



## Rapport d'expertise

« LES REDUCTIONS D'EMISSIONS PRESENTIEES EN ILE-DE-FRANCE  
PERMETTRONT-ELLES, AUX HORIZONS 2005 ET 2010,  
LE RESPECT DES VALEURS DE REFERENCE DE QUALITE DE L'AIR  
POUR LE DIOXYDE D'AZOTE ? »

établi dans le cadre de l'élaboration du  
Plan Régional de Qualité de l'Air d'Ile de France

par :

Airparif (Service Etudes)  
Robert Vautard (Laboratoire de Météorologie Dynamique)  
Matthias Beekmann (Service d'Aéronomie)

Septembre 2000

Convention n° 99-237-001

*This report is partly based on an original approach developed by Dr. R. G. Derwent from the Met. Office. Moreover, the work conducted in Paris would not have been possible without the kind assistance from our colleagues of the South East Institute of Public Health (SEIPH). They should be thanked here : Gary Fuller, David Carslaw and Sean Beevers. They showed the way !*

Ce rapport d'étude est partiellement inspiré d'un travail original développé par le Dr. R. G. Derwent de l'Office Météorologique Britannique. De plus, le travail conduit à Paris doit beaucoup aux discussions amicales conduites avec nos collègues du SEIPH. Qu'ils en soient ici remerciés : Gary Fuller, David Carslaw et Sean Beevers. Ils ont montré le chemin !

Ce rapport général intègre aux travaux d'Airparif (commande de l'Etat n° 99-237-001) les résultats d'expertise de Matthias Beekmann et de Robert Vautard, qui ont fait l'objet de commandes distinctes de l'Etat (n° 2000-237-001 et n° 2000-237-002).

## SOMMAIRE

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
1.1. Contexte .....	3
1.2. Principe de l'expertise proposée .....	3
<b>2. EVALUATION DES POURCENTAGES DE REDUCTION DES CONCENTRATIONS EN NOX A OBTENIR POUR RESPECTER LES VALEURS DE REFERENCE RELATIVES AU DIOXYDE D'AZOTE SUR LES STATIONS DU RESEAU AIRPARIF.....</b>	<b>5</b>
2.1. Les équilibres photochimiques et la formation de dioxyde d'azote.....	5
2.2. Descriptif des approches mises en œuvre.....	7
2.2.1. L'approche statistique.....	7
2.2.2. Les approches analytiques.....	10
2.2.3. Mise en oeuvre des approches statistiques et analytiques .....	17
2.3. Résultats d'évaluation pour les stations de fond.....	17
2.3.1. Rappel de la situation des sites de mesure de fond par rapport aux valeurs de référence :.....	17
2.3.2. Résultats de l'approche statistique.....	18
2.3.3. Résultats des approches analytiques .....	18
2.3.4. Comparaison des résultats et synthèse .....	20
2.4. Résultats d'évaluation pour les stations de proximité.....	25
2.4.1. Rappel sur la situation des sites de proximité du réseau par rapport aux valeurs de référence :.....	25
2.4.2. Résultats de l'approche statistique.....	25
<b>3. VERS UNE EVALUATION DU POURCENTAGE DE REDUCTION DES ÉMISSIONS DE NOX EN ILE DE FRANCE NECESSAIRES AU RESPECT DES VALEURS DE RÉFÉRENCE RELATIVES AU DIOXYDE D'AZOTE .....</b>	<b>27</b>
3.1. Descriptif de l'approche mise en œuvre.....	27
3.2. Réalisation des cartographies des concentrations de NOx et de NO2 correspondant à la période 1997-1999.....	28
3.2.1. Cartographie des concentrations de NOx.....	28
3.2.2. Cartographie des concentrations moyennes de NO2.....	35
3.2.3. Cartographie du percentile 50 de NO2.....	38
3.3. Recherche des pourcentages de réduction des émissions à appliquer de façon homogène sur l'Ile-de-France en vue du respect des valeurs de référence relatives au NO2 :.....	40
3.3.1. Principe :.....	40
3.3.2. Cartographie du percentile 50 de NO2 estimé pour un pourcentage de réduction des émissions de NOx de 20 % : <b>respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 &lt; 50 µg/m3)</b> .....	41
3.3.3. Cartographie des concentrations moyennes de NO2 estimées pour un pourcentage de réduction des NOx de 30 % : <b>respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 &lt; 50 µg/m3)</b> .....	42
3.3.4. Cartographie des concentrations moyennes de NO2 estimées pour un pourcentage de réduction des NOx de 50 % : <b>respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 &lt; 40 µg/m3)</b> .....	43

<b>4. EVALUATION DES IMPLICATIONS DE LA STRATÉGIE DE REDUCTION DES NOX SUR LES CONCENTRATIONS EN OZONE .....</b>	<b>44</b>
4.1. Implications des stratégies de réduction des NOx sur les concentrations en ozone au sein de l'agglomération parisienne : .....	44
4.2. Implications des stratégies de réduction des NOx sur les concentrations en ozone sous le panache de l'agglomération parisienne : .....	45
<b>5. CONCLUSION .....</b>	<b>46</b>
<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>48</b>

## 1. INTRODUCTION

---

### 1.1. Contexte

La phase de constat du projet de Plan Régional pour la Qualité de l'Air (cf. DRI RE Ile-de-France (1999) et Airparif (1999)) a permis de souligner le non respect chronique en Ile-de-France des objectifs de qualité de l'air portant en particulier sur le dioxyde d'azote et l'ozone. Ainsi, dans la zone agglomérée centrale, près de 2.5 millions de franciliens étaient exposés en 1997 à un air ambiant ne satisfaisant pas à l'objectif de qualité annuel ( $50 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  pour le percentile 50). Corrélativement, l'objectif de qualité réglementaire relatif à l'ozone ( $110 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  en moyenne sur 8 heures) est lui aussi dépassé sur l'ensemble de la région, en particulier sur les zones rurales Sud, où les dépassements cumulés ont atteint près de 300 heures en 1997 (469 heures à Rambouillet en 1999 pour 63 jours distincts concernés).

Les évolutions réglementaires européennes conduiront aux échéances 2005 et 2010 à l'abaissement des valeurs de référence pour le dioxyde d'azote (respectivement 50 puis  $40 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  en moyenne annuelle).

L'étude prospective de l'évolution des émissions polluantes en Ile-de-France permet d'identifier des réductions importantes pour les années à venir des précurseurs à l'origine de la formation des principaux polluants photo oxydants et du dioxyde d'azote. Des diminutions de 35 % et 40 % seraient ainsi respectivement attendues pour les oxydes d'azote et les composés organiques volatils entre 1994 et 2005.

Cependant, les non linéarités de la chimie atmosphérique ne permettent pas d'espérer une réduction proportionnelle des concentrations de dioxyde d'azote et d'ozone dans l'atmosphère francilienne. De fait, la question du respect des valeurs de référence, en particulier pour le dioxyde d'azote, aux horizons 2005 et 2010, reste à investiguer, compte tenu des réductions d'émissions d'oxydes d'azote attendues.

Airparif, avec l'expertise de Robert Vautard (Laboratoire de Météorologie Dynamique) et de Matthias Beekmann (Service d'Aéronomie) se propose, à travers cette étude, d'apporter les premiers éléments de réponse à cette question cruciale : dans quelle proportion les baisses d'émissions d'oxydes d'azote se répercuteront-elles sur les niveaux de dioxyde d'azote dans l'air ambiant.

### 1.2. Principe de l'expertise proposée

Il repose sur l'analyse approfondie des données de surveillance du réseau de mesure d'Airparif et non essentiellement sur des investigations de nature déterministe visant à la solution exacte de la question, compte tenu de sa complexité.

On peut résumer, en ces différentes étapes, le principe général de l'expertise :

- Description théorique des équilibres photochimiques rencontrés en zone urbanisée et en particulier de la relation entre  $\text{NO}_2$  et  $\text{NO}_x$  ;
- Analyse des fonctions non linéaires décrivant les relations entre les concentrations de  $\text{NO}_x$  et celles de  $\text{NO}_2$  selon des approches distinctes et complémentaires (trois approches statistiques et deux approches analytiques) ;
- Calcul des réductions des concentrations de  $\text{NO}_x$  à atteindre en vue du respect des valeurs de référence, à l'aide des différentes méthodes ;

- Mise en relation des concentrations dans l'air de NOx avec les émissions de NOx sur la base du cadastre d'émissions obtenu par Airparif pour l'année 1998 à la résolution de 1 km<sup>2</sup> sur l'ensemble de la région (dans le cadre du projet SIMPAR/outil de modélisation de la qualité de l'air) ; ceci permet d'obtenir une distribution spatiale sur toute la région des concentrations de NOx pour un niveau d'émissions régionales donné (grâce à l'utilisation du logiciel de géostatistiques I satis) ;
- Etablissement de la relation empirique sur l'ensemble de la région qui relie concentrations moyennes d'oxydes d'azote et concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> en niveau de fond ;
- Détermination des taux nécessaires de réduction des émissions régionales annuelles d'oxydes d'azote permettant le respect des objectifs de qualité de l'air en tout point de la région ;
- Evaluation des implications de la stratégie de réduction des NOx sur les concentrations en ozone.

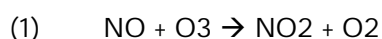
## 2. EVALUATION DES POURCENTAGES DE REDUCTION DES CONCENTRATIONS EN NOX A OBTENIR POUR RESPECTER LES VALEURS DE REFERENCE RELATIVES AU DIOXYDE D'AZOTE SUR LES STATIONS DU RESEAU AIRPARIF

---

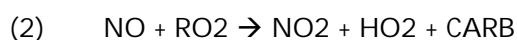
Les relations entre concentrations de NOx et NO2 sont complexes de par les non-linéarités de la chimie atmosphérique. Avant de présenter les approches utilisées pour décrire de manière simplifiée ces relations, il nous est apparu important de fournir une description théorique des équilibres photochimiques rencontrés en zone urbanisée et en particulier des voies de formation du dioxyde d'azote.

### 2.1. Les équilibres photochimiques et la formation de dioxyde d'azote

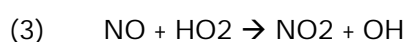
Le dioxyde d'azote (NO2) est un polluant primaire et secondaire, c'est-à-dire qu'il est à la fois émis directement par tout processus de combustion, mais aussi il résulte de l'oxydation du monoxyde d'azote (NO) par l'ozone (O3), via la réaction chimique



Cette réaction, très rapide, ne permet pas en général d'expliquer la formation de dioxyde d'azote importante pouvant être observée, notamment en hiver, en absence d'ozone. L'oxydation de NO peut se faire également par d'autres composés que l'ozone : les radicaux peroxy (RO2, où R est une chaîne contenant des atomes de carbone et d'hydrogène), via la réaction :



Le radical RO2 se transforme donc en le radical HO2 qui peut à son tour oxyder NO en créant un radical hydroxyle :

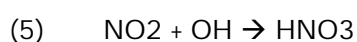


Le composé CARB dans la réaction (2) est un composé carbonylé, aldéhyde ou cétone, et peut à son tour participer à un nouveau cycle d'oxydation, ou bien se photolyser et former de nouveaux radicaux. Enfin, le radical OH oxyde un COV primaire et reforme RO2 via la réaction symbolique et générique :



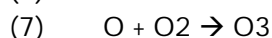
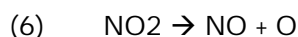
Cette voie d'oxydation de NO en NO2 ne peut être réalisée qu'en présence de radicaux, et ceux-ci ne s'obtiennent généralement que par les processus de photolyse : par exemple, le radical OH est formé par photodissociation de l'ozone en présence d'humidité, mais en milieu pollué, les radicaux sont aussi formés par la photolyse des composés carbonylés comme le formaldéhyde.

La plus forte non-linéarité de la chimie est due au fait qu'en milieu urbain ou pollué, les radicaux sont détruits par la combinaison de OH précisément avec le dioxyde d'azote pour former de l'acide nitrique :



Cette réaction est pratiquement irréversible, de sorte que le radical disparaît. Cette complication fait que l'oxydation de NO en NO2 par les radicaux est limitée en milieu urbain par la quantité totale de NOx, pour des concentrations de COV données.

Enfin n'oublions pas que, sous l'action du rayonnement dans le visible et le proche ultra-violet, NO<sub>2</sub> lui-même se transforme en ozone et monoxyde d'azote par :



Cette dernière chaîne de réactions représente en fait la réaction inverse de (1). Dans la pratique, cet équilibre, nommé « cycle de Chapman », ou « équilibre photo-stationnaire » est très sensible aux paramètres météorologiques, et se traduit soit par une concentration quasi-nulle de NO (l'après-midi en été, ou lors de jours ventés en hiver), soit par une concentration quasi-nulle de O<sub>3</sub> (en hiver ou parfois le matin en été). Cet équilibre est décrit par la relation

$$(8) \quad J \cdot \text{NO}_2 = k \cdot \text{NO} \cdot \text{O}_3$$

où J est le taux de photolyse de NO<sub>2</sub> et k le paramètre donnant la vitesse de la réaction (1).

Nous avons donc, schématiquement, trois voies de formation du dioxyde d'azote :

- l'émission directe,
- l'oxydation par l'ozone
- la formation photochimique (oxydation par les radicaux)

La première voie est prépondérante en l'absence ou en présence de faible rayonnement, surtout lors de conditions de faible dispersion météorologique (vent faible, stabilité faible de l'atmosphère). On estime que dans un processus de combustion, la fraction moléculaire émise de NO<sub>2</sub> par rapport à celle des NO<sub>x</sub> est d'environ 5 %.

La seconde voie dépend des concentrations d'ozone, notamment des concentrations d'ozone importées dans la région, même faibles. Typiquement, les concentrations de fond d'ozone sont assez faibles en hiver (de l'ordre de 60-80 ug/m<sup>3</sup>), et plus fortes en été (80-100 ug/m<sup>3</sup>), et peuvent même monter bien au delà (de 120 à 180 ug/m<sup>3</sup>) lors d'épisodes photochimiques de grande échelle touchant le nord de l'Europe. Ces épisodes sont toutefois assez rares (typiquement une dizaine de jours par an) et ne compteront que peu dans des calculs moyens. Les concentrations de fond d'ozone et la réaction (1) sont particulièrement importantes lors des jours assez ventés, puisque la dispersion est généralement bonne et que la photochimie n'a pas le temps de se mettre en place. Ces jours représentent, en région parisienne, la majorité des jours ; il ne faut donc pas négliger ces concentrations de fond d'ozone et cette voie de formation de NO<sub>2</sub>.

La troisième voie est particulièrement importante par bon ensoleillement, le matin, et par faible dispersion. Malgré tout, ces conditions sont assez rares en région parisienne, et la production photochimique de NO<sub>2</sub> reste assez marginale.

Il est à noter que d'autres voies de transformation de NO en NO<sub>2</sub> sont possibles, notamment sur la surface des aérosols, mais les connaissances ne sont pas encore très précises.

## 2.2. Descriptif des approches mises en œuvre

Différentes approches simplifiées reposant sur un traitement statistique empirique des mesures de NO, NO<sub>2</sub> et d'O<sub>3</sub> du réseau Airparif et/ou sur la prise en compte analytique des équilibres qui régissent les relations entre ces composés ont été mises en œuvre dans le cadre de cette expertise. Nous avons en effet préféré une telle approche basée directement sur les observations du réseau Airparif par rapport à une approche de simulation numérique, qui aurait été beaucoup plus lourde à mettre en œuvre.

