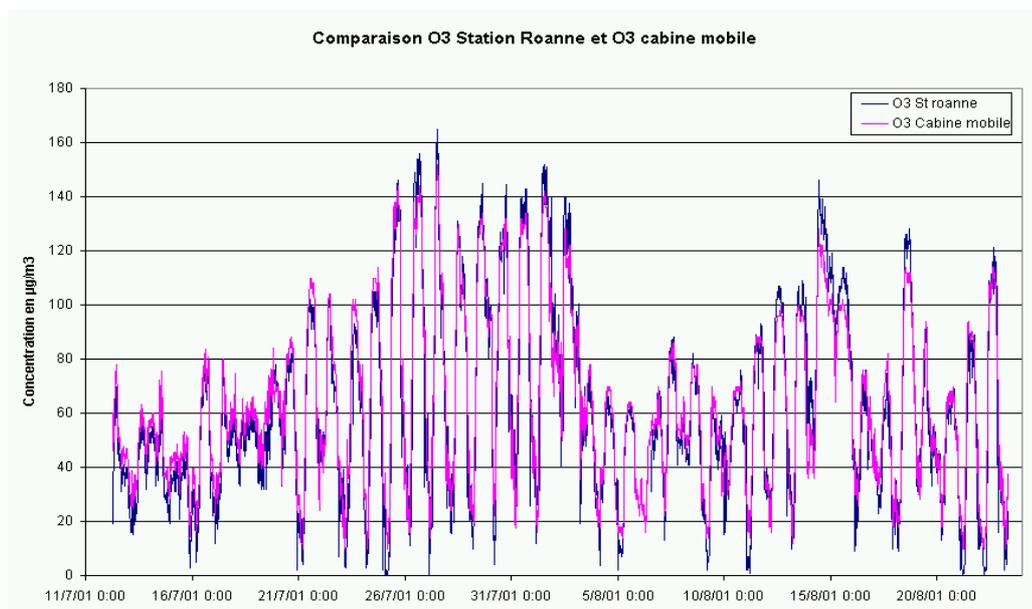
La ville de Roanne note depuis de nombreuses années une forte circulation automobile en juillet alors que le mois d'août est très calme (moins de destruction d'ozone au niveau de la station). La concentration moyenne en NO<sub>2</sub> relevée durant la quatrième semaine confirme ce constat (14.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en NO<sub>2</sub> représentant le minimum mesuré en moyenne hebdomadaire durant la campagne).

Concernant l'ozone, nous remarquons que les taux rencontrés au niveau de la station mobile sont en moyenne supérieurs à ceux de la station fixe tandis que pour les valeurs de pointe c'est l'inverse.

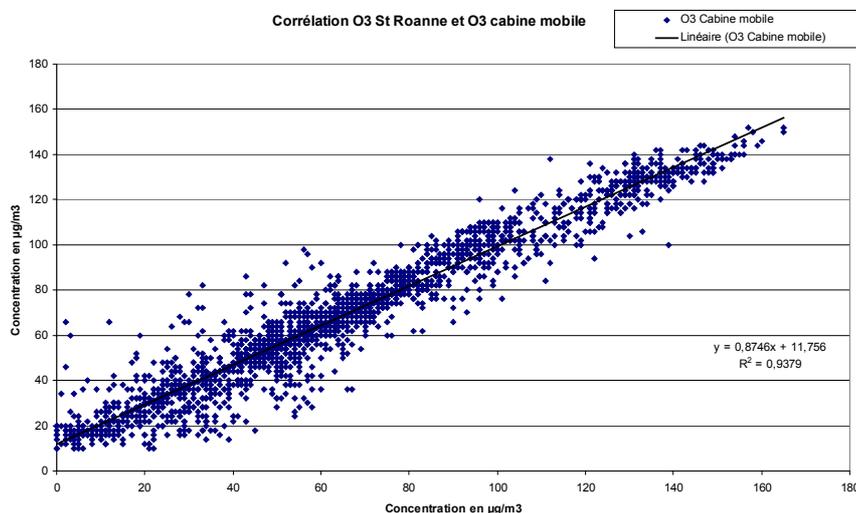
L'écart entre les deux sites pourtant très différents dans leur environnement reste faible. Une répartition homogène de l'ozone semble avoir lieu à l'échelle du centre ville de Roanne. C'est un phénomène cohérent en raison de l'origine de ce polluant, produit à partir du panache de pollution urbaine présent au dessus de la ville.

En parfaite cohérence avec les observations météorologiques, la troisième série de mesure présente des concentrations en ozone les plus fortes avec un maxima de  $165 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur une heure pour la station fixe.

En période de forte pollution photochimique, la production locale d'ozone semble donc se généraliser sur Roanne d'une manière homogène et éventuellement sur les communes voisines. La comparaison des données horaires ci-après montre une très forte corrélation entre les deux sites, notamment pour les valeurs maximales.



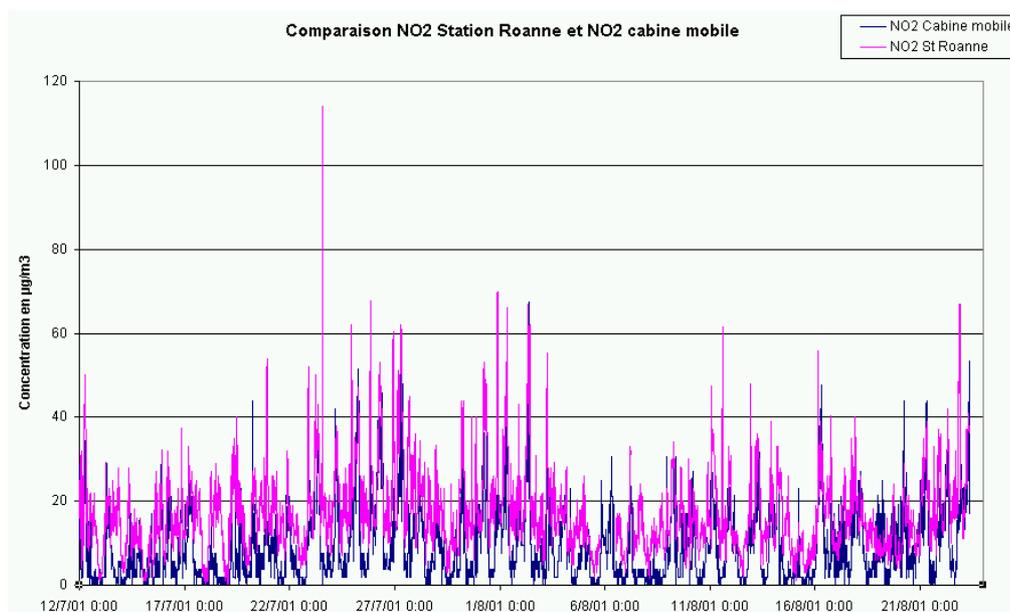
Droite de corrélation  
d'ozone entre la station  
fixe et la cabine mobile



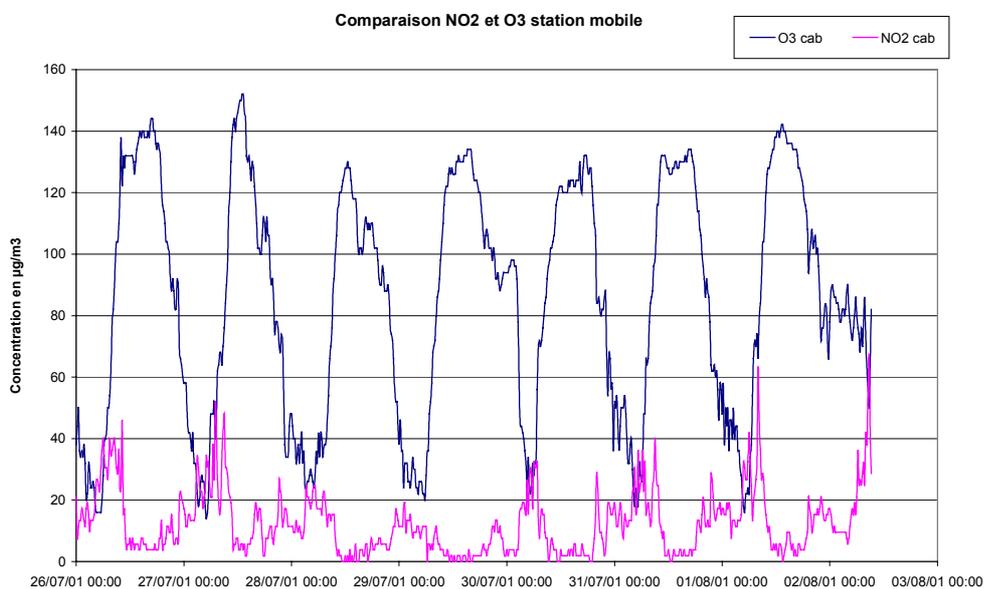
Les pics de pollution sont très bien reproduits par les deux stations. Ces résultats semblent donc confirmer la représentativité de la station fixe lors des épisodes de forte pollution photochimique.