### 2.2.1. L'approche statistique

L'approche statistique qui a été retenue dans le cadre de cette expertise s'appuie sur une idée originale développée par Richard Derwent du Meteorological Office (cf. Derwent R G and D R Middleton (1996)) et déjà mise en œuvre au Royaume-Uni (cf. SEIPH (1999)). Cette approche est basée sur une méthode d'analyse approfondie des données de surveillance du réseau. Elle est présentée ci-dessous sous le nom de méthode A. La validité des résultats produits par cette méthode a pu être vérifiée par la mise en œuvre parallèle de deux autres approches statistiques (méthodes B et C) sur deux jeux de données distincts, à savoir les années de mesure 1994 et 1998. La présentation des deux approches statistiques complémentaires (méthodes B et C) est faite en annexe (annexe 1) de même que la présentation des résultats des trois méthodes sur les deux jeux de données tests (annexe 2).

#### **Présentation de l'approche statistique (méthode A) :**

**(1a)** Soit une station de mesure S pour laquelle on dispose d'une série de données horaires (NO<sub>x</sub> et NO<sub>2</sub>) correspondant à une période entière de mesure. Les valeurs horaires de NO<sub>x</sub> sont dans un premier temps regroupées au sein de n classes de concentrations, à intervalle régulier (classes de 10 µg/m<sup>3</sup> dans notre cas).

**(2a)** Par un calcul d'effectif pour chaque classe ( $F_i$ ), il est alors possible de tracer une courbe de distribution des valeurs horaires de NO<sub>x</sub>, encore appelée courbe de fréquence.

**(3a)** Indépendamment, pour chaque classe i de valeurs horaires de NO<sub>x</sub>, on calcule la moyenne des valeurs horaires de NO<sub>2</sub> associées aux mesures de NO<sub>x</sub> appartenant à la classe considérée.

On obtient ainsi :  $Moy_i(NO_2)$

**(4a)** Le calcul de la moyenne pondérée de NO<sub>2</sub> sur l'année considérée s'écrit donc :

$$Moy(NO_2) = \frac{\sum_i Moy_i(NO_2) * F_i}{\sum_i F_i}$$

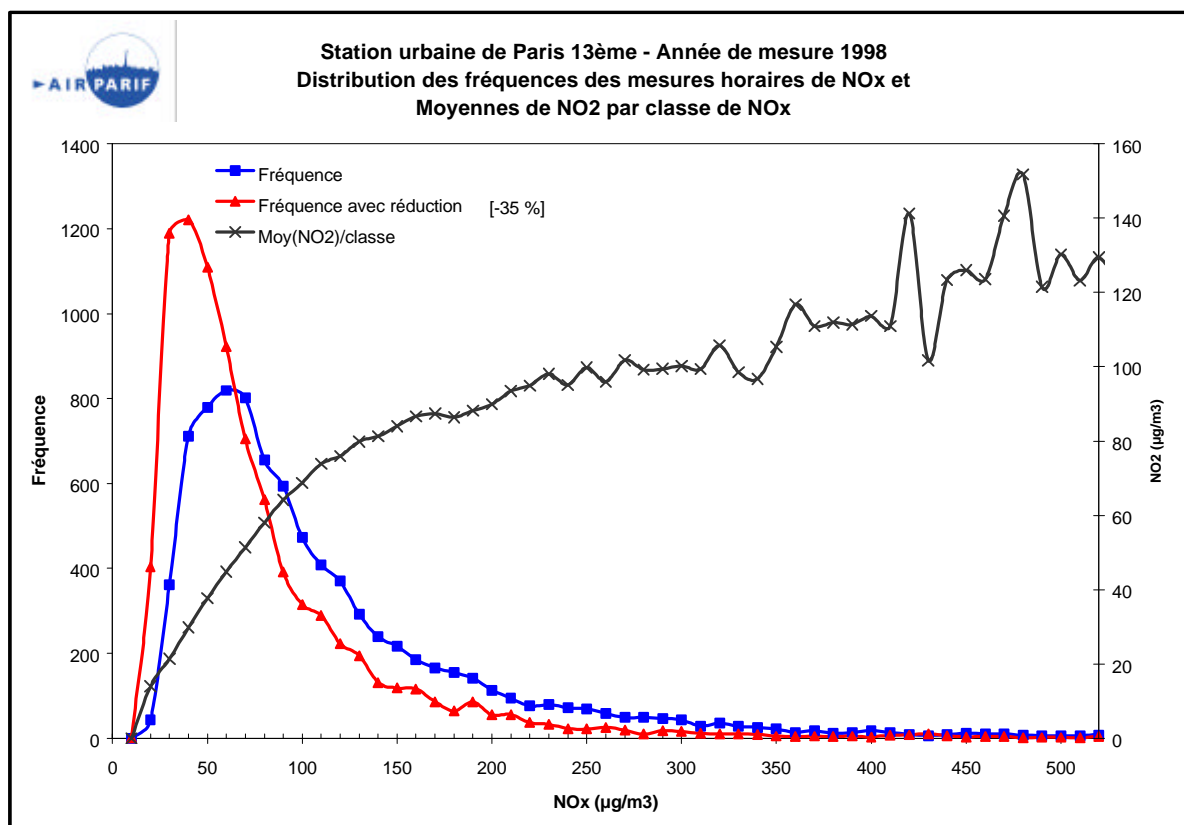
**(5a)** Si l'on postule désormais une réduction homogène sur l'ensemble de la région Ile-de-France de x% des concentrations de NO<sub>x</sub>, on génère alors une nouvelle courbe de fréquence des NO<sub>x</sub> avec des effectifs différents pour chaque classe ( $F_{i,réd}$ ).

**(6a)** Selon le même principe vient ensuite le calcul de la moyenne annuelle de NO<sub>2</sub>, correspondant à une diminution de x% des concentrations de NO<sub>x</sub> :

$$Moy_{réd}(NO_2) = \frac{\sum_i Moy_i(NO_2) * F_{i,réd}}{\sum_i F_{i,réd}}$$

(7a) Il est ainsi possible de tester différents coefficients réducteurs  $x$  de façon à identifier la valeur pour laquelle la moyenne annuelle estimée de NO<sub>2</sub> répond à la valeur de référence souhaitée (2005 ou 2010), pour le site S considéré au départ.

Le graphique suivant illustre chacune des étapes détaillées ci-dessus ; il s'agit de la station urbaine du 13<sup>ème</sup> arrondissement de Paris, et les traitements présentés ici correspondent à l'année de mesure 1998.



(8a) L'estimation du pourcentage de réduction des concentrations de NO<sub>x</sub> nécessaire au respect de l'objectif de qualité actuel relatif au percentile 50 annuel des valeurs horaires de NO<sub>2</sub> (50 µg/m<sup>3</sup>) se fait de manière similaire en prenant en compte les relations expérimentales existant entre percentile 50 et moyenne qui sont présentées ci-dessous.

#### Relations expérimentales entre moyenne et percentile 50 pour le dioxyde d'azote :

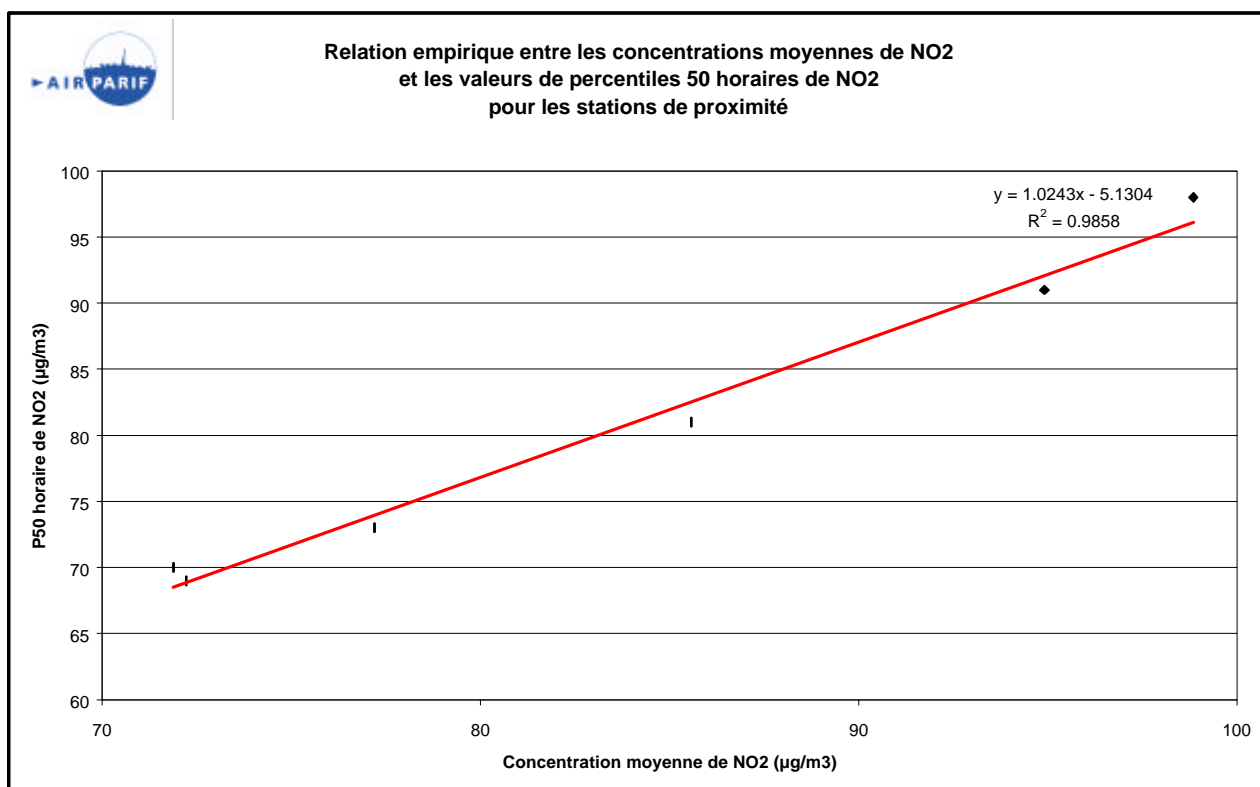
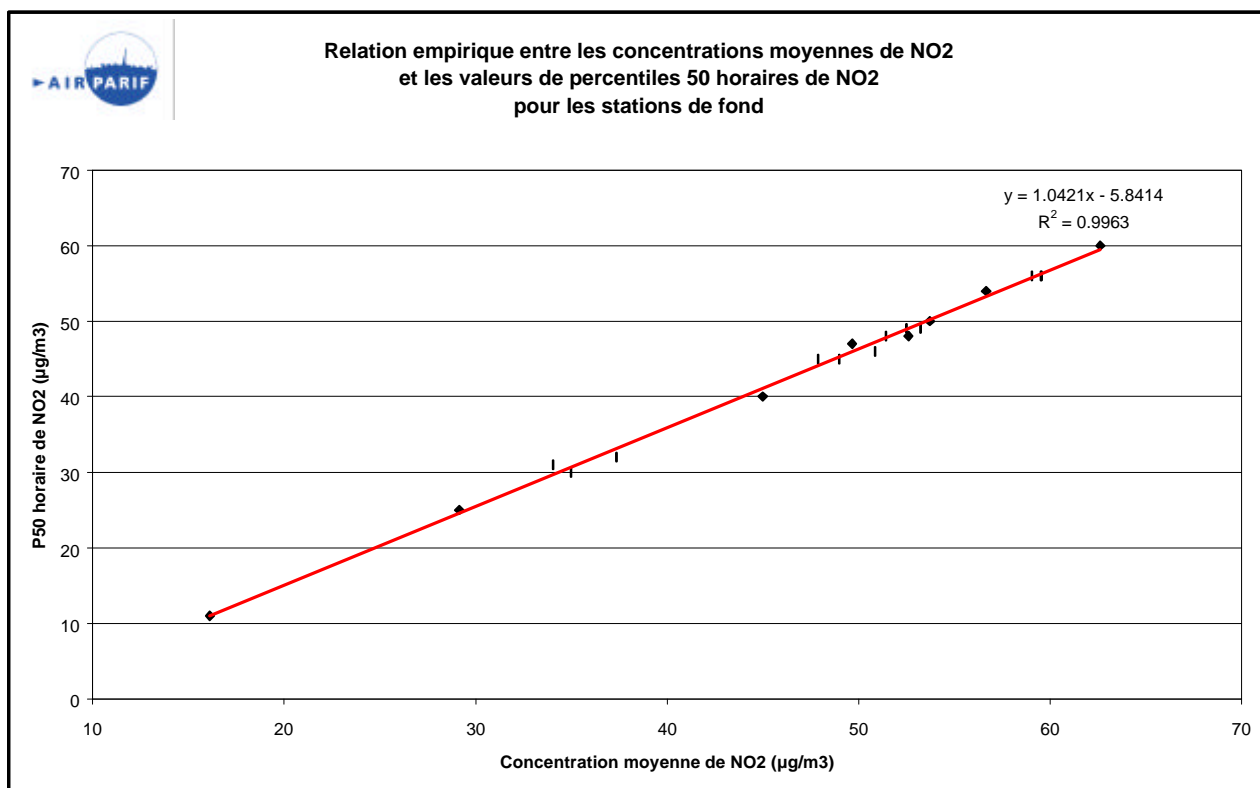
Il apparaît expérimentalement que des relations linéaires (une pour les stations de fond et une pour les stations de proximité) entre moyenne annuelle et percentile 50 de NO<sub>2</sub> peuvent être mises en lumière à partir des observations faites sur le réseau (graphiques présentés page suivante). Les données traitées sont les moyennes et les données de percentile 50 de NO<sub>2</sub> sur la période 1997-1999 à laquelle on s'intéresse dans la suite de cette étude.

Les relations expérimentales ainsi déduites :

- Equation F (pour les stations de fond) :  $P50 = 1.0421 \times Moy - 5.8414$
- Equation P (pour les stations de proximité) :  $P50 = 1.0243 \times Moy - 5.1304$

montrent une très bonne corrélation ( $R^2 = 0.9963$  pour l'équation F et  $R^2 = 0.9858$  pour l'équation P) entre les valeurs annuelles de percentile 50 et de moyenne pour le dioxyde d'azote.

Ainsi le respect du percentile 50 à 50 µg/m<sup>3</sup> peut être ramené au respect d'une valeur de moyenne **MOY<sub>équ</sub> (fond) = 53.59**, solution de l'équation linéaire F pour les stations de fond et au respect d'une valeur de moyenne **MOY<sub>équ</sub> (prox) = 53.82**, solution de l'équation linéaire P pour les stations de proximité.



### 2.2.2. Les approches analytiques

Deux approches analytiques originales ont été développées et explorées dans la cadre de cette expertise. La première a été mise en œuvre par Robert Vautard du Laboratoire de Météorologie Dynamique et la seconde par Matthias Beekmann du Service d'Aéronomie. Elles sont décrites ci-après. Nous renvoyons pour plus de détails concernant ces méthodes aux rapports de ces deux experts (Vautard, 2000) et (Beekmann, 2000).