La différence station fixe et cabine mobile provient essentiellement des faibles concentrations en ozone. Cette variation est liée à la présence de polluants primaires en quantité plus importante sur la station fixe qui accentuent la destruction de l'ozone la nuit et le matin, période de faible activité photochimique.

La corrélation en ce qui concerne les oxydes d'azote est moins évidente.



Les faibles valeurs mesurées sur la station mobile s'expliquent par son éloignement des principaux axes routiers. Le phénomène d'anti-corrélation décrit précédemment entre le dioxyde d'azote et l'ozone s'observe plus facilement dans ces conditions.



## IV - CARTOGRAPHIE DU DIOXYDE D'AZOTE ET DE L'OZONE

### A - Méthodologie

Les réseaux de surveillance de la qualité de l'air utilisent des outils d'information géographique et d'interpolation afin de visualiser la répartition spatiale des polluants. Les techniques classiques d'interpolation (triangulation, inverse des distances) ont montré leurs limites car la présence de ces polluants résulte de phénomènes complexes qui ne peuvent être modéliser simplement.

La géostatistique est l'outil le plus fiable à l'heure actuelle pour cartographier les niveaux de polluants mesurés à grande échelle. Cette science regroupe un ensemble de techniques d'étude de données collectées qui seront détaillées dans les paragraphes suivants et prend en compte dans l'estimation des concentrations le comportement spatial du polluant et non la distance entre les points de mesure.

Ce travail d'interpolation consiste à estimer des concentrations aux nœuds d'une grille régulière à partir de valeurs connues.

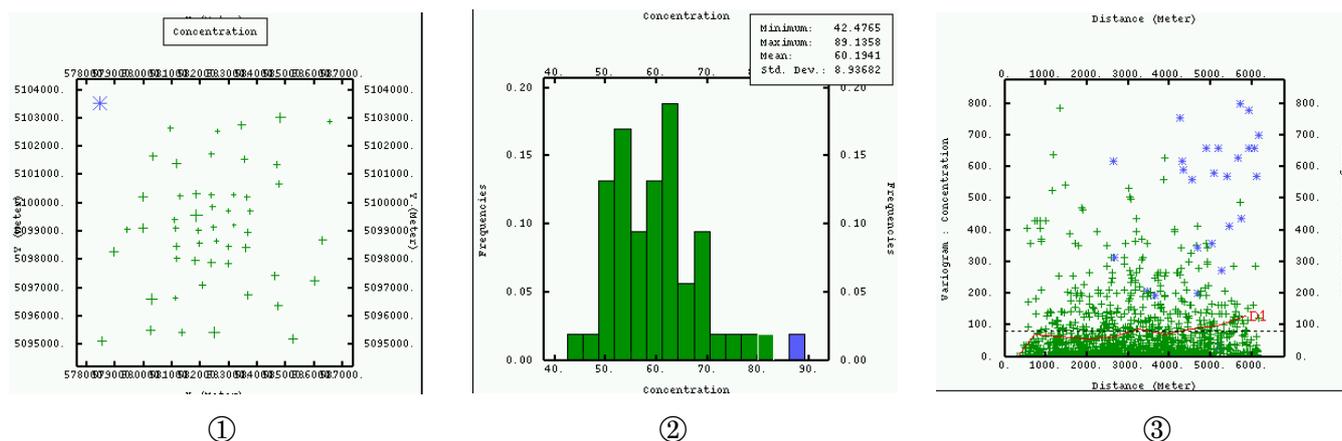
Le cadre probabiliste de la géostatistique offre la possibilité de quantifier l'erreur d'estimation de chaque nœud de la grille.

L'étude géostatistique s'est réalisée à l'aide du logiciel Isatis® de la société Géovariance.

#### 1 - Analyse exploratoire des données

##### a. Outils d'analyse des valeurs mesurées

Plusieurs outils sont à la disposition de l'utilisateur d'Isatis® pour mener à bien cette analyse préalable.



① Les cartes de localisation des échantillons offrent comme son nom l'indique la possibilité de visualiser l'emplacement géographique de chaque point d'échantillonnage. Chaque site est représenté par un symbole proportionnel à la concentration mesurée. Cette carte permet ainsi de vérifier l'homogénéité des résultats pour les points les plus proches.

② L'histogramme permet de mettre en évidence le nombre de population constituant la base de données.

③ Le nuage variographique aide à déterminer les points à l'origine d'une forte variabilité spatiale (points présentant des valeurs aberrantes dues soit à un problème métrologique ou à un site de typologie différente).

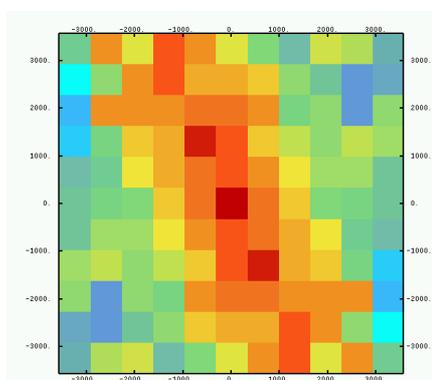
Toutes ces outils sont interactifs. Ainsi, en cliquant sur un point de la carte de localisation, nous pouvons visualiser sa position sur l'histogramme et son comportement sur le nuage variographique.

Sur cet exemple, on remarque qu'en masquant le site 65 (étoile bleu sur la carte de localisation des sites), on améliore le nuage variographique. En effet, le site 65 situé en zone rurale ne semble pas avoir le même comportement que les autres sites, de profils urbain.

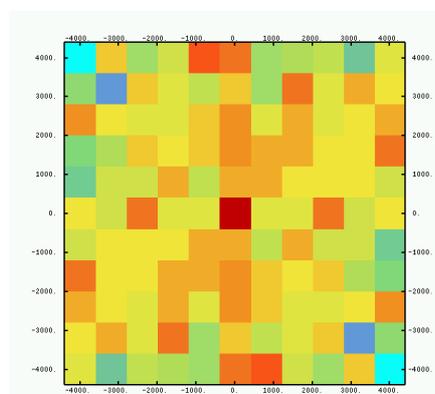
### *b. Recherche d'anisotropie*

Le relief, les vents dominants ou la géométrie des villes sont très souvent à l'origine d'une répartition spécifique d'un polluant le long d'un axe privilégié.

Ce phénomène est mis en évidence par l'étude de l'anisotropie qui se représente sur des cartes sous la forme d'un axe de symétrie. La direction principale de continuité correspond à la direction pour laquelle le dégradé de couleur est le plus lent (rouge dans notre cas).



*Carte d'anisotropie pour le NO<sub>2</sub>*



*Carte d'anisotropie pour l'O<sub>3</sub>*

La recherche de ce phénomène sur l'agglomération roannaise a mis en évidence une anisotropie flagrante pour le NO<sub>2</sub> (axe sud-sud est / nord-nord ouest) alors que les valeurs d'ozone ne présentent pas de direction particulière.

L'axe repéré pour le NO<sub>2</sub> n'est lié ni au relief, ni aux vents dominants mesurés au cours de cette période mais cette direction se rapproche de la localisation des principaux axes routiers et notamment la RN7.

Lors de l'interpolation des valeurs de NO<sub>2</sub>, l'algorithme géostatistique affectera un poids plus important aux valeurs mesurées situées sur l'axe d'anisotropie. Ceci a pour conséquence un étirement des concentrations.

Concernant l'ozone, la production homogène sur une grande surface observée d'après les mesures automatiques semble se confirmer par cette carte qui ne présente aucune zone privilégiée.

### c. Le variogramme expérimental

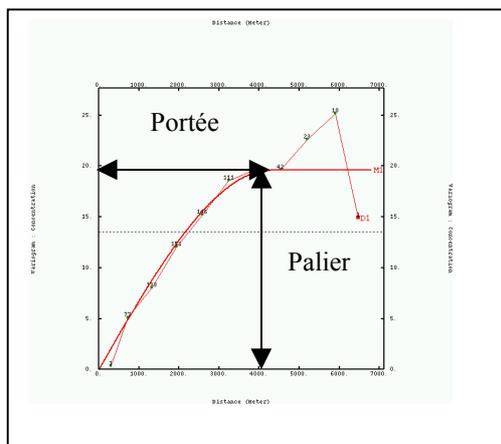
Le variogramme expérimental est en fait une représentation graphique issue d'Isatis de la moyenne de l'écart absolu entre deux valeurs sur une station de mesure et pour une distance donnée.

Le variogramme permet de quantifier la variabilité spatiale du polluant. Plus la distance entre deux points de mesure est importante moins les données sont corrélées.

Les variogrammes ont généralement une forme exponentielle et se décomposent en deux parties :

- Une phase croissante durant laquelle on observe une décroissance de la corrélation entre les points lorsque la distance qui les sépare augmente.
- La portée définit la distance à partir de laquelle la courbe entre dans la phase de stationnarité. L'éloignement entre les points de mesure n'intervient plus sur le degré de corrélation qui se stabilise à une valeur d'écart de variance appelé palier.