#### **Présentation de l'approche analytique n° 1 :**

##### Principe :

La relation entre les concentrations de NOX et celles de NO2 en un point est complexe et n'est généralement pas une fonction univoque. En effet, pour une concentration de NOX donnée en un point spatial, la concentration de NO2 associée dépend de la fraction de NO qui s'est convertie en NO2 au cours du transport de la masse d'air vers le point cible, et aussi d'autres facteurs comme le dépôt de NO2 ou la transformation des NOX en d'autres espèces azotées (acide nitrique, PAN, N2O5, HNO2, etc...). Ainsi il est courant d'observer plusieurs valeurs de NO2 pour une valeur donnée de NOX. Parmi les processus pilotant ces dépendances, on se permet de négliger les pertes de NOX par dépôt ou transformation chimique, qui sont généralement faibles à l'échelle d'une agglomération comme Paris, sauf en conditions extrêmes de pollution photochimique, ce qui compte peu dans la moyenne. En revanche, nous considérons les conversions chimiques NO->NO2. Deux processus majeurs pilotent ces conversions : la « titration » de NO par l'ozone et la production photochimique d'OX (OX=NO2+O3) par les radicaux et les hydrocarbures.

##### Objectif :

L'objectif de l'approche analytique n°1 est de construire un modèle simplifié de la relation entre NOX et NO2, qui puisse tenir compte des observations disponibles afin de calculer l'effet de réductions de NOX sur NO2. L'approche consiste donc à établir un modèle du type :

$$(1) \quad NO2 = f(NOX, p1, p2, p3, \dots)$$

où  $p1, p2, p3, \dots$  sont des paramètres *ne dépendant pas* des émissions de NOX reçues au cours du trajet de la masse d'air arrivant sur le point cible. Ce sont typiquement des paramètres météorologiques ou des constantes chimiques. Si ces paramètres sont connus, une réduction de  $x\%$  de la concentration de NOX conduira à l'estimation de NO2 suivante :

$$(2) \quad NO2 = f((1 - x/100)NOX, p1, p2, p3, \dots)$$

Tout le problème est donc d'estimer les paramètres, et la relation  $f$ . Imaginons que nous disposons de  $f$ . Nous disposons également des concentrations observées de NO et NO2 sur le point cible. L'équation (1) peut alors être résolue uniquement si le nombre de paramètres à estimer est réduit à 1. Nous devons donc construire un « modèle  $f$  » suffisamment simplifié pour satisfaire cette contrainte.

##### Le modèle analytique :

Le principe de ce modèle est de considérer que les concentrations d'espèces sont en équilibre chimique. Pour cela, nous considérons l'équilibre photochimique des OX :

$$(3) \quad k1.COV.OH = I(OX - OX^*) - a.\frac{EN}{h}$$

Le terme de gauche représente la production photochimique des OX par les radicaux, limitée par la réaction du radical OH avec les composés organiques volatils (COV). Le terme de droite représente la diffusion (turbulence, transport) des OX avec les valeurs de fond  $OX^*$  (essentiellement de l'ozone). Le paramètre  $I$  est l'inverse du temps caractéristique de diffusion (typiquement de 15 minutes à quelques heures). Enfin, le dernier terme représente l'émission de  $NO_2$ , calculée comme  $aEN$ , où  $EN$  est l'émission surfacique de NOX, et  $a$  représente la fraction de NOX émise sous forme de  $NO_2$ . Le paramètre  $h$  est la hauteur de mélange dans laquelle s'effectue l'émission. En supposant les NOX passifs, l'émission de NOX est alors proportionnelle à la concentration de NOX, et leur équilibre s'exprime par :

$$(4) \quad \frac{EN}{h} = I.NOX$$

Nous supposons ici que les valeurs de fond de NOx sont nulles.  
On peut donc remplacer (4) dans (3) pour obtenir :

$$(5) \quad OX = OX^* + aNOX + \frac{k1}{I}.COV.OH$$

Cette équation donne directement la décomposition des OX en fonction de leur origine. Le premier terme de droite est la valeur de fond. Le second terme est du à l'émission de  $NO_2$ , et le troisième est la production photochimique.

Il reste maintenant à exprimer le terme de production photochimique en fonction de  $NO_2$  et NOX. Pour cela, on exprime l'équilibre des radicaux (équilibre très rapide) en remarquant qu'en zone urbaine, la perte majoritaire de radicaux se fait par formation d'acide nitrique et que leur production majoritaire se fait par la photolyse des COV (principalement des aldéhydes) :

$$(6) \quad J.COX = k2.NO2.OH$$

Dans l'équation 6,  $J$  est en fait *proportionnel* à la fréquence de photolyse des aldéhydes. Ensuite, on exprime l'équilibre des COV en supposant que leur perte majoritaire à l'échelle urbaine est via le transport et la diffusion (cela devient faux les jours stagnants de forte production photochimique), ce qui permet d'écrire, comme pour les NOX :

$$(7) \quad \frac{EC}{h} = I.COX$$

On obtient ainsi une estimation du terme de production photochimique :

$$(8) \quad \frac{k1.COX.OH}{I} = \frac{k1.J.EC^2}{k2.I^3.h^2.NO2} = \frac{P}{NO2}$$

En remplaçant (8) dans (5), il vient :

$$(9) \quad OX = OX^* + aNOX + \frac{P}{NO2}$$

Il reste maintenant à exprimer la répartition de OX en ozone et NO2. Pour cela, nous remarquons que l'équilibre photostationnaire est très rapide (quelques minutes), et se traduit soit par la présence d'ozone et l'absence de NO, soit le contraire. Seulement dans quelques cas, les deux espèces peuvent avoir les concentrations simultanées de l'ordre de 10 µg /m3.

Dans le premier cas (présence d'ozone), on a :

$$(10) \quad NOX = NO2$$

et le problème est donc très simple. En effet, aucune diminution des émissions ne peut altérer cette relation. Les réductions d'émissions de NOX vont au contraire avoir tendance à augmenter en général la concentration d'ozone, en laissant NO=0 (ou presque).

Dans le second cas (O3=0 ou presque), (9) devient :

$$(11) \quad NO2 = OX^* + a \cdot NOX + \frac{P}{NO2}$$

NO2 devient alors solution d'une équation du second degré dont la solution positive est :

$$(12) \quad NO2 = \frac{1}{2} \left( OX^* + a \cdot NOX + \sqrt{4P + OX^* + a \cdot NOX} \right)$$

Si on peut utiliser cette expression lorsque l'ozone est absent, il n'est pas toujours possible de l'utiliser lorsqu'une réduction d'émissions est appliquée. En effet, une réduction de NOX peut conduire à l'apparition d'ozone, et (12) devient fautive, car l'estimation fournie de NO2 devient supérieure à NOX. Lorsque l'ozone apparaît, la relation (10) devient alors valable. Nous obtenons donc le modèle plus général :

$$(13) \quad NO2 = \min \left\{ NOX; \frac{1}{2} \left( OX^* + a \cdot NOX + \sqrt{4P + OX^* + a \cdot NOX} \right) \right\}$$

C'est le modèle qui sera utilisé ci-dessous. Nous constatons que ce modèle est bien de la forme (1), avec, en fait, 3 paramètres : P, OX\* et **a**. Par suite de tests de sensibilité, nous avons estimé que l'impact moyen de réductions d'émissions était très peu sensible aux paramètres OX\* et **a**. Nous avons donc choisi de fixer ces paramètres à OX\*=80 µg/m3 (valeur standard en moyenne annuelle) et **a**=0.05 (5% des émissions de NOX sont sous forme de NO2). Le premier paramètre, P, ne dépend que des conditions météorologiques et radiatives rencontrées.

La méthodologie présentée dans le chapitre précédent sera donc appliquée avec ce modèle. Les données de NO et NO2 seront utilisées pour déterminer P à chaque heure. La formule utilisée pour obtenir P, d'après (11), est :

$$(14) \quad P = NO2 \cdot (NO2 - OX^* - a \cdot NOX)$$

La concentration de NO2 doit, en principe, être au moins égale à **a**.NOX. Dans quelques cas sporadiques, cette condition n'est pas vérifiée ; NO2 est alors remplacée par **a**.NOX. Par ailleurs, il arrive, également sporadiquement, que (14) conduise à une valeur négative de P, car l'ozone de fond fixé à 80 µg/m3 est en fait inférieur. Dans ce cas, P est mis à 0 et OX\* est mis à la valeur  $NO2 - a \cdot NOX$ .

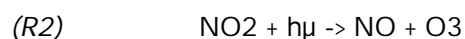
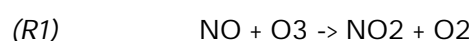
## Présentation de l'approche analytique n° 2 :

La méthode développée ici peut être en fait considérée comme une méthode semi-analytique dans la mesure où elle fait appel à deux étapes, la première étant d'ordre analytique et la seconde d'ordre empirique :

- (1) la représentation analytique de NO<sub>2</sub> en fonction de NO<sub>x</sub> (=NO+NO<sub>2</sub>) et Ox (=O<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub>), en se basant sur l'équilibre photochimique entre NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub>.
- (2) l'établissement d'une relation empirique entre Ox et NO<sub>x</sub>

### L'équilibre photochimique entre NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub>

Nous partons des équations de l'équilibre photochimique entre NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> via les deux réactions :



L'équilibre entre R1 et R2 s'installe en général après quelques minutes et nous pouvons écrire :

$$(1) \quad J_2 \text{ NO}_2 = k_1 \text{ NO O}_3$$

Pendant la nuit, J<sub>2</sub> est nul et soit NO, soit O<sub>3</sub> sont consommés complètement par réaction R1. Nous exprimons NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> par les espèces "familles" invariantes par rapport aux réactions R1 et R2:

$$(2) \quad \text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$$

$$(3) \quad \text{O}_x = \text{O}_3 + \text{NO}_2$$

Nous cherchons à exprimer NO<sub>2</sub> en fonction de NO<sub>x</sub> et d'Ox. L'avantage de cette méthode est d'être générale pour toutes les conditions (Ox faible ou NO faible). Les termes NO<sub>x</sub> et Ox ne sont entachés que d'une erreur de mesure assez faible, car au moins une de leurs composantes est présente dans des concentrations importantes.

Nous remplaçons NO et O<sub>3</sub> dans (1) par les termes donnés par (2) et (3).

$$(1') \quad J_2 \text{ NO}_2 = k_1 (\text{NO}_x - \text{NO}_2) (\text{O}_x - \text{NO}_2)$$

(1') est quadratique par rapport à NO<sub>2</sub>. Nous obtenons la solution:

$$(4) \quad \text{NO}_2 = \frac{1}{2} A \pm \left( \frac{1}{4} A^2 - B \right)^{\frac{1}{2}}$$

avec :

$$A = \text{O}_x + \text{NO}_x + J_2 / k_1$$

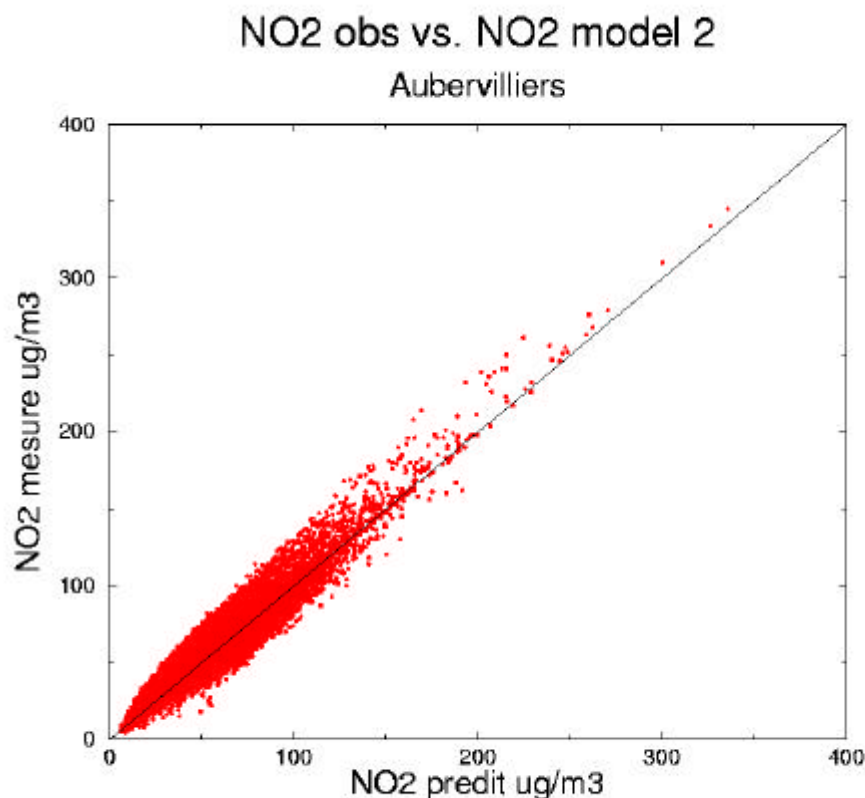
$$B = \text{O}_x \cdot \text{NO}_x$$

Seule la solution pour (4) avec un signe - possède un sens physique. (sinon NO < 0)

La fréquence de photolyse de NO<sub>2</sub> (J<sub>2</sub>) est tabulée (valeurs prises du modèle CHIMERE) en fonction de l'angle zénithal pour des conditions de ciel clair. L'omission des nuages peut entraîner une

surestimation de  $J_2$ , mais qui devient importante seulement pour un ciel totalement couvert (~30 % de réduction pour une couverture nuageuse partielle de  $\frac{3}{4}$  et 75% de réduction pour une couverture totale). La constante de vitesse  $k_1$ , exprimée en  $\mu\text{g}^{-1} \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , prend la valeur 0.0002.

En exprimant  $\text{NO}_2$  ainsi et en le comparant à la concentration de  $\text{NO}_2$  mesurée, un bon accord est trouvé pour la station d'Aubervilliers (1992-1998) (cf. figure ci-dessous). En particulier les moyennes de  $\text{NO}_2$  calculée et observée ne diffèrent pas plus de 1%. La surestimation possible de la fréquence de photolyse du  $\text{NO}_2$  n'a donc que peu d'effet sur l'ensemble des données.



#### Détermination de la relation empirique entre Ox et NO<sub>x</sub>

Des réductions des émissions de NO<sub>x</sub> affecteraient également les concentrations des Ox, par le biais d'émissions directes de NO<sub>2</sub> et de la production photochimique des Ox. Dans l'approche choisie ici, nous cherchons à établir une relation empirique entre OX et NO<sub>x</sub> (contrairement à la méthode analytique n°1).