L'optimisation du variogramme expérimental impose de définir deux paramètres : la portée, le palier.



Exemple de variogramme stationnaire

## 2 - La modélisation du variogramme expérimental

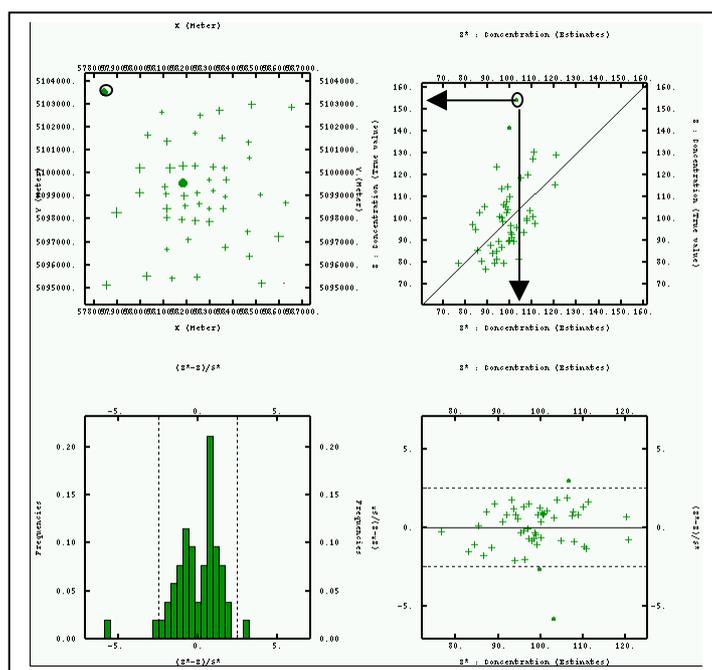
Il s'agit de définir le modèle de variogramme théorique qui reproduise au mieux les variations du variogramme expérimental. Pour cela, Isatis met à la disposition de l'utilisateur différentes fonctions. Les fonctions sphérique et exponentielle sont le plus souvent utilisées. La modélisation de certains variogrammes expérimentaux a nécessité la combinaison de plusieurs structures.

Cette optimisation s'effectue de façon manuelle sur Isatis par ajustement.

### 3 - La validation croisée

Elle permet de vérifier la justesse de notre modèle. Elle consiste à estimer un point dont on connaît la valeur réelle en l’éliminant de la base d’entrée.

Ensuite on compare graphiquement la valeur réelle et la valeur estimée par la fonction valeur réelle = f(valeur estimée). La fiabilité du modèle dépendra de la répartition des points. Ces derniers doivent être proche de la première bissectrice. En supprimant les plus fortes concentrations, il s’avère que le résultat est sous estimé. Ceci est bien mis en évidence sur le graphique ci-dessous.



Une fois que le modèle variographique a été validé, on peut effectuer l’étape d’interpolation

### 4 - Les techniques de krigeage

Le logiciel Isatis permet de choisir son mode d’interpolation. La méthode d’interpolation par krigeage a été retenue pour cette étude en raison de la bonne prise en compte du comportement spatial du polluant. Deux méthodes ont été testées : le krigeage ordinaire et le co-krigeage.

#### a. Le krigeage ordinaire

Cette technique classique intègre uniquement les données de concentration dans l’interpolation. Le krigeage consiste à estimer une variable inconnue c en un point x par une somme pondérée des valeurs mesurées. Les valeurs mesurées, prises en compte dans l’estimation de la concentration, sont déterminées à l’aide du voisinage.

Dans le cas de notre étude et compte tenu de la superficie couverte, nous utiliserons le voisinage unique qui prend en compte tous les points de mesure de la zone d’étude.

Le calcul de la concentration s’effectue de la façon suivante :

$$C(x)=\sum_{i=1}^n \lambda^i C(x_i)$$

Les n pondérations attribuées aux valeurs mesurées C(xi) dans l’estimation de krigeage C(x) sont calculées de telle sorte que le non biais et une variance d’estimation minimale soient assurés.

La condition de non biais signifie que, en moyenne, sur un grand nombre de réalisations du phénomène, l’erreur faite en estimant C(x) par C’(x) est nulle. Elle impose une condition sur les pondérations :  $\sum_{i=1}^n \lambda^i=1$ .

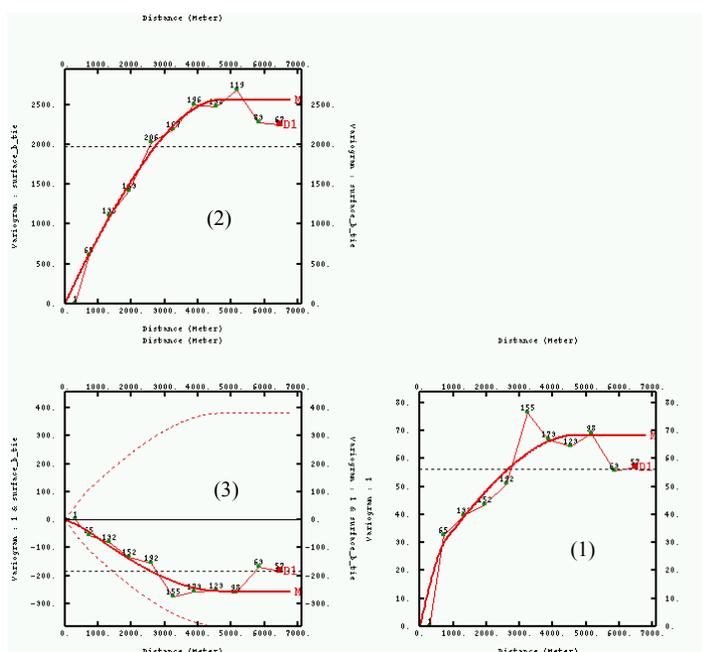
Les pondérations sont la solution d’un système linéaire de n+1 équations à n+1 inconnus, qui admet une unique solution.

### b. Le krigeage avec variables explicatives : le co-krigeage

Cet algorithme géostatistique intègre toujours les concentrations mesurées et ajoute une variable explicative (densité de population , occupation des sols , relief).

On a souhaité savoir si les phénomènes de pollution sont intimement liés à la répartition géographique de la population et au relief. Pour cela , on a établi des droites de corrélation d’équation : variable explicative = f (valeurs mesurées).

Lorsque la corrélation a été clairement mise en évidence, il faut modéliser trois comportements spatiaux (le variogramme de la concentration (1), le variogramme de la variable explicative (2) et le variogramme croisé (3)).



Lors de l’interpolation, il est affecté un poids aux données de concentrations mesurées en fonction des valeurs du co-facteur.

Le co-krigeage impose à l'utilisateur la connaissance des valeurs de la variable explicative au nœud de la grille d'interpolation. Il a donc fallu générer ces grilles à l'aide de notre logiciel d'information géographique Mapinfo puis les importer sur Isatis.

L'utilisation de variables auxiliaires permet d'améliorer les cartes initiales lorsqu'il y a une bonne corrélation entre les mesures et la variable explicative.

Une information supplémentaire est apportée à chaque nœud de la grille d'interpolation. La variable explicative offre surtout la possibilité d'affiner les cartes dans les zones peu échantillonnées.

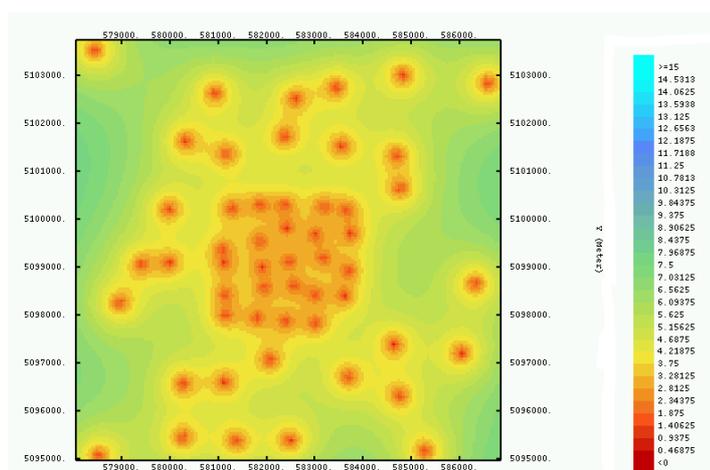
Plusieurs variables liées aux phénomènes de pollution ont été testées : occupation des sols sous la forme du pourcentage de bâti, la densité de population et l'altitude. Seul le pourcentage de bâti s'est avéré le mieux corrélé à la concentration d'ozone. Par contre, il n'a pas été possible de corréliser ces mêmes variables explicatives au NO<sub>2</sub>. Ce polluant étant lié à la circulation automobile sur Roanne, il aurait fallu disposer d'un cadastre d'émission précis qui n'existe pas sur ce secteur.

## 5 - L'élaboration des cartes

Le cadre probabiliste de la géostatistique permet de quantifier l'erreur d'estimation sur chaque point interpolé. L'incertitude est exprimé sous la forme d'un écart absolu ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et permet de vérifier la justesse du modèle utilisé.

L'analyse de la carte d'erreur présentée ci-après pour l'ozone est très intéressante puisqu'elle met en évidence une forte incertitude sur les zones sous-échantillonnées (couleur verte), notamment aux limites du maillage.

Par contre, on remarque que l'erreur d'estimation est faible sur la petite maille. L'interpolation semble donc très proche de la réalité.

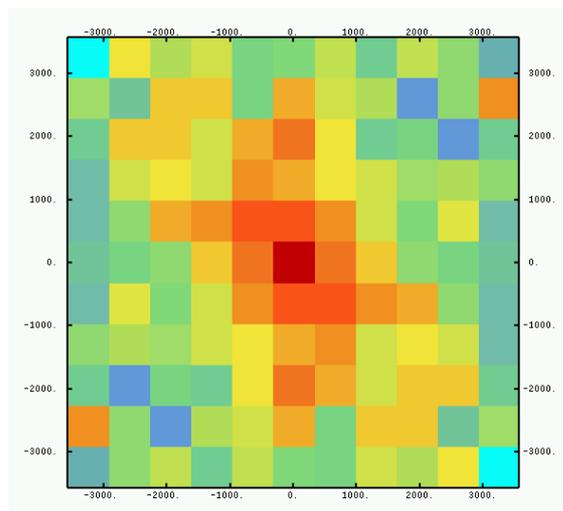


Carte d'incertitude sur l'O<sub>3</sub> avec krigeage ordinaire

## B - Représentation spatiale du dioxyde d'azote

La distribution spatiale du NO<sub>2</sub> est étudiée sur la petite échelle de l'étude, d'une surface de 39 km<sup>2</sup>, centrée sur la commune de Roanne.

### 1-Première semaine



Carte d'anisotropie

La première carte met en évidence une légère anisotropie dans la direction sud- sud est/ nord - nord ouest.

La gamme de concentration rencontrée durant cette période s'échelonne de 4 à 18 µg/m<sup>3</sup>.

Les conditions météorologiques qui ont régné durant cette quinzaine (vent fort > à 5 m/s, assez fréquent et présence de nombreux passages nuageux) ont conduit à une bonne dispersion du dioxyde d'azote.

Deux zones semblent plus exposées au NO<sub>2</sub> à l'analyse de cette carte :

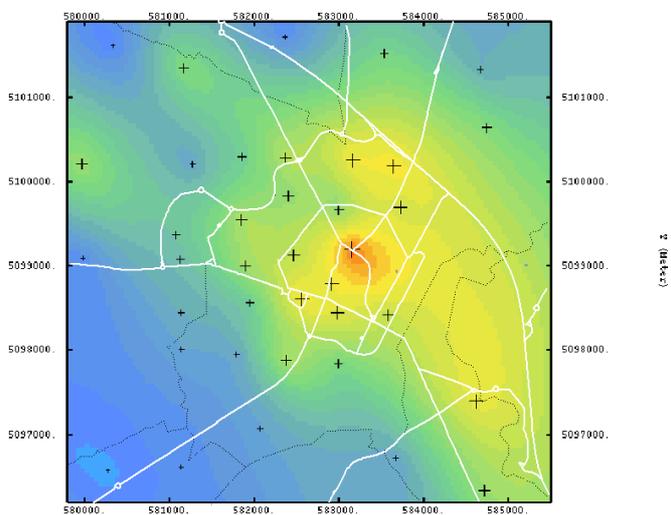
- le centre de la ville de Roanne et la commune du Coteau
- les zones à proximité de la RN7

Les fortes concentrations sont enregistrées en milieu urbain dense sur Roanne et Le Coteau. La circulation automobile est responsable de ces niveaux : la combustion des combustibles fossiles étant le plus fort émetteur de NO<sub>2</sub>.

Une concentration de 53 µg/m<sup>3</sup> a été enregistrée sur l'avenue de la Libération au Coteau. Hors, ce site n'a pas été pris en compte dans la réalisation des cartes d'estimation de pollution de fond puisqu'il est représentatif d'une micro-pollution dans une rue fortement circulée dont la géométrie ne favorise pas facilement la dispersion des polluants (rue Canyon). Sa concentration est en moyenne trois fois supérieure aux autres sites.

Les niveaux de NO<sub>2</sub> baissent très rapidement lorsque l'on s'éloigne de la ville de Roanne car la circulation automobile est moindre en zone rurale.

Avec 18 µg/m<sup>3</sup>, la station fixe présente la plus forte concentration en NO<sub>2</sub> sur les sites de fond car proche d'un axe routier circulé.



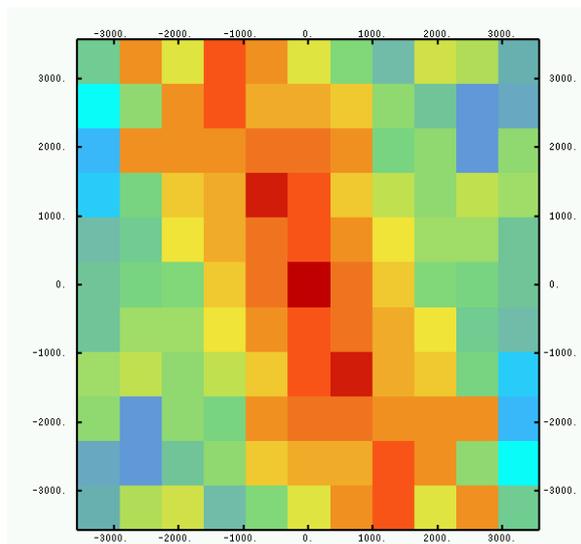
Carte d'estimation de la concentration en µg/m3 obtenue par krigeage ordinaire

Sites supprimés :

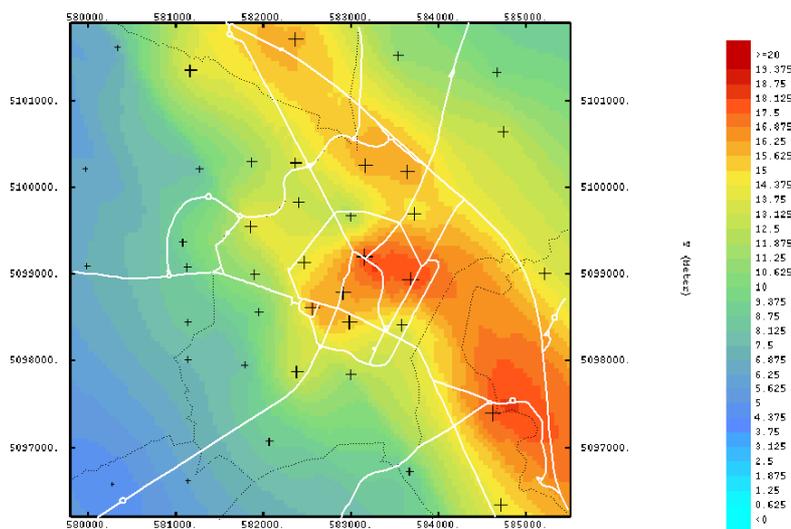
- présence d'insectes : 35, 36
- problème métrologique : aucun

Incertitudes d'estimation < 4 µg/m<sup>3</sup>

## 2-Deuxième période



Carte d'anisotropie



Carte d'estimation de la concentration en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  obtenues par krigeage ordinaire

Sites supprimés :

- présence d'insectes : aucun
- problème météorologique : aucun

Incertitudes d'estimation  $< 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$

La carte d'anisotropie indique un axe beaucoup plus marqué de Sud-Sud Est / Nord-Nord Ouest. Cet axe principal de continuité du  $\text{NO}_2$  représente la localisation des sources d'émission automobile, majoritaires sur Roanne, Le Coteau et le long de la RN7. L'absence de vent semble renforcer cette anisotropie (faible dispersion des polluants).

En appliquant cette rotation de  $157^\circ$  (Sud-Sud Est), on retrouve une spatialisation des concentrations de  $\text{NO}_2$  similaire à la première quinzaine tant en zone urbaine que rurale mais plus affirmée selon cette direction. Ce phénomène d'étirement peut être assimilé à la direction de migration de ce polluant une fois émis.

Avec une augmentation moyenne des concentrations de l'ordre de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  par rapport à la 1<sup>ère</sup> campagne, les concentrations varient de 4 à  $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Malgré des conditions météorologiques favorables à l'accumulation de ce polluant, l'augmentation des teneurs est réduite.

En effet, la ville de Roanne enregistre chaque année au mois d'août une nette diminution d'intensité du trafic automobile. La diminution de ces émissions a eu des répercussions logiques sur les teneurs de  $\text{NO}_2$ . Toutefois, on constate qu'en situation défavorable, la pollution s'étend sur une plus grande surface.