Nous distinguons deux cas:

- (A) période de jour avec des fréquences de photolyse du NO<sub>2</sub> supérieures à  $0.003 \text{ s}^{-1}$
- (B) période de nuit ou faible rayonnement avec des  $J(\text{NO}_2)$  inférieures à  $0.003 \text{ s}^{-1}$

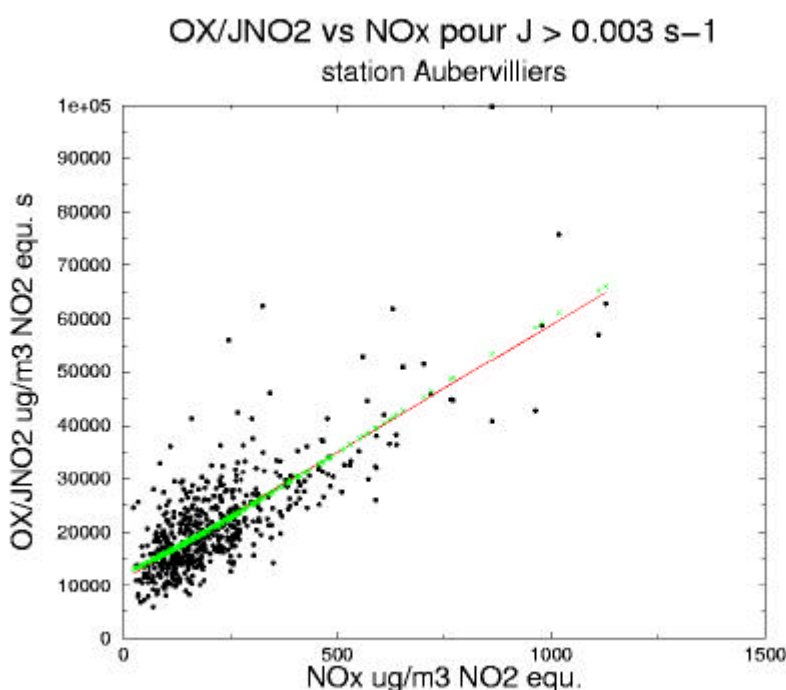
La limite de  $0.003 \text{ s}^{-1}$  correspond à 6h TU pour le solstice d'été et à 11h TU pour le solstice d'hiver. Pour les deux ensembles de points, nous déterminons une droite ou un polynôme d'ajustement.

Période A :

Nous déterminons la droite ou le polynôme d'ajustement pour chaque station en considérant pour chaque jour les concentrations d'Ox et NOx à l'heure du maximum du NO2. Ainsi, les différents points sont choisis le plus possible pour des conditions similaires. De plus, on obtient une corrélation bien meilleure (0.75-0.8) en traçant non pas Ox, mais le terme Ox/J(NO2) contre NOx. En effet, la production photochimique des Ox est d'autant plus forte qu'à la fois les concentrations des précurseurs et le rayonnement sont grands.

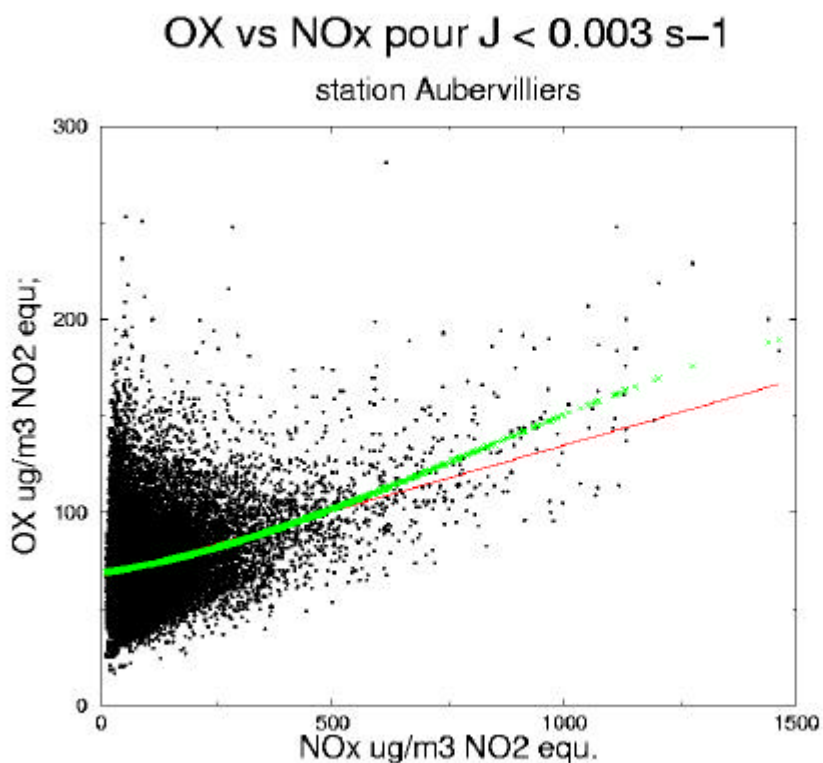
Pour la station Aubervilliers (1992 -1998), la corrélation est de 0.77, la pente de 47 et l'ordonnée à l'origine de 1.05 E+4 (cf. figure ci-dessous). Pour une fréquence de photolyse moyenne de 0.005 s<sup>-1</sup>, ceci correspond à une pente de 0.24, c'est à dire pour une réduction de NOx de 10%, la diminution d'Ox est de 2.4 %. Dans ce cas, l'ordonnée à l'origine est de 53 µg/m3 correspondant à la concentration des Ox en amont. La figure montre également que le polynôme d'ordre 3 (en vert) est assez similaire à la droite d'ajustement (rouge).

Il est nécessaire de faire une remarque sur l'interprétation de ces résultats statistiques. La production photochimique de l'ozone dépend à la fois des teneurs en NOx et en COV. Or, la variabilité des concentrations des NOx et des COV peut être supposée étroitement liée, puisque dépendant essentiellement de la dispersion. Cela veut dire que si le traitement statistique donne une réduction des Ox de x% pour une réduction des NOx de y%, il faut lire le résultat comme une réduction des Ox de x% pour une réduction simultanée des NOx et des COV de y%.

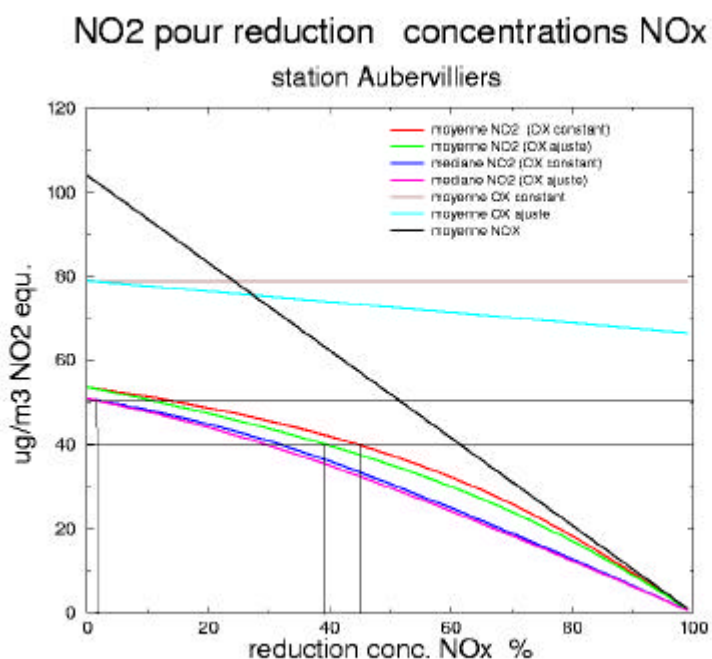


Période B :

En absence de photochimie notable, Ox est directement corrélé avec NOx. Toujours pour la station Aubervilliers (1992-1998), la corrélation est faible (0.33), la pente est environ de 0.07 (cf. figure ci-après). Cette dernière valeur est censée exprimer la part du NO2 dans les émissions des NOx. Elle est cohérente avec les estimations de cette part généralement avancée (entre 5 et 10 %). A nouveau, le polynôme d'ordre 3 (en vert) est assez similaire à la droite (en rouge).



Nous disposons maintenant d'un modèle analytique permettant d'exprimer NO<sub>2</sub> en fonction de NO<sub>x</sub> et Ox et d'un modèle empirique permettant d'exprimer Ox en fonction de NO<sub>x</sub>. La combinaison des deux modèles permet de calculer l'effet des réductions des concentrations de NO<sub>x</sub> sur chaque valeur horaire de NO<sub>2</sub>. La figure suivante montre les différentes moyennes (NO<sub>2</sub>, Ox, NO<sub>x</sub>) en fonction des réductions des NO<sub>x</sub>. Elle montre également les résultats obtenus pour NO<sub>2</sub>, si l'on avait fait l'hypothèse que les teneurs en OX étaient indépendantes de NO<sub>x</sub>.



### 2.2.3. Mise en oeuvre des approches statistiques et analytiques

La première phase de l'expertise a été menée en utilisant l'approche statistique (méthode A) et les approches analytiques sur l'ensemble des sites du réseau de surveillance, pour un jeu de données concernant 3 années centré sur 1998 (années 1997, 1998 et 1999). Les graphiques et tableaux présentant, pour chaque site, les résultats de l'approche statistique A sont fournis en annexe 3.

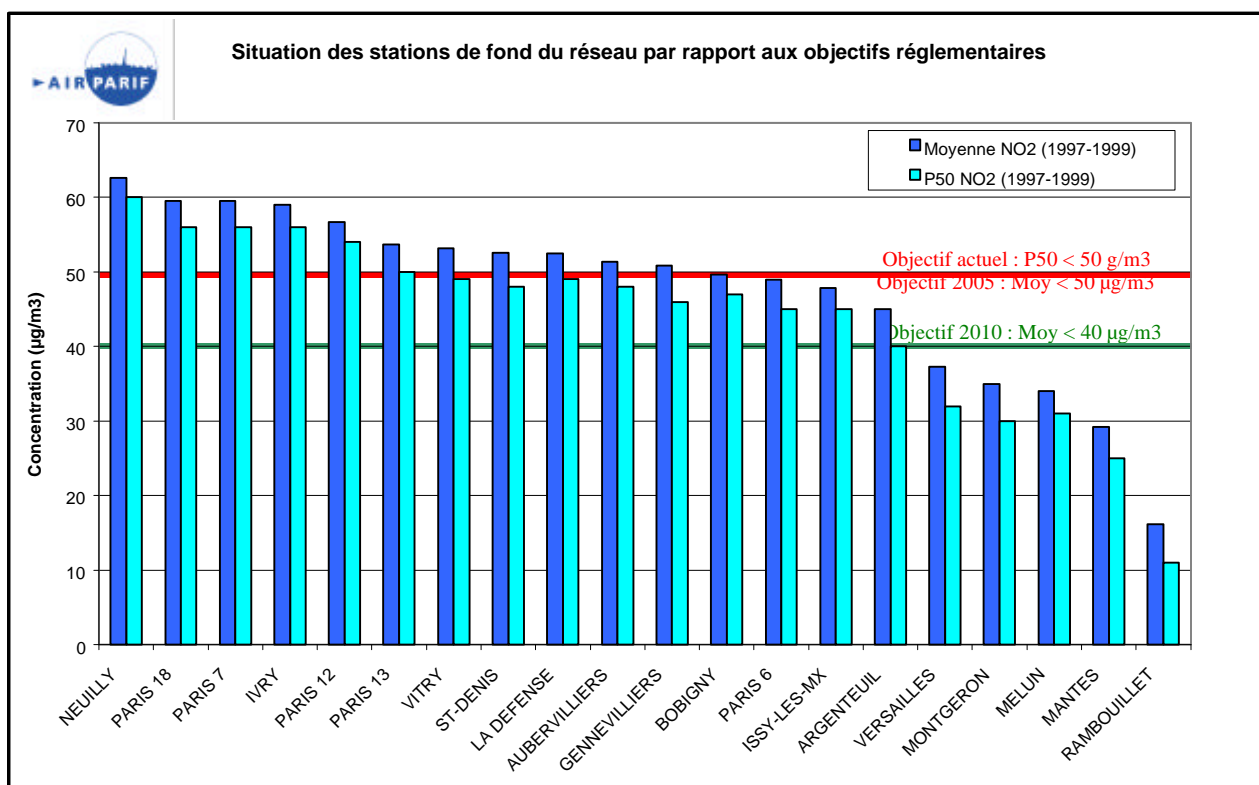
Le choix de cette série particulière de données centrée sur 1998 s'explique par la prise en considération, dans la suite de l'expertise, d'un cadastre d'émissions de NO<sub>x</sub> établi pour l'année 1998. Ainsi, afin de disposer d'un jeu de données suffisamment important à mettre par la suite en relation avec les émissions d'oxydes d'azote de 1998, cette sélection temporelle nous est apparue comme étant la plus judicieuse et la plus représentative de la situation actuelle.

Les résultats obtenus pour chacune des trois valeurs de référence sont présentés ci-après.

### 2.3. Résultats d'évaluation pour les stations de fond

#### 2.3.1. Rappel de la situation des sites de mesure de fond par rapport aux valeurs de référence :

Le graphique suivant indique la situation des stations de fond du réseau de surveillance par rapport aux valeurs de référence relatives à la moyenne (objectifs 2005 et 2010) et au percentile 50 (objectif actuel) de NO<sub>2</sub>. La période de temps considéré est 1997-1999.



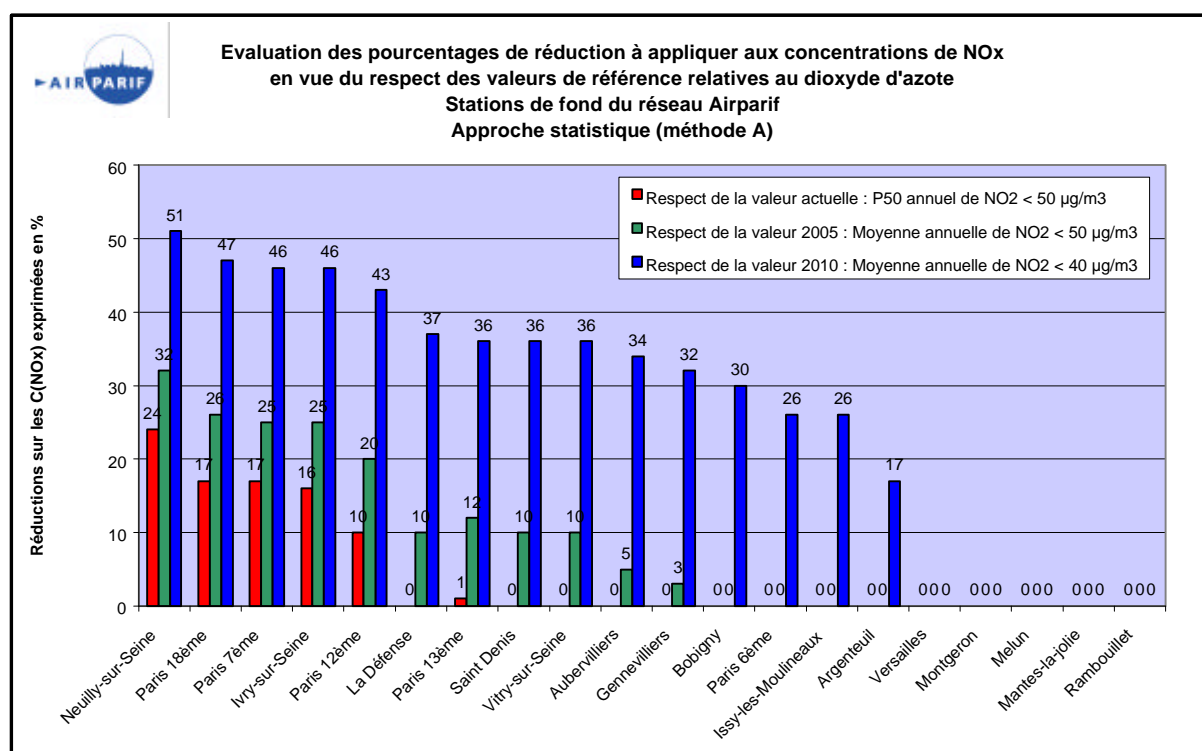
On constate que 15 stations sur 20 dépassent la valeur de référence 2010 (Moy NO<sub>2</sub> < 40 µg/m<sup>3</sup>), 11 stations sur 20 dépassent la valeur de référence 2005 (Moy NO<sub>2</sub> < 50 µg/m<sup>3</sup>) et 5 stations sur 20 dépassent encore l'objectif actuel (P50 < 50 µg/m<sup>3</sup>).