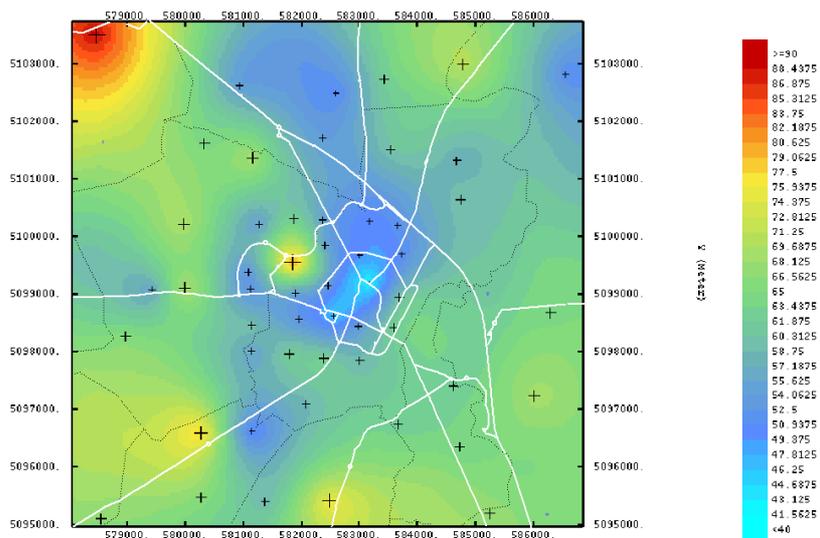
En condition hivernale, situation où le  $\text{NO}_2$  atteint des concentrations maximales, on peut imaginer que les zones les plus exposées soient plus étendues sur des périodes plus longues.

Le site trafic situé au Coteau présente toujours une concentration élevée de  $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$  contre  $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour la station fixe. Bien que légèrement influencé par le trafic automobile, cet écart atteste de la typologie urbaine de la station de Roanne et non d'une station de proximité automobile.

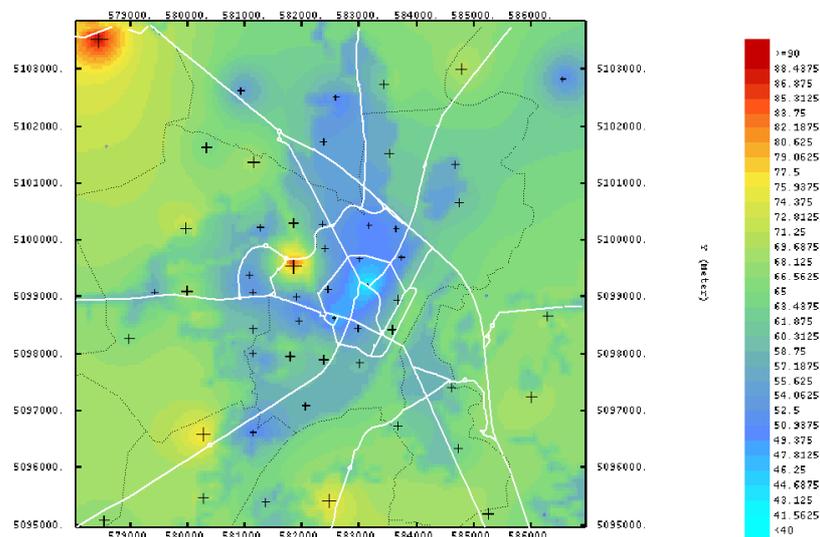
## C - Représentation spatiale de l'ozone

L'analyse préliminaire des données d'ozone ne fait pas ressortir d'anisotropie. En effet, du fait des caractéristiques chimiques de ce composé, il n'existe pas d'axe de pollution privilégié lié à des sources d'émission (l'ozone est un polluant secondaire). Il est rappelé que l'échelle des cartes d'estimation est différente pour l'ozone qui a été échantillonné sur un maillage de 60 km<sup>2</sup>.

### 1-Première période



Carte d'estimation de la concentration en µg/m3 obtenues par krigeage ordinaire



Carte d'estimation de la concentration en µg/m3 obtenues par co-krigeage

Sites supprimés :

- présence d'insectes : 1,36, 52
- problème météorologique : aucun

Incertitudes d'estimation < 9 µg/m<sup>3</sup>

Les concentrations varient de 42 à 89 µg/m<sup>3</sup>.

Cette campagne de mesure présente des teneurs moyennes pour un mois de juillet en raison des conditions météorologiques perturbées (40 mm de précipitations, vent fort).

Les niveaux de concentration plus élevés se retrouvent en périphérie de l'agglomération roannaise situés en zone rurale.

Les communes de Roanne et Mably présentent lors de cette campagne les teneurs en O<sub>3</sub> les plus basses car le NO excédentaire présent en centre ville (cf. cartes NO<sub>2</sub>) intervient dans le cycle de destruction de l'ozone.

A contrario en milieu rural, l'ozone peut rester, en l'absence de précurseurs, à des concentrations élevées plus longtemps d'où des valeurs hebdomadaires plus fortes. C'est le cas de l'ensemble des communes périphériques comme Villerest, Saint-Romain-La-Motte, Ouches, Commelle-Vernay.

La corrélation pourcentage de bâti et concentration en ozone est assez satisfaisante (coefficient de corrélation de l'ordre de 57 %).

Le co-krigeage n'a globalement pas changé la répartition spatiale du polluant mais a permis d'affiner les résultats sur les zones sous échantillonnées (points aux limites du maillage).

## 2-Deuxième période

Cette seconde période présente une activité photooxydante intense. L'augmentation du rayonnement solaire global couplée à un vent faiblissant a favorisé la formation et l'accumulation de l'ozone sur l'agglomération roannaise.

La gamme de concentration s'échelonne de  $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en milieu urbain à  $106 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en milieu rural.

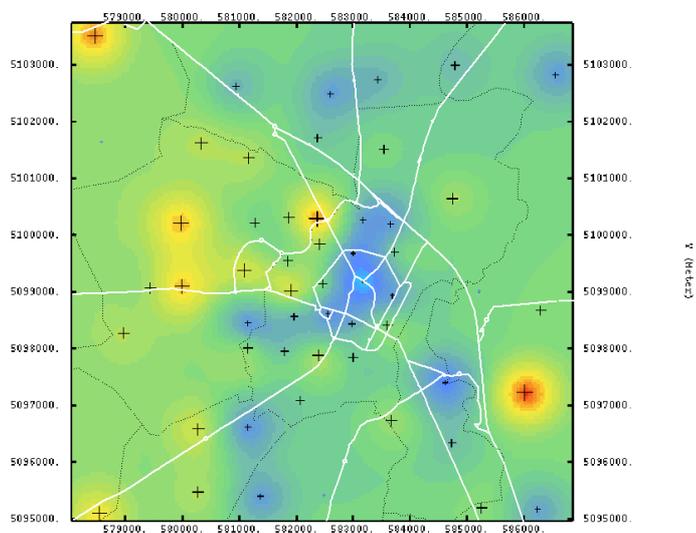
Logiquement, le site de l'avenue de la Libération au Coteau présente des teneurs plus basses en ozone ( $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) du fait de la proximité automobile.

La concentration moyenne relevée sur la station fixe est plus faible de quelques  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  par rapport aux sites de fond. Ceci ne signifie pas pour autant que le risque d'exposition de la population à des pics d'ozone est moindre.

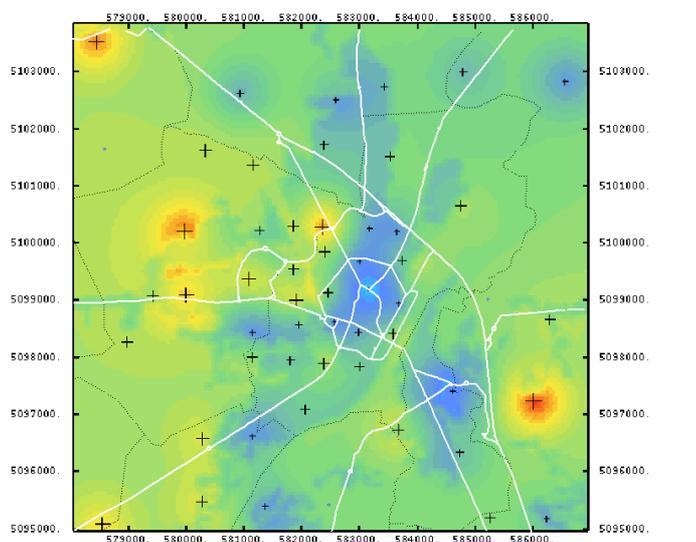
Au contraire, la présence en centre ville de polluants primaires en plus grande proportion conduit à une production d'ozone soudaine et massive lorsque l'insolation solaire est maximale. Il est ensuite totalement détruit en fin de journée et pendant la nuit lorsque le rayonnement solaire diminue d'intensité. Ces variations importantes au cours d'une journée conduisent à une valeur journalière plus faible qu'en milieu rural où les variations d'ozone sont beaucoup plus stables et à des niveaux moins élevés, par expérience.

A noter une relative homogénéité dans la répartition de l'ozone sur la zone urbaine la plus dense.