### 2.3.2. Résultats de l'approche statistique

Les résultats obtenus en appliquant l'approche statistique (méthode A) sur les données des stations de fond sont présentés ici. Concernant la période de mesure 1997-1999, et pour chacun des sites de fond étudiés dans la cadre de l'expertise, on visualise les pourcentages de réduction des concentrations de NOx à obtenir pour respecter les trois valeurs de référence citées plus haut, à savoir :

- P50 [NO2] < à 50 µg/m<sup>3</sup>,
- Moyenne [NO2] < 50 µg/m<sup>3</sup>,
- Moyenne [NO2] < 40 µg/m<sup>3</sup>,

Les valeurs nulles correspondent bien évidemment aux sites sur lesquels moyenne et/ou percentile 50 de dioxyde d'azote sont déjà inférieurs aux objectifs réglementaires considérés, et ce sur la période de mesure prise en considération.

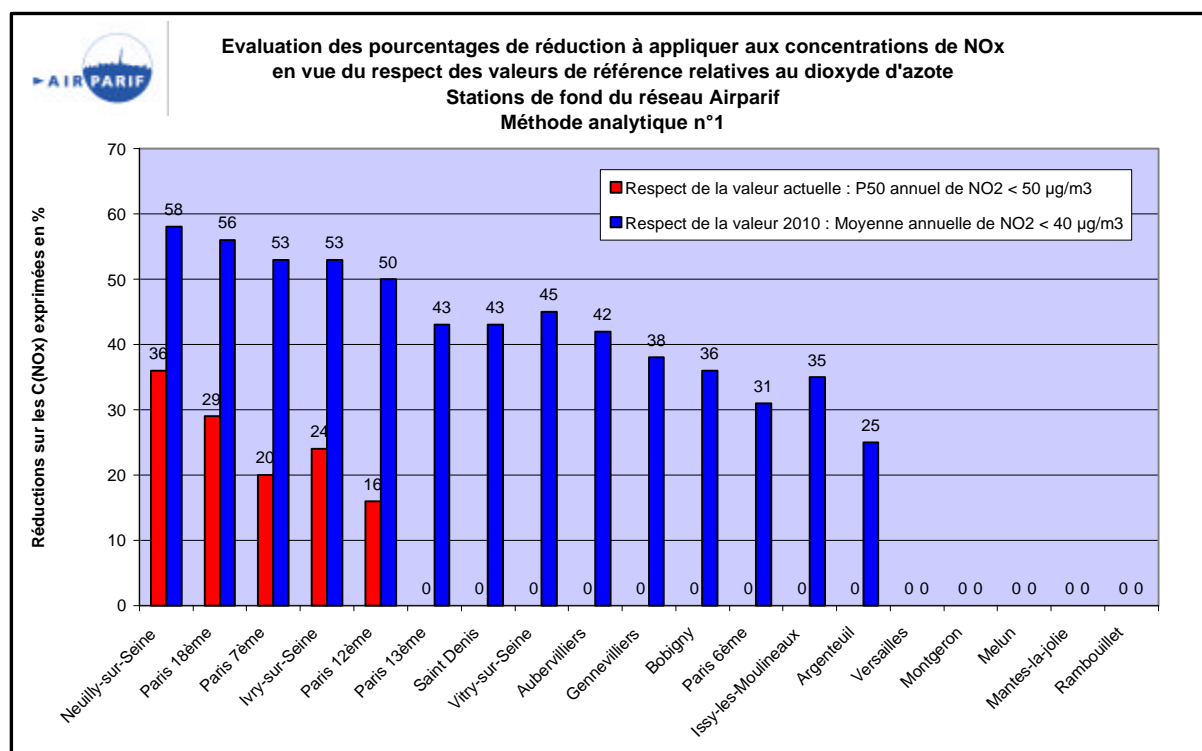


### 2.3.3. Résultats des approches analytiques

Les histogrammes qui suivent présentent les résultats obtenus avec les méthodes analytiques telles qu'elles ont été décrites antérieurement.

#### Résultats approche analytique n° 1 :

L'approche analytique n°1 n'a été utilisée que pour estimer les % de réduction des NOx nécessaires au respect des valeurs de référence actuelle et 2010.



*Evaluation des incertitudes de la méthode :*

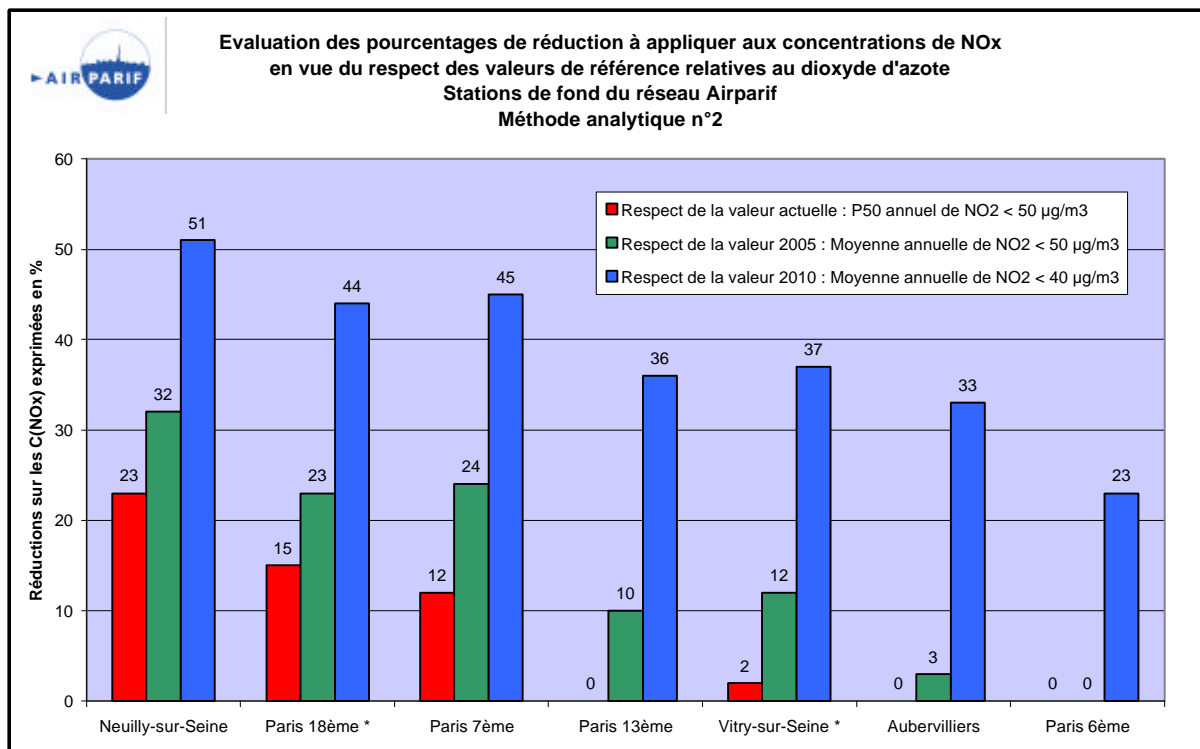
Le modèle analytique n°1 repose sur l'hypothèse que l'on ne peut pas avoir simultanément présence d'ozone et de NO, ce qui est évidemment réducteur puisqu'il arrive relativement souvent qu'on observe à la fois de l'ozone et du NO en petite quantité. Par conséquent, l'estimation réelle des concentrations de NO<sub>2</sub> devrait être diminuée de la valeur de l'ozone. Même si cette valeur est faible, ce genre de situation peut se produire assez fréquemment. Le modèle utilisé conduit donc à un léger biais, et les estimations des réductions à appliquer pour satisfaire aux critères de qualité de l'air sont probablement un peu surestimées.

Le modèle analytique n°1 permet de réduire indépendamment les COV et les NOx. Les résultats qui ont été présentés ci-dessus ont été obtenus en ne prenant en compte que des réductions de NOx et non de COV. Si l'on refait les calculs en supposant maintenant une réduction des COV égale à celle des NOx, on obtient des résultats qui sont très peu différents (- 3 % en moyenne). La sensibilité de la méthode utilisée à ce paramètre semble donc très faible.

Le meilleur test d'incertitude s'obtient certainement en comparant les résultats obtenus au moyen de différentes méthodes. C'est ce qui sera présenté plus loin (cf. 2.2.4).

## Résultats approche analytique n° 2 :

Concernant l'approche n°2, la méthode semi-analytique considérée ne rend possible les calculs que sur les sites où l'on dispose des trois mesures O3, NO et NO2.



\* Pour les sites de Paris 18<sup>ème</sup> et de Vitry-sur-Seine, les calculs n'ont pu être effectués à l'aide de cette méthode que sur une période réduite (à partir du 08/04/98 pour Paris 18<sup>ème</sup> et à partir du 25/08/98 pour Vitry-sur-Seine, dates respectives de mise en service des analyseurs d'O3 sur ces sites), compte tenu de l'impératif de disposer simultanément de données de NOx et d'O3.

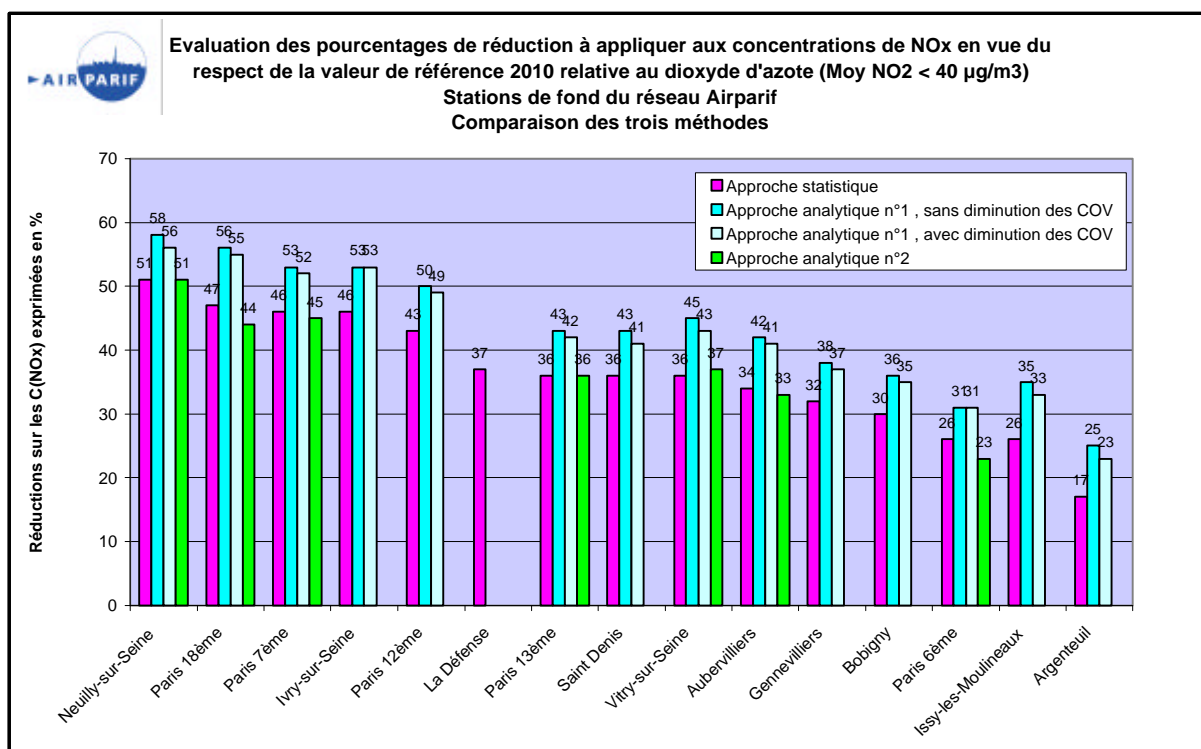
### 2.3.4. Comparaison des résultats et synthèse

Nous présentons ici une comparaison des résultats obtenus par les trois méthodes pour chacun des objectifs visés.

#### Résultats concernant le respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3) :

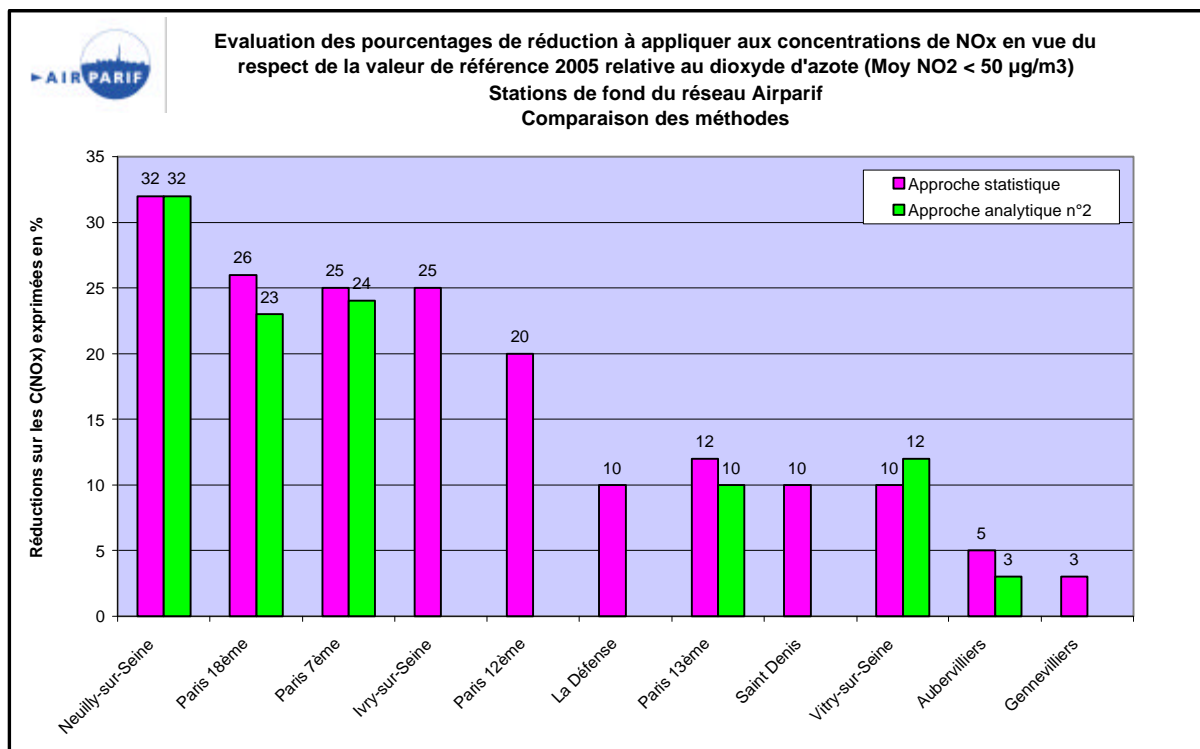
Concernant les sept sites où l'on dispose à la fois des résultats obtenus par l'approche statistique et de ceux obtenus par l'approche analytique n°2, on constate que les réductions à obtenir calculées sont égales sur les sites de Neuilly et Paris 13<sup>ème</sup>, et qu'elles diffèrent au plus de 3% sur les autres sites. Mis à part le cas du site de Vitry-sur-Seine, l'approche statistique amène dans tous les autres cas à des réductions supérieures. En moyenne, l'écart relatif entre résultats de l'approche analytique n°2 et approche statistique est très faible (- 4 %). Nous rappelons que pour les sites de Paris 18<sup>ème</sup> et de Vitry-sur-Seine, les calculs avec la méthode analytique n°2 ont porté sur une période plus courte que la période 1997-1999 utilisée par les autres méthodes.