La corrélation concentration en ozone et pourcentage de bâti est moins marquée que pour la 1<sup>ère</sup> période. Ceci se retrouve au niveau de la carte d'estimation où le poids attribué à la variable explicative est moindre.



*Carte d'estimation de la concentration en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  obtenues par krigeage ordinaire*



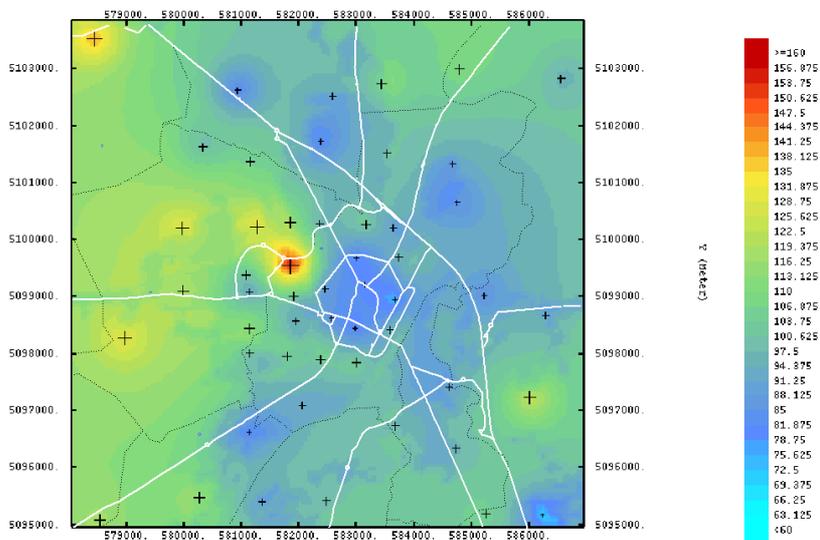
*Carte d'estimation de la concentration en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  obtenues par co-krigeage*

Sites supprimés :

- présence d'insectes : 1,36, 52
- problème météorologique : 31,57

Incertitude d'estimation  $< 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$

### 3-Troisième période



Carte d'estimation de la concentration en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  obtenues par krigeage ordinaire

Les concentrations varient du centre ville vers la périphérie de 69 à 153  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

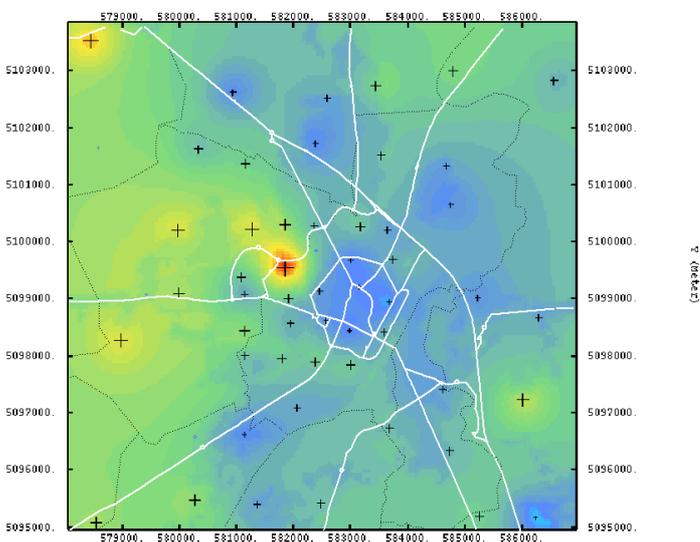
Des températures élevées, associées à un ciel dégagé ont favorisé une activité photochimique plus importante. L'absence de vent pendant 95 % du temps a contribué à l'accumulation sur la ville de Roanne des précurseurs d'ozone, à l'origine de pics soudain et élevés.

Durant cette période, on a relevé des moyennes horaires maximales de 165  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  au niveau de la station fixe, valeurs proches du seuil d'information du public fixé à 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Certains sites situés en proche périphérie de Roanne ont présenté des concentrations hebdomadaires élevées : conséquence probable du transport par les masses d'air de l'ozone formé en agglomération à partir du panache urbain.

Ce phénomène concerne plus particulièrement les communes situées à l'ouest de l'agglomération : Saint-Romain-la-Motte, Riorges, Ouches et Villerest.

La corrélation entre le pourcentage de bâti et la concentration est médiocre sur cette période. L'utilité du co-krigeage est minime car l'on obtient la même répartition spatiale qu'avec la méthode de krigeage ordinaire. Une plus forte variabilité des concentrations en ozone d'un site à l'autre en est certainement à l'origine.



Carte d'estimation de la concentration en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  obtenues par co-krigeage

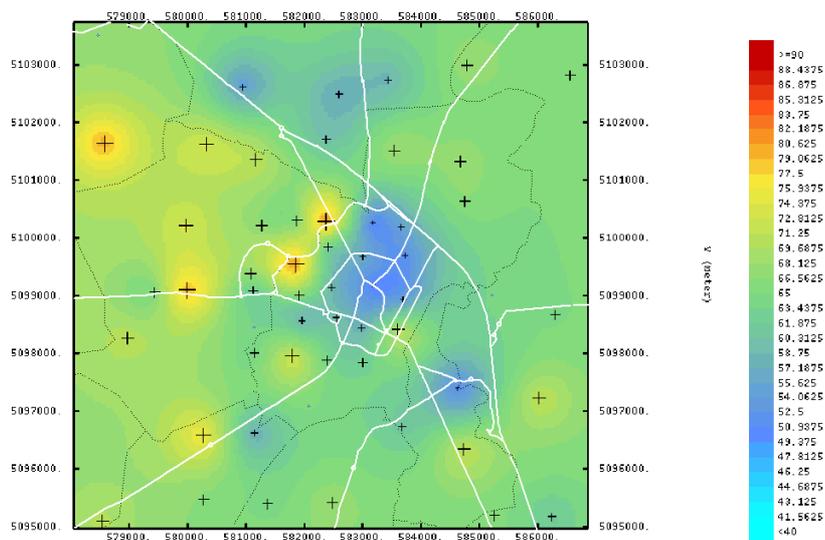
Sites supprimés :

- présence d'insectes : 9,29,40,52
- problème métrologique : aucun

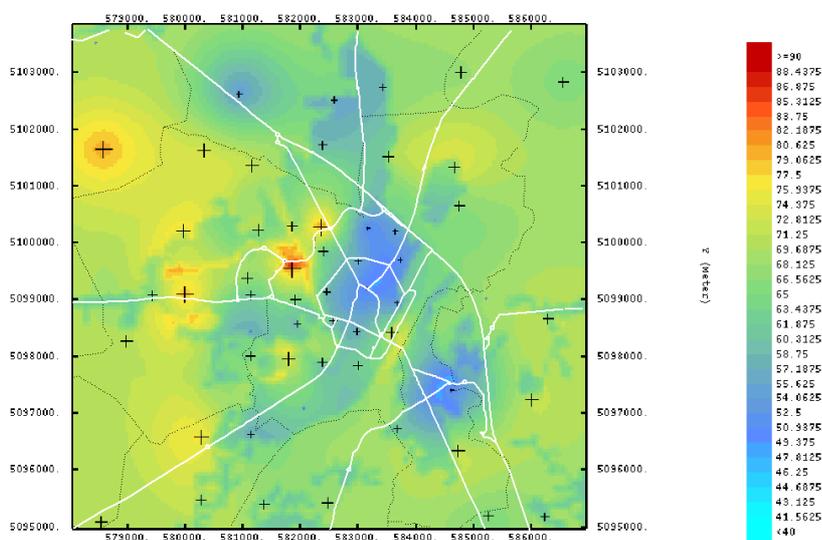
Incertitudes d'estimation < 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

A noter que lors de cette campagne et de la précédente, une incertitude sur l'estimation spatiale de l'ozone de 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  est due à la forte variabilité spatiale

#### 4-Quatrième période



*Carte d'estimation de la concentration en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  obtenues par krigeage ordinaire*



*Carte d'estimation de la concentration en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  obtenues par co-krigeage*

Sites supprimés :

- présence d'insectes : 11,24, 36
- problème métrologique : aucun

Incertitude d'estimation  $< 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Les concentrations s'échelonnent de  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en milieu urbain à  $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en milieu rural

La représentation spatiale de l'ozone est proche de la première période en raison d'un temps couvert et pluvieux semblable. Les précipitations ont favorisé le lessivage de l'ensemble des polluants ce qui explique la faible variabilité selon les sites.

Les sites 39 et 47 de Roanne ont régulièrement indiqué de fortes concentrations en ozone avec des écarts importants vis à vis des sites voisins. Aux vues de ces résultats, ce secteur situé dans une zone densément peuplée, proche de la rocade Est, signale des taux de pollution notables tant en ozone qu'en dioxyde d'azote.

Globalement, les sites localisés à l'ouest de l'agglomération sont plus exposés à l'ozone que pour le reste de la périphérie roannaise. A contrario, Roanne, Le Coteau et le sud de Mably semblent plus épargnés sur des périodes d'exposition moyenne.