Si l'on s'attache maintenant à comparer les résultats de l'approche statistique à ceux de l'approche analytique n°1 (avec ou sans réduction des COV simultanément aux réductions de NOx), une différence dans l'estimation des réductions subsiste et ce quelque soit la station. En outre, les différences observables se font toujours dans le même sens, à savoir que c'est l'approche analytique qui donne ici les réductions à obtenir les plus fortes. Si l'on considère l'ensemble des sites où l'on dispose de résultats par ces deux approches, les réductions estimées par la méthode analytique n°1 sont plus élevées de 7% en moyenne. Toujours en moyenne, l'écart relatif entre résultats de l'approche analytique n°1 et approche statistique est certes non négligeable mais reste acceptable (+ 22 %).



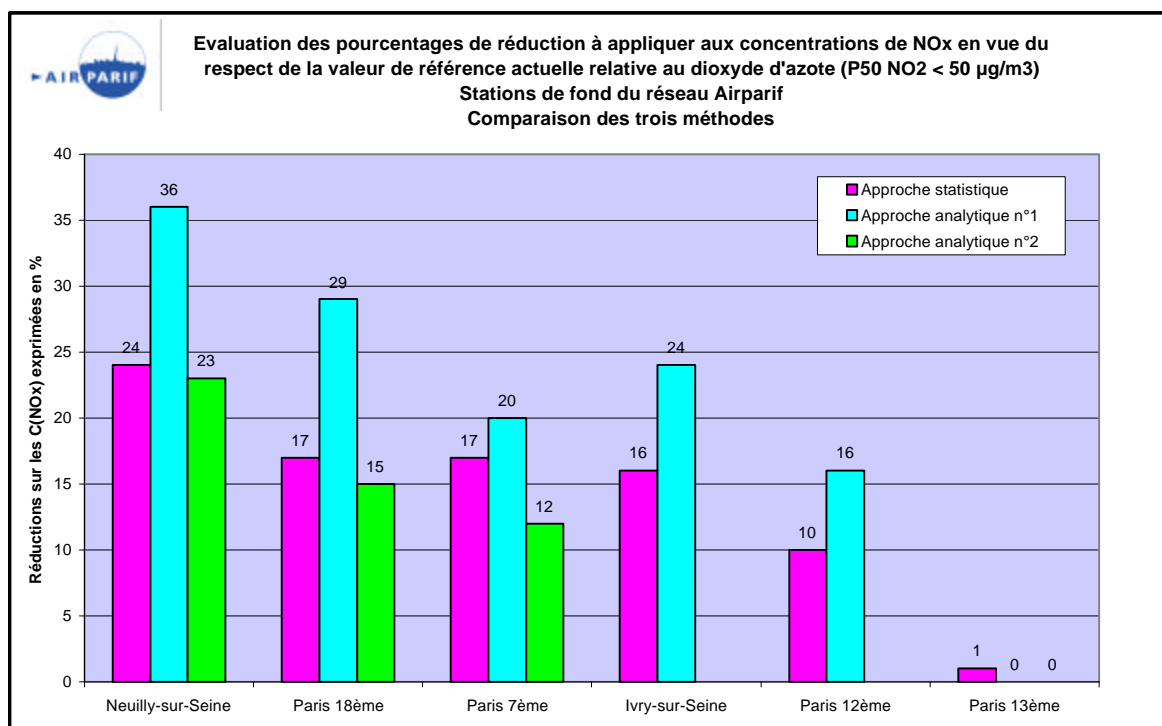
**Résultats concernant le respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3) :**

Nous présentons ici les résultats obtenus par l'approche statistique et par l'approche analytique n°2 pour les sites qui dépassent actuellement la valeur de référence 2005. Une comparaison des résultats obtenus par les deux approches sur les sites où l'on a pu utiliser les deux méthodes (sites disposant d'une mesure de l'ozone) fait apparaître un très bon accord. Les réductions à obtenir calculées par les deux approches diffèrent en effet de au plus 3 % sur ces sites. C'est généralement l'approche statistique qui amène à des réductions supérieures.



**Résultats concernant le respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3) :**

Les résultats obtenus avec l'approche statistique et avec l'approche analytique n°2 sont assez proches sur les sites pour lesquels on a pu disposer d'une comparaison entre ces deux méthodes dans le cas du respect de la valeur de référence relative au P50 de NO2. Si l'on s'attache à comparer les résultats de l'approche statistique à ceux de l'approche analytique n°1, une différence importante dans l'estimation des réductions apparaît et ce quelle que soit la station. En outre, les différences observables se font toujours dans le même sens, à savoir que c'est l'approche analytique qui donne les réductions à obtenir les plus élevées. La différence est importante puisque l'écart relatif entre résultats de l'approche analytique n°1 et approche statistique est de +49 %.

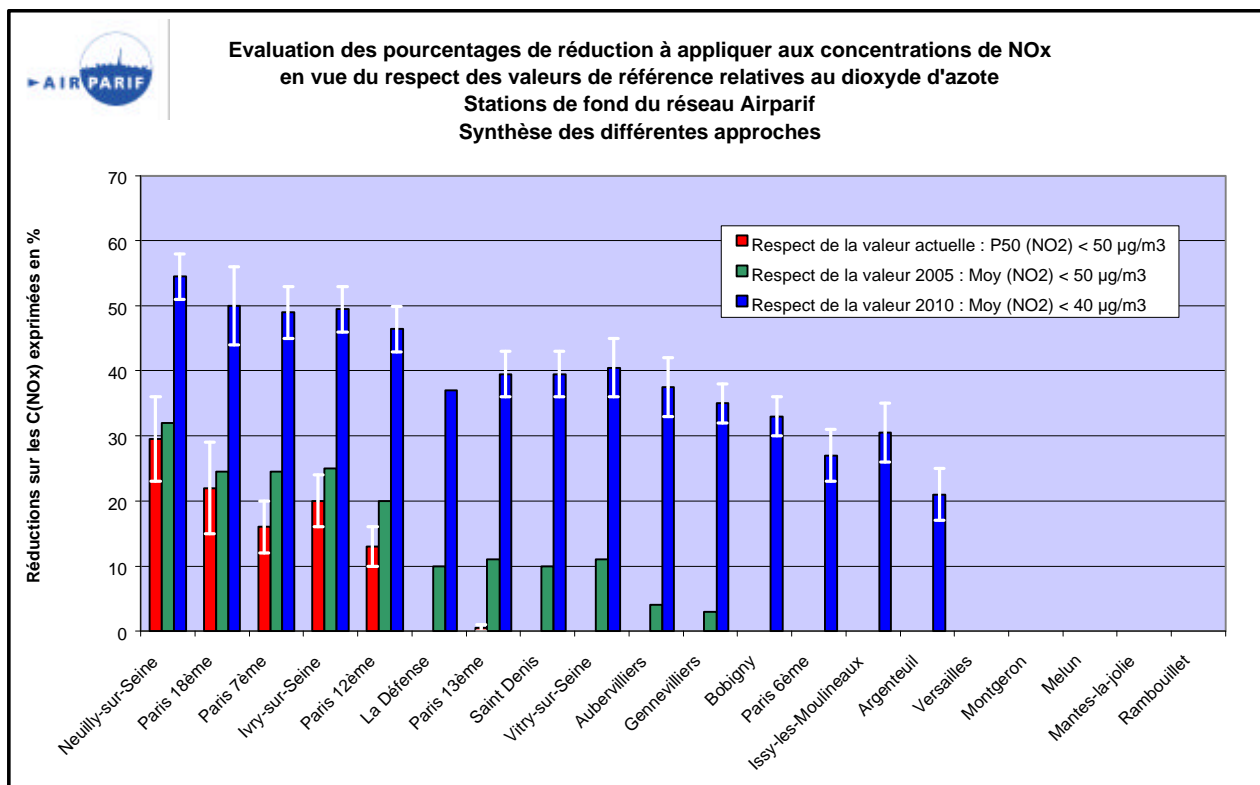



**Conclusions :**

Ces observations nous amènent à conclure que les résultats de calcul de l'approche statistique sont validés de façon satisfaisante par les approches analytiques associées pour ce qui est des résultats concernant le respect des valeurs de référence 2005 et 2010 portant sur la moyenne de NO2. Les résultats de l'approche statistique s'inscrivent en effet entre les bornes définies par ces dernières (avec bornes supérieures = résultats obtenus par l'approche analytique n°1, et bornes inférieures = résultats obtenus par l'approche analytique n°2) et les écarts relatifs issus des comparaisons de résultats entre méthodes restent acceptables (de l'ordre de -4 % pour méthode analytique n°2 / approche statistique et de l'ordre de + 22 % pour la méthode analytique n°1 / approche statistique). Comme cela a déjà été souligné (cf. 2.2.3 résultats de l'approche analytique n°1), l'approche analytique n°1 conduit vraisemblablement à une surestimation de 5 à 10 % des pourcentages de réduction à appliquer pour satisfaire aux critères de qualité de l'air, de par les simplifications faites, inhérentes à la méthode.

Pour les résultats relatifs à l'objectif actuel concernant le P50 de NO2, les incertitudes sont par contre beaucoup plus importantes. L'écart relatif entre résultats provenant de l'approche analytique n°1 et de la méthode statistique vaut ainsi +49 % en moyenne et la comparaison des résultats de l'approche analytique n°2 et de la méthode statistique se limite à trois sites.

On peut ainsi dresser un tableau récapitulatif (cf. page suivante) des estimations des réductions des concentrations de NOx nécessaires à atteindre pour chacun des sites de fond pour respecter chacune des trois valeurs de référence. Lorsque l'on dispose de résultats différents fournis par les différentes méthodes mises en œuvre, on fournit comme résultat une moyenne des estimations extrêmes avec la plage de variation. Par commodité visuelle, un histogramme de répartition des réductions nécessaires est associé au tableau de résultats.

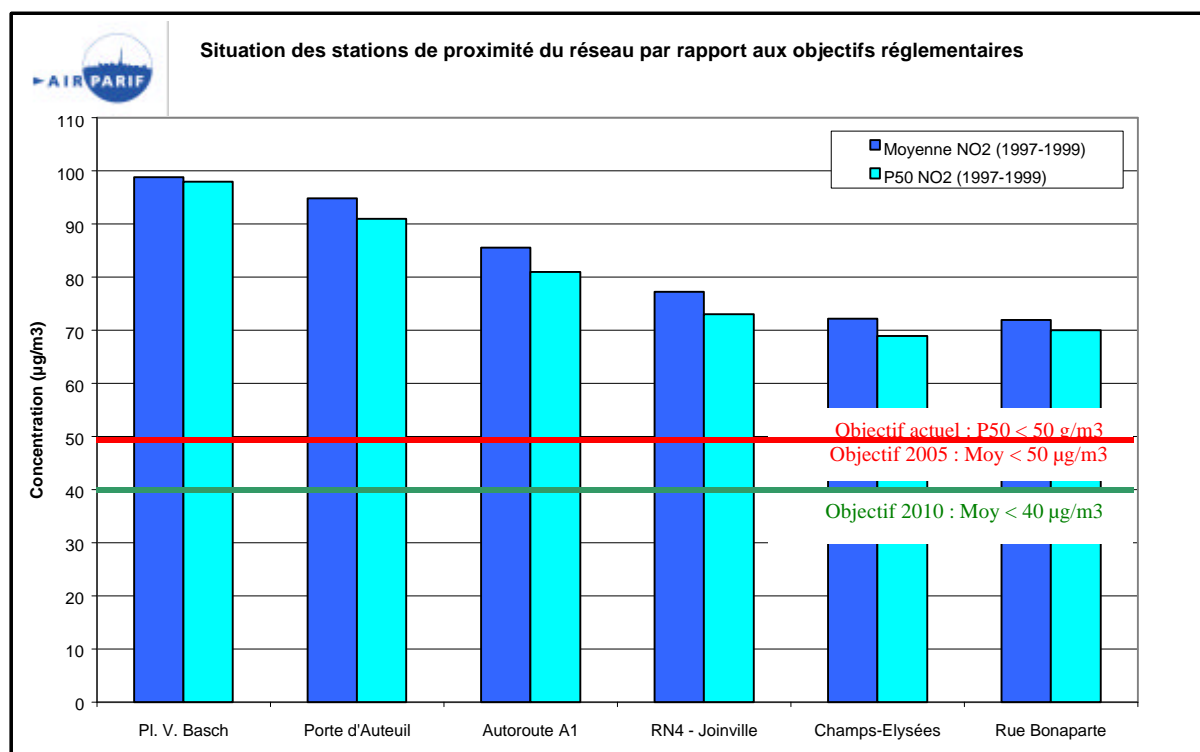


	% de réduction des concentrations de NOx nécessaire au respect des valeurs de référence		
	Objectif de qualité actuel P50 (NO2) < 50 µg/m3	Objectif de qualité 2005 Moy (NO2) < 50 µg/m3	Objectif de qualité 2010 Moy (NO2) < 40 µg/m3
Neuilly-sur-Seine	29.5 ± 6.5	32 (estimation basse)	54.5 ± 3.5
Paris 18ème	22 ± 7	24.5 ± 1.5	50 ± 6
Paris 7ème	16 ± 4	24.5 ± 0.5	49 ± 4
Ivry-sur-Seine	20 ± 4	25 (estimation basse)	49.5 ± 3.5
Paris 12ème	13 ± 3	20 (estimation basse)	46.5 ± 3.5
La Défense	0	10 (estimation basse)	37 (estimation basse)
Paris 13ème	0.5 ± 0.5	11 ± 1	39.5 ± 3.5
Saint Denis	0	10 (estimation basse)	39.5 ± 3.5
Vitry-sur-Seine	0	11 ± 1	40.5 ± 4.5
Aubervilliers	0	4 ± 1	37.5 ± 4.5
Gennevilliers	0	3 (estimation basse)	35 ± 3
Bobigny	0	0	33 ± 3
Paris 6ème	0	0	27 ± 4
Issy-les-Moulineaux	0	0	30.5 ± 4.5
Argenteuil	0	0	21 ± 4
Versailles	0	0	0
Montgeron	0	0	0
Melun	0	0	0
Mantes-la-jolie	0	0	0
Rambouillet	0	0	0

En se basant sur les résultats de mesure de trois années de surveillance (1997 à 1999), on constate globalement qu'en situation de fond et à l'échelle de la zone agglomérée, les réductions maximales des concentrations en oxydes d'azote à obtenir pour respecter les valeurs de référence relatives au dioxyde d'azote sur les sites dépassant actuellement ces valeurs atteignent les 50-60 % pour la valeur de référence 2010, les 30-35 % pour la valeur de référence 2005 et les 20-30 % pour l'objectif actuel. Les valeurs basses de la fourchette sont généralement obtenues par l'approche statistique et par la méthode analytique n°2, les valeurs hautes le sont quant à elles plutôt par l'approche analytique n°1, méthode la plus pessimiste.

## 2.4. Résultats d'évaluation pour les stations de proximité

### 2.4.1. Rappel sur la situation des sites de proximité du réseau par rapport aux valeurs de référence :



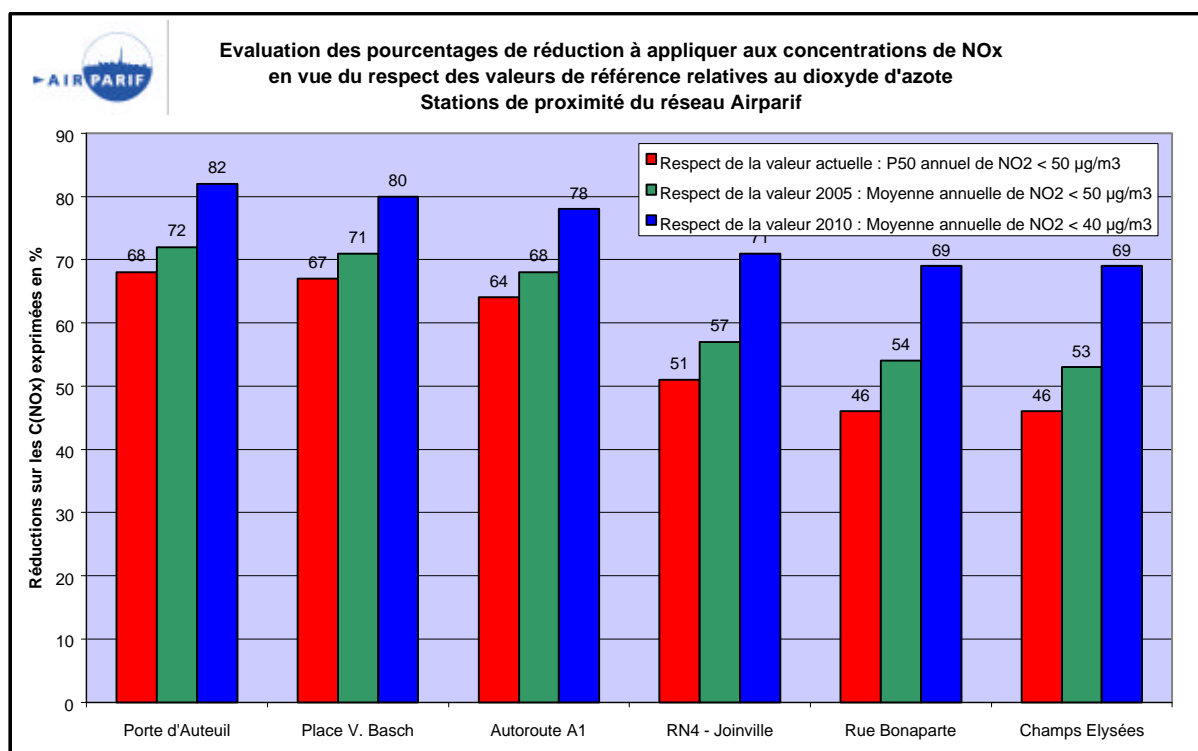
Tous les sites de proximité dépassent à ce jour de façon importante les valeurs de référence.

### 2.4.2. Résultats de l'approche statistique

Pour les stations de proximité, seule l'approche statistique a été mise en œuvre. En effet, les méthodes analytiques présentées en 2.1.2. reposent sur le principe de l'équilibre photo stationnaire entre NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub>. Or en situation de proximité de sources importantes d'oxydes d'azote, cet équilibre n'est pas toujours réalisé. En effet, si des émissions fraîches de NO arrivent dans une masse d'air et perturbent l'équilibre établi, un nouvel équilibre met une à deux minutes à s'instaurer. Dans le cas d'un vent faible de 3 m/s, ce laps de temps correspond à une distance de quelques centaines de mètres. Or, les stations de proximité se trouvent dans un périmètre des sources d'émissions plus proche que cette distance. Cela veut dire que tout NO émis n'est donc pas converti en la quantité de NO<sub>2</sub> à l'équilibre, comme supposé dans les méthodes analytiques. On voit donc bien que les méthodes analytiques atteignent leur limite de validité pour ce type de situation. On a donc préféré utiliser dans ce cas une méthode plus empirique qu'est l'approche statistique A, approche qui a par ailleurs été bien validée par les approches analytiques dans le cadre du volet sur les stations de fond.

Nous présentons ci-après les résultats obtenus avec l'approche statistique pour les sites de proximité du réseau Airparif.

Station	Objectif actuel	Objectif 2005	Objectif 2010
	P50 (NO <sub>2</sub> ) < 50 µg/m <sup>3</sup>	Moy (NO <sub>2</sub> ) < 50 µg/m <sup>3</sup>	Moy (NO <sub>2</sub> ) < 40 µg/m <sup>3</sup>
Porte d'Auteuil	68	72	82
Place V. Basch	67	71	80
Autoroute A1	64	68	78
RN4 - Joinville	51	57	71
Rue Bonaparte	46	54	69
Champs Elysées	46	53	69



Pour que les valeurs de référence puissent être respectées sur les stations de proximité, il faudrait des efforts colossaux de réduction des concentrations de NOx. Les réductions nécessaires pour atteindre les valeurs de référence sont ainsi estimées à 70-80 % (pour l'objectif 2010), à 50-70 % (pour l'objectif 2005) et à 40-70 % (pour l'objectif actuel). On voit de suite que les réductions d'émissions de NOx attendues à l'horizon 2005 (-35 % par rapport à la situation de 1994) ne pourront à elles seules permettre d'atteindre ces objectifs. Il faudrait, en sus de l'intensification des mesures de réductions des émissions, baisser également les concentrations d'ozone de fond, c'est-à-dire de l'ozone apporté par les masses d'air en provenance d'autres régions, françaises ou européennes.

### 3. VERS UNE EVALUATION DU POURCENTAGE DE REDUCTION DES EMISSIONS DE NOX EN ILE DE FRANCE NECESSAIRES AU RESPECT DES VALEURS DE REFERENCE RELATIVES AU DIOXYDE D'AZOTE

---

#### 3.1. Descriptif de l'approche mise en œuvre

L'approche que l'on se propose de mettre en œuvre ici comporte deux phases bien distinctes pouvant elles-mêmes être décomposées en un certain nombre d'étapes.

- A. La réalisation des cartographies des concentrations de NOx et de NO2 correspondant à la période 1997-1999 qui peut se décomposer en trois étapes distinctes :
- La réalisation d'une cartographie des concentrations de NOx pour la période 1997-1999 à partir du cadastre des émissions de NOx de l'année 1998 et d'une relation empirique permettant de corréliser les concentrations de NOx en un point aux émissions « locales » répertoriés dans un certain voisinage.
  - La réalisation de la cartographie des concentrations moyennes en NO2 pour la période 1997-1999 à partir de la cartographie des concentrations en NOx et d'une relation déterminée expérimentalement à partir des résultats de la partie 2 qui permet de corréliser pour un point donné les concentrations de NO2 avec les concentrations de NOx
  - La réalisation de la cartographie du P50 en NO2 pour la période 1997-1999 à partir de la cartographie des concentrations moyennes en NO2 en utilisant la relation linéaire entre P50 et moyenne de NO2 déjà utilisée dans la partie 2.2.1 p. 8.
- B. La recherche de l'ensemble des intensités de réduction des émissions qu'il serait nécessaire d'appliquer de façon **homogène** sur l'Ile-de-France pour permettre le respect de chacune des trois valeurs de référence relatives aux concentrations de NO2 (objectifs actuel, 2005 et 2010). Il s'agit là d'une première évaluation relative à l'intensité des stratégies de réduction à mettre en œuvre. Cette phase se décompose en trois étapes essentielles :
- la réalisation d'une cartographie des concentrations de NOx correspondant à une réduction homogène de X% des émissions en Ile-de-France. Ceci se fait en appliquant un facteur  $(1 - X/100)$  en tout point de la carte des concentrations de NOx de la période 1997-1999 obtenue au point A.a.
  - La réalisation de cartographies pour la moyenne et le percentile de NO2 en reprenant les points A.b et A.c, à partir des cartographies des concentrations de NOx obtenues pour différents % de réduction des émissions.
  - L'étape ultime consiste à sélectionner les intensités de réduction des émissions qui auront permis d'obtenir des cartographies montrant le respect en tout point des objectifs réglementaires visés.

Les différentes cartographies qui sont présentées dans cette partie de l'expertise ont été réalisées à l'aide du logiciel de géostatistiques I sats (cf. Géovariances (1997)). Bien que les potentialités de la géostatistique n'aient pas été exploitées dans le cadre de cette étude, nous avons eu recours aux modules de présentation cartographique des données offerts par ce logiciel.

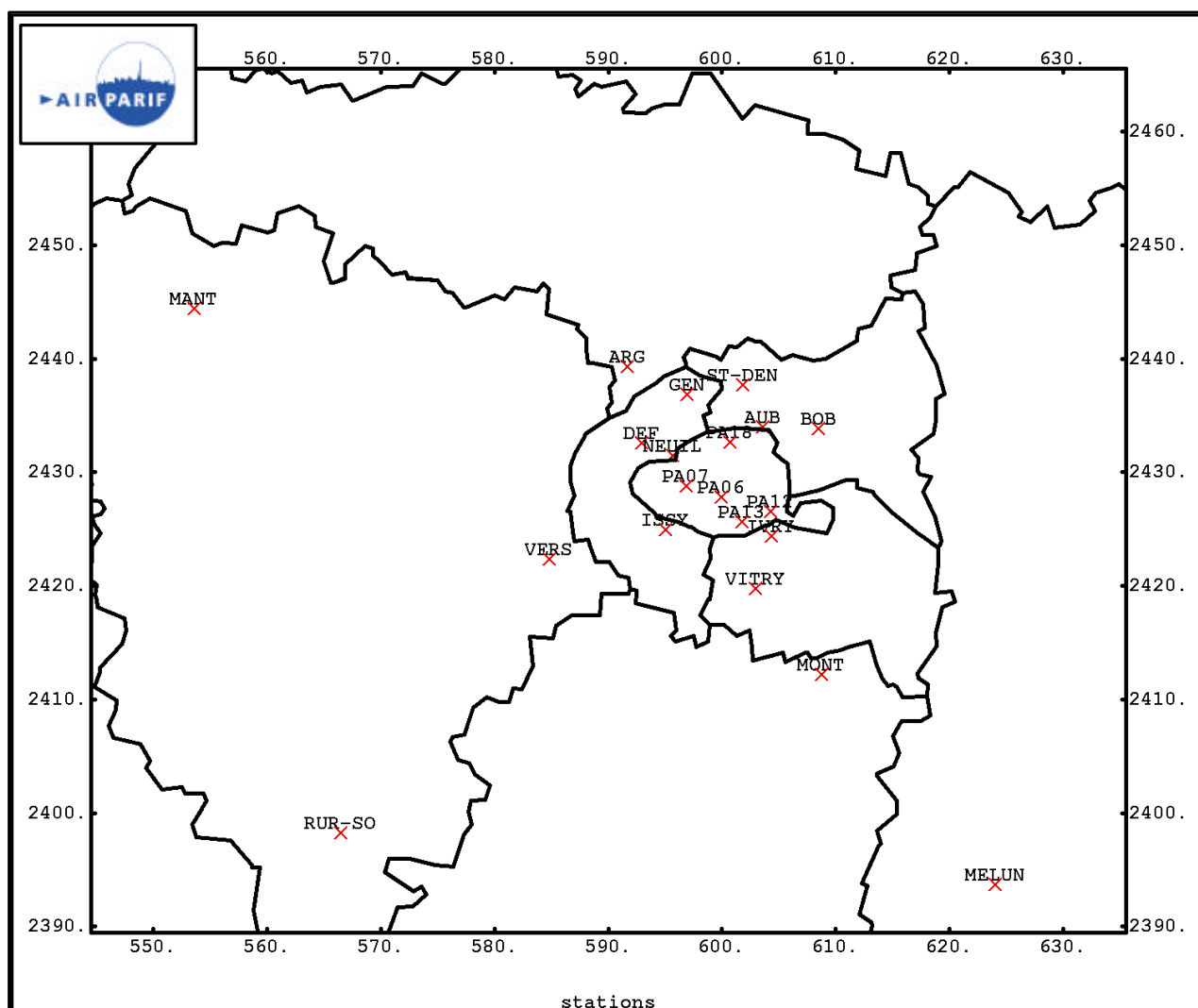
### 3.2. Réalisation des cartographies des concentrations de NOx et de NO2 correspondant à la période 1997-1999

#### 3.2.1. Cartographie des concentrations de NOx

Une relation empirique entre les concentrations moyennes de NOx et les émissions de NOx a pu être déterminée à partir des données des stations du réseau sur la période 1997-1999 et du cadastre d'émissions de NOx obtenu pour l'année 1998 à la résolution de 1 km<sup>2</sup> à l'échelle de la région Ile-de-France.

#### **Présentation des données des stations sur la période 1997-1999**

Les stations prises en compte dans cette étude sont l'ensemble des stations de fond disposant d'une mesure des oxydes d'azote en Ile-de-France depuis au moins le début de l'année 1997. Afin d'élargir le domaine couvert, la station de Mantes-la-Jolie a également été prise en compte bien que celle-ci n'ait été ouverte qu'à la fin 1997. Au total, 20 stations ont été prises en compte. La figure ci-dessous présente la localisation de ces stations au sein de la région Ile-de-France.