La corrélation entre le pourcentage de bâti et la concentration est moyenne sur cette période ( de l'ordre de 0.5).

L'amélioration des cartes se situe au niveau des zones sous-échantillonnées. La variable explicative a permis d'affiner les estimations des concentrations en ozone sur les communes du Coteau, de Commelle-Vernay et de Villerest. Les zones fortement échantillonnées comme le centre ville de Roanne sont peu affectées par l'apport de cette variable.

## CONCLUSION

La station urbaine de Roanne surveille en continu depuis 1995 l'évolution de 5 indicateurs de la pollution atmosphérique. Hors, l'agglomération roannaise compte 80 000 habitants répartis sur plus de 60 km<sup>2</sup>.

Dans le cadre du projet d'arrêté préfectoral d'information du public en cas de pic de pollution, AMPASEL a souhaité avoir une vision globale de la répartition spatiale des deux polluants prédominants à l'échelle de ce grand domaine afin de s'assurer du rôle primordial de cette station dans les procédures futures.

L'analyse des phénomènes de pollution atmosphérique observés lors de cette étude estivale nous a permis d'en retenir les enseignements suivants :

- La représentation cartographique de l'ozone fait ressortir deux secteurs caractéristiques :
  - **le centre ville urbain** : comprenant les quartiers les plus densément peuplés de Roanne, Riorges, Mably et du Coteau on constate les niveaux d'ozone les plus bas mais répartis d'une façon très homogène. La très bonne corrélation constatée entre les deux sites fixes confirme ce phénomène de pollution homogène dans le centre ville.
  - **les communes périphériques** : c'est en périphérie de l'agglomération où l'ozone demeure le plus longtemps. Au cours de cette étude, on constate que se sont les communes de l'ouest de l'agglomération qui ont subi une exposition prolongée à des niveaux d'ozone supérieurs de 20 à 30% par rapport au centre ville. Pourtant, c'est à cause d'une production importante d'ozone en centre ville, suite à la transformation des polluants primaires, que l'on retrouve cet ozone dans des sites ruraux, transporté naturellement par les masses d'air.

L'ozone est capable d'atteindre sur de courte période des concentrations très élevées en centre ville : 10 dépassements du seuil d'information du public de 180 µg/m<sup>3</sup> ont été relevé en 3 ans sur la station urbaine de Roanne. Lors de cette étude, cette dernière a mesuré les teneurs les plus fortes par rapport au site urbain de l'école des Faubourgs. Cela confirme la très bonne capacité de cette station à détecter les épisodes de pollution photochimique critiques.

- Concernant le dioxyde d'azote, sa répartition spatiale suit un schéma opposé :
    - **le centre ville** : par son rôle de ville centre, la commune de Roanne est logiquement la plus exposée à ce polluant primaire. La circulation automobile soutenue, notamment aux heures de pointes du matin et du soir, est directement responsable de ces teneurs.
- Toutefois, on ne retrouve pas uniquement le NO<sub>2</sub> à proximité des axes routiers mais aussi dans les quartiers très peu influencés par ces sources de pollution : c'est le cas du tube n° 66 placé dans une rue piétonne de l'hyper-centre où les concentrations relevées sont proches de celles de la place de l'Hôtel de Ville ou de la place Populle. La distribution spatiale du NO<sub>2</sub> lors de la 2<sup>ème</sup> campagne de mesure met mieux en évidence les quartiers plus exposés à cette pollution.

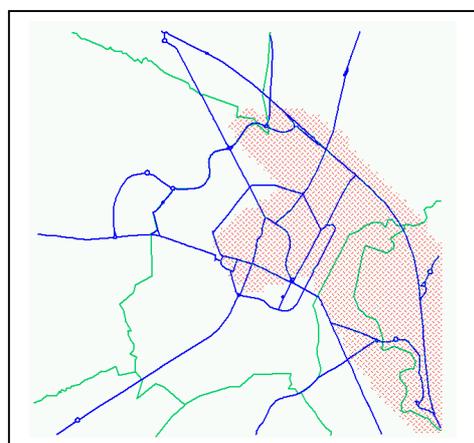
- **la couronne urbaine** : qui entoure le centre urbain dense est sous l'influence des émissions locales (impacts des rejets en  $\text{NO}_2$  de la RN7 sur les communes de Mably et du Coteau) auxquelles s'ajoute la dispersion du panache urbain de pollution atmosphérique. Cette zone concerne les communes de Riorges, Mably, Le Coteau ainsi que Commelles-Vernay lorsque la pollution de fond est plus élevée.

- **Les zones rurales** : le  $\text{NO}_2$  a tendance à se disperser très rapidement dès que l'on s'éloigne des voies principales. Les teneurs en  $\text{NO}_2$  y sont les plus basses.

Globalement, la qualité de l'air mesurée au cours de ces deux campagnes de mesure est bonne sur l'agglomération. Une campagne identique menée en hiver permettrait de mieux visualiser l'impact de ce polluant lorsque les conditions de dispersion lui sont plus défavorables.

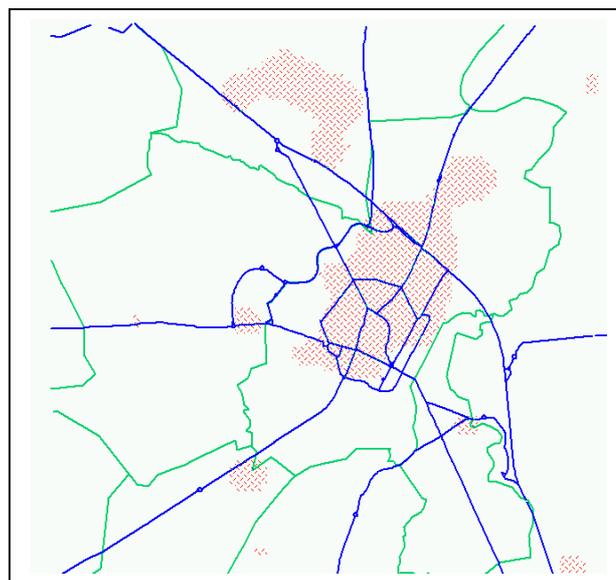
Afin d'avoir une indication de la représentativité des niveaux de pollution mesurés par la station urbaine vis à vis de la répartition de la population, nous avons croisé les résultats de cette étude au pourcentage de population.

Nous avons recherché le pourcentage de population possédant une concentration comprise dans un intervalle de  $\pm 25\%$  des valeurs moyennes mesurées sur la station fixe. On peut ainsi connaître la représentativité de la station par rapport au nombre d'habitant.



— Délimitation des communes  
— Voirie principale

Représentativité du  $\text{NO}_2$   
(petite zone d'étude)



Représentativité de  $\text{O}_3$   
(grande zone d'étude)

Les zones hachurées représentent le nombre théorique d'habitants exposés aux niveaux de pollution atmosphérique mesurés par la station de Roanne. On estime que 30 % de la population est soumise aux teneurs de dioxyde d'azote et 37 % à celles de l'ozone.

Cette population vit principalement dans les centres ville de Roanne, Mably et Le Coteau, zones plus exposées aux phénomènes de pic de pollution. En dehors de ces zones, la population est plus dispersée et les taux de pollution moindre, sauf pour l'ozone en terme d'exposition de longue durée.

L'installation d'une seconde station de mesure sur l'agglomération roannaise ne semble pas nécessaire aux vues de ces résultats. Des mesures supplémentaires risqueraient d'être redondantes à celles de la station existante.

Au final, on considère que la station urbaine de Roanne est bien exposée pour évaluer les principaux phénomènes de pollution pour ces deux polluants, en restant représentatif d'une partie importante de la population. L'adéquation de tous ces résultats aux objectifs fixés initialement permet d'envisager à terme l'utilisation de ce site pour :

- déclencher une procédure d'information du public en cas de pic de pollution, à partir de valeurs maxi de dioxyde d'azote NO<sub>2</sub> ou d'ozone O<sub>3</sub>,
- calculer un indice journalier de qualité de l'air représentatif de l'agglomération à partir des valeurs quotidiennes du dioxyde de soufre, du dioxyde d'azote, des particules en suspension et de l'ozone.

## **Annexe 1 : Cadre réglementaire pour la qualité de l'air ambiant**

Le décret du 15 février 2002 fixe les valeurs seuils définies par les directives européennes et transcrites en droit français par la loi sur l'air du 30 décembre 1996. Il existe 4 seuils différents :

**Objectif de qualité** : niveau de concentration d'un polluant atmosphérique à atteindre, au cours d'une période donnée, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de cette substance sur la santé humaine ou l'environnement.

**Valeur limite** : niveau maximal de concentration de polluant atmosphérique fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de cette substance sur la santé humaine ou l'environnement.

**Seuils de recommandations et d'alerte** : niveaux de concentration d'un polluant donné pour une exposition de courte durée à partir desquels une information comportant des recommandations comportementales et sanitaires doit être délivrée à la population en raison des risques pour la santé humaine (personnes sensibles) et la dégradation de l'environnement. Le niveau d'alerte est accompagné par des mesures d'urgences de réduction des rejets.

### **Tableau des normes réglementaires de qualité de l'air ambiant pour 2002**

*Selon le décret n° 2002-213 du 15 février 2002*

#### **Ozone ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**

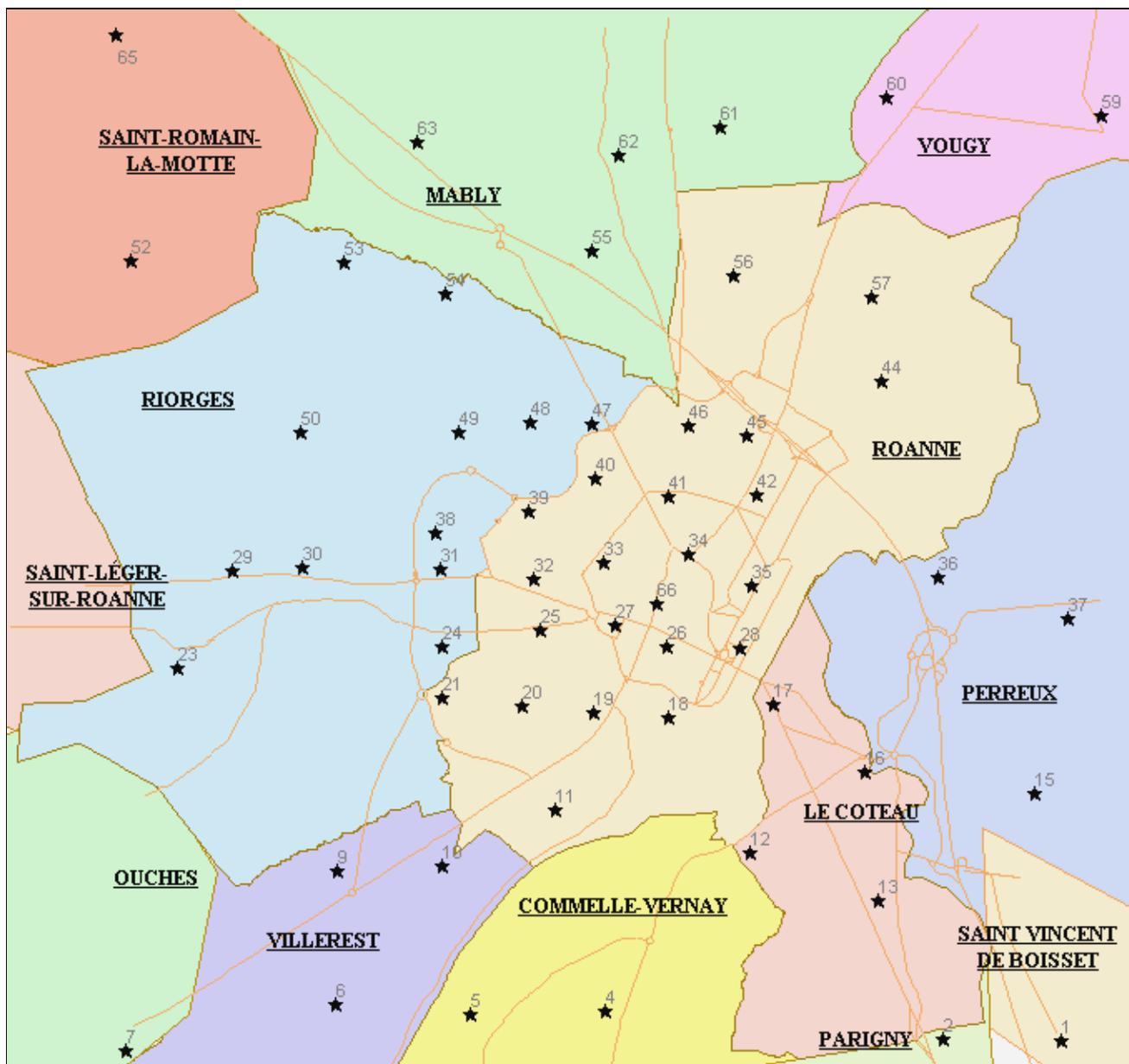
	Moyenne journalière	Moyenne horaire	Moyenne sur 8 heures
<b>Objectif de qualité</b>	65 *	200 *	110
<b>Seuil de recommandation</b>		180	
<b>Seuil d'alerte</b>		360	

\* objectif de qualité pour la protection de la végétation

#### **Dioxyde d'azote ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**

	Moyenne annuelle	Moyenne horaire	Percentile 98 des valeurs horaires sur l'année civile	Percentile 99.8 des valeurs horaires sur l'année civile
<b>Objectif de qualité</b>	40			
<b>Valeur limite</b>	56		200	280
<b>Seuil de recommandation</b>		200		
<b>Seuil d'alerte</b>		400 ou 200 si 2 jours de dépassements		

## **Annexe 2 : Adresse et localisation des sites de mesure ponctuels**



**Annexe 3 : Résultats du dioxyde d'azote par campagne**

Code du site	Coordonnée X	Coordonnée Y	Campagne 1	Campagne 2	Moyenne
9	580267	5096576	4	4	4
10	581131	5096610	5	6	5
11	582059	5097073	6	9	7
12	583663	5096718	6	9	8
13	584715	5096329	11	15	13
16	584608	5097394	14	18	16
18	582990	5097835	10	11	11
19	582375	5097876	12	13	13
20	581791	5097941	6	8	7
21	581140	5098000	6	8	7
24	581139	5098434	7	8	8
25	581944	5098559	8	10	9
26	582977	5098433	14	15	14
27	582555	5098611	15	16	16
28	583580	5098411	13	14	13
30	579985	5099087	5	7	6
31	581123	5099074	8	9	8
32	581893	5098995	11	12	11
33	582456	5099124	12	14	13
34	583151	5099193	17	19	18
35	583672	5098932		18	18
36	585207	5099005		14	14
38	581077	5099366	8	9	9
39	581849	5099543	12	14	13
40	582397	5099826	11	13	12
41	582988	5099669	11	12	11
42	583724	5099691	13	14	14
44	584737	5100635	10	13	11
45	583633	5100182	15	16	16
46	583152	5100255	15	16	15
47	582360	5100275	12	14	13
48	581854	5100292	9	11	10
49	581268	5100211	6	8	7
50	579973	5100200	11	6	9
53	580325	5101613	4	7	5
54	581160	5101350	10	14	12
55	582364	5101714	5	16	10
56	583526	5101510	9	11	10
57	584663	5101321	7	10	8
66	582899	5098787	14	16	15

**Annexe 4 : Résultats d'ozone par campagne**

Code du site	Coordonnée X	Coordonnée Y	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3	Campagne 4
1	586221	5095159		68	69	61
2	585244	5095172	68	82	105	65
4	582469	5095404	76		100	68
5	581361	5095385	59	66	89	64
6	580260	5095461	66	86	114	66
7	578534	5095075	66	95	118	70
9	580267	5096576	78	90		76
10	581131	5096610	50	65	79	57
11	582059	5097073	58	76	92	
12	583663	5096718	63	84	98	61
13	584715	5096329	63	74	96	72
15	585995	5097216	69	106	123	72
16	584608	5097394	62	61	91	51
18	582990	5097835	59	76	104	63
19	582375	5097876	63	85	105	64
20	581791	5097941	62	75	102	73
21	581140	5098000	55	82	100	64
23	578964	5098254	66	86	130	71
24	581139	5098434	60	65	113	
25	581944	5098559	53	71	93	58
26	582977	5098433	54	70	80	57
27	582555	5098611	46	64	85	60
28	583580	5098411	63	81	95	71
29	579417	5099056	56	85		65
30	579985	5099087	69	98	120	80
31	581123	5099074	53	30	93	62
32	581893	5098995	54	91	103	66
33	582456	5099124	53	78	86	58
34	583151	5099193	42	57	79	49
35	583672	5098932	61	67	77	54
36	585207	5099005			85	
37	586279	5098661	64	81	89	65
38	581077	5099366	53	91	101	67
39	581849	5099543	82	81	153	81
40	582397	5099826	55	84		62
41	582988	5099669	50	63	79	57
42	583724	5099691	51	77	97	52
44	584737	5100635	60	85	84	66
45	583633	5100182	52	66	90	55
46	583152	5100255	49	67	102	50
47	582360	5100275	55	100	97	82
48	581854	5100292	63	84	115	66
49	581268	5100211	55	79	128	67
50	579973	5100200	70	98	127	73
52	578579	5101633				80
53	580325	5101613	64	87	99	73
54	581160	5101350	69	86	106	71
55	582364	5101714	54	74	81	59
56	583526	5101510	61	79	100	68
57	584663	5101321	57	37	87	68
59	586545	5102823	51	66	95	65
60	584783	5102983	71	72	110	68
61	583417	5102728	63	71	108	58
62	582577	5102496	50	67	89	57
63	580929	5102615	54	71	81	54
65	578453	5103504	89	101	141	