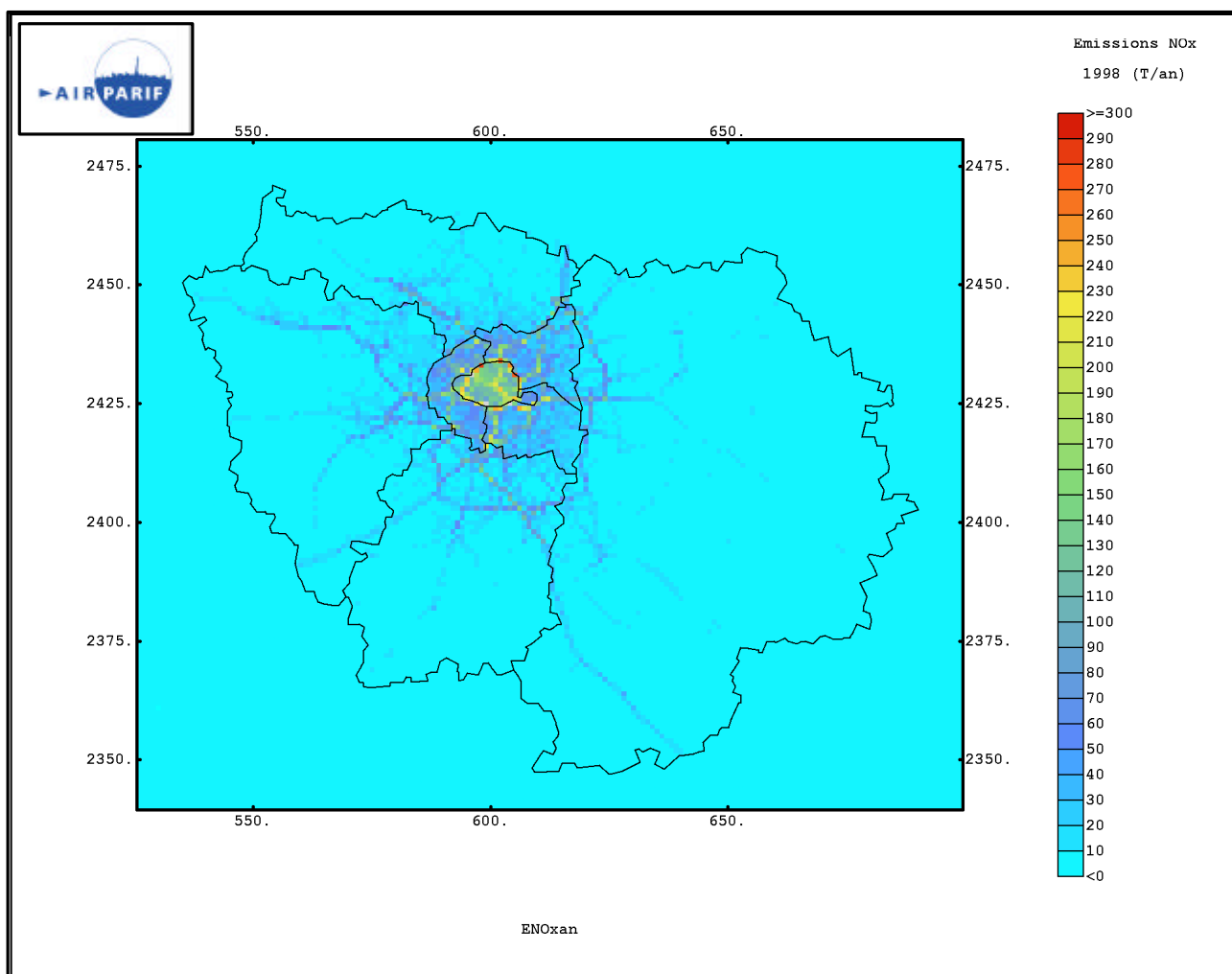
## **Présentation du cadastre des émissions en région Ile-de-France pour l'année 1998**

Le cadastre d'émissions de NO<sub>x</sub> utilisé pour les besoins de cette étude a été produit à l'aide de la chaîne de traitement des émissions disponible au sein du système de modélisation d'Airparif appelé SIMPAR (Système Informatique de Modélisation de la Pollution Atmosphérique à l'échelle de la région Ile-de-France) (cf. Airparif (2000)). L'objectif était de représenter à la résolution de 1 km<sup>2</sup> sur l'ensemble de la région Ile-de-France les émissions « locales » en oxydes d'azote, c'est à dire susceptibles d'avoir un impact direct sur les concentrations de NO<sub>x</sub> dans un certain voisinage.

Les sources d'émissions qui ont été prises en compte dans la réalisation de ce cadastre sont les sources situées à moins de 20 mètres de hauteur par rapport au niveau du sol, c'est à dire principalement le trafic automobile, les sources surfaciques (chauffage domestique) et les petites sources industrielles qui peuvent être considérées comme des sources diffuses. Les grandes sources industrielles dont les hauteurs de cheminée dépassent généralement 20 mètres n'ont délibérément pas été prises en compte, l'impact de ce type de source influençant rarement directement le voisinage immédiat de la source. A un instant donné, la distance d'impact maximal de ce type de source sur les concentrations au niveau du sol est en effet fonction de nombreux facteurs tels que les variables météorologiques et les paramètres thermodynamiques de la source considérée. Ainsi, cette distance varie généralement de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres et peut être généralement déterminée en mettant en œuvre des modèles basés sur l'approche gaussienne. Faute d'étude précise menée jusqu'à ce jour sur l'évaluation des rayons d'influence de chacune des grandes sources ponctuelles de la région Ile-de-France, nous avons préféré dans un premier temps ne pas tenir compte de ces sources dans le cadre de cette étude, afin de ne pas faire porter un poids trop important à ces sources dans les concentrations de NO<sub>x</sub> mesurées dans leur voisinage direct. Il en a été de même des émissions issues du trafic aérien qui se produisent en altitude.

La part des émissions qui se produisent à une hauteur supérieure à 20 mètres du sol (émissions des grandes sources ponctuelles et émissions aériennes en altitude) dans les émissions totales d'oxydes d'azote sur le domaine de dimensions 173 x 140 km<sup>2</sup> qui englobe la région Ile-de-France (domaine ci-dessous) a pu être évaluée à 20,62 % pour l'année 1998 (40677 T pour les émissions à H > 20 m et 197262 T pour les émissions totales sur le domaine).

La cartographie de la page suivante présente le cadastre des émissions de NO<sub>x</sub> produites à une hauteur inférieure à 20 mètres par rapport au niveau du sol, durant l'année 1998.



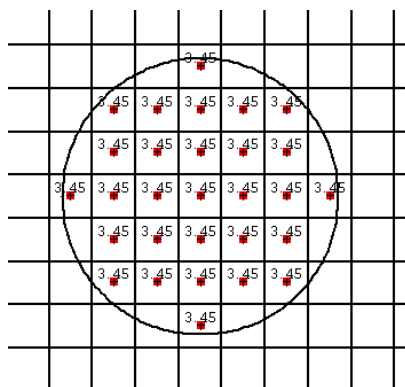
Cadastre des émissions d'oxydes d'azote ( $H < 20$  mètres) pour l'année 1998 à la résolution de 1 km<sup>2</sup>

### Détermination du voisinage à prendre en compte

Nous cherchons à déterminer une relation empirique entre les concentrations de NOx en un point et les émissions de NOx situées dans un certain voisinage autour de ce point.

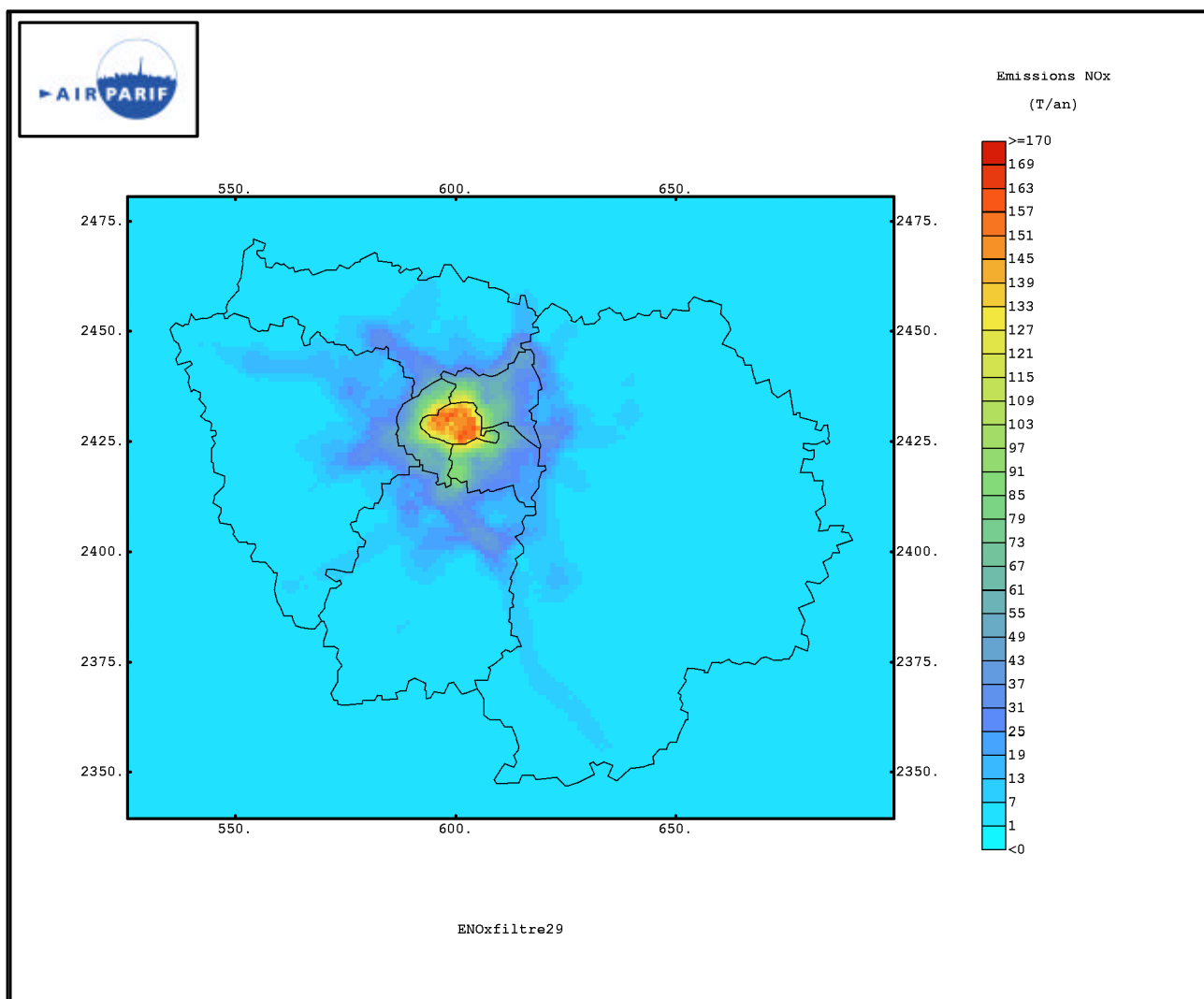
Les données de concentrations dont on dispose sont des données ponctuelles (moyennes aux stations) alors que les données d'émissions sont disponibles sur une grille toute entière, établie au pas de 1 km. Il existe différentes méthodes mathématiques qui permettent de rapprocher une information maillée d'une information ponctuelle. On peut ainsi rapprocher de la valeur ponctuelle, la valeur affectée à la maille à laquelle appartient le point considéré ou une moyenne des valeurs des  $n$  mailles les plus proches du point considéré (méthode d'interpolation par moyenne mobile). Les  $n$  mailles les plus proches constituent dans ce cas ce qu'on appelle le voisinage de la station.

Dans notre cas d'étude, la définition de plusieurs voisinages va permettre d'identifier celui pour lequel la relation entre concentrations et émissions est la meilleure. Nous avons ainsi testé différents voisinages : 1, 9, 25, 29, 37 et 45 km<sup>2</sup>. Suite aux différents tests effectués (cf. annexe), le voisinage pour lequel la relation empirique est la plus satisfaisante (coefficient de corrélation le plus fort) est le voisinage de 29 km<sup>2</sup> (graphique suivant).



Voisinage de 29 km<sup>2</sup> retenu dans le cadre de l'étude  
 (la valeur calculée en chaque centre de maille correspond à l'isobarycentre des valeurs des 29 mailles les plus proches, toutes affectées du même poids : 1/29 soit 3.45 %)

Par application de ce filtre de 29 km<sup>2</sup> sur le cadastre d'émissions résolu au km<sup>2</sup>, on peut ainsi obtenir le cadastre des émissions moyennées dans un voisinage de 29 km<sup>2</sup> pour l'ensemble de l'Ile de France (graphique suivant).



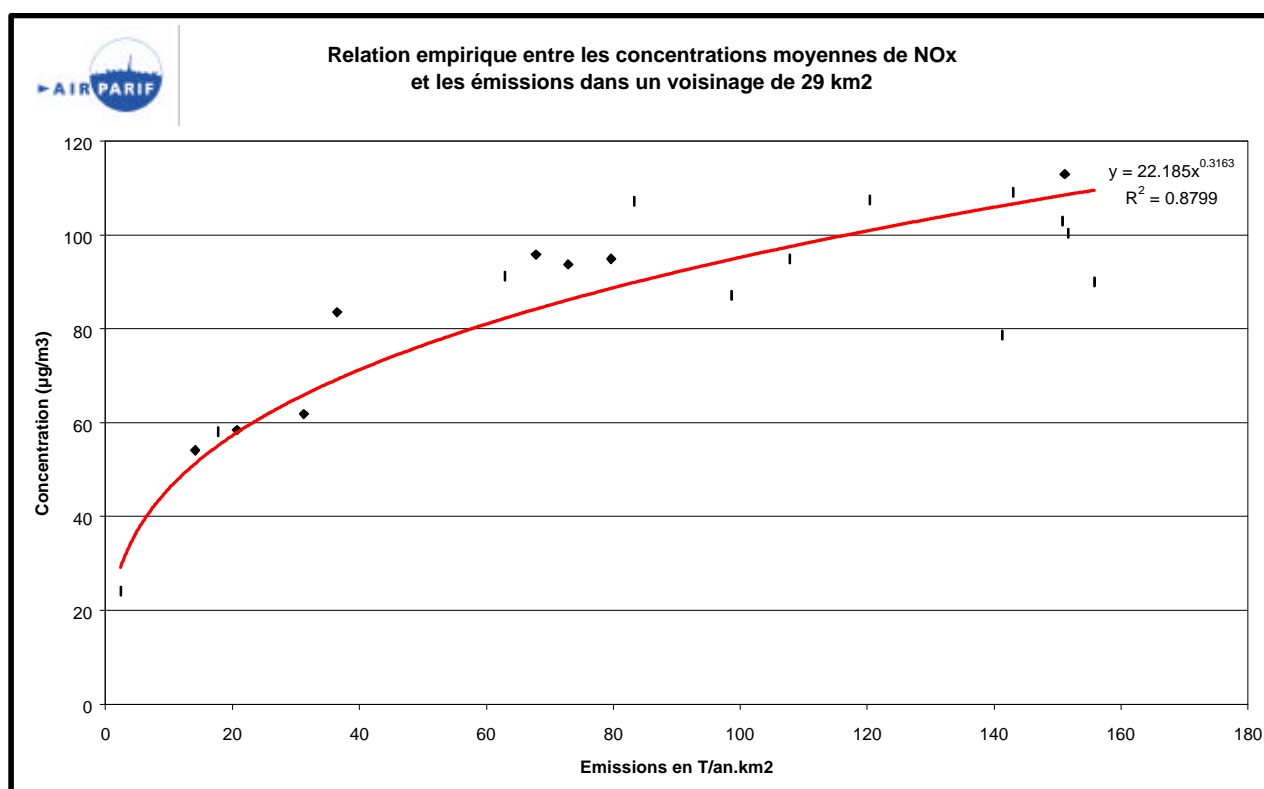
## Détermination de la relation empirique associant concentrations et émissions de NOx en un point

Le graphique qui suit présente la relation empirique que l'on peut alors établir entre concentrations mesurées par les stations du réseau et les émissions moyennées sur un voisinage de 29 km<sup>2</sup> autour des stations.

Il s'agit d'une relation de type « Puissance » qui s'écrit :

$$C_{\text{NOx}} = 22.185 * E_{\text{NOx-29km}^2}^{0.3163}$$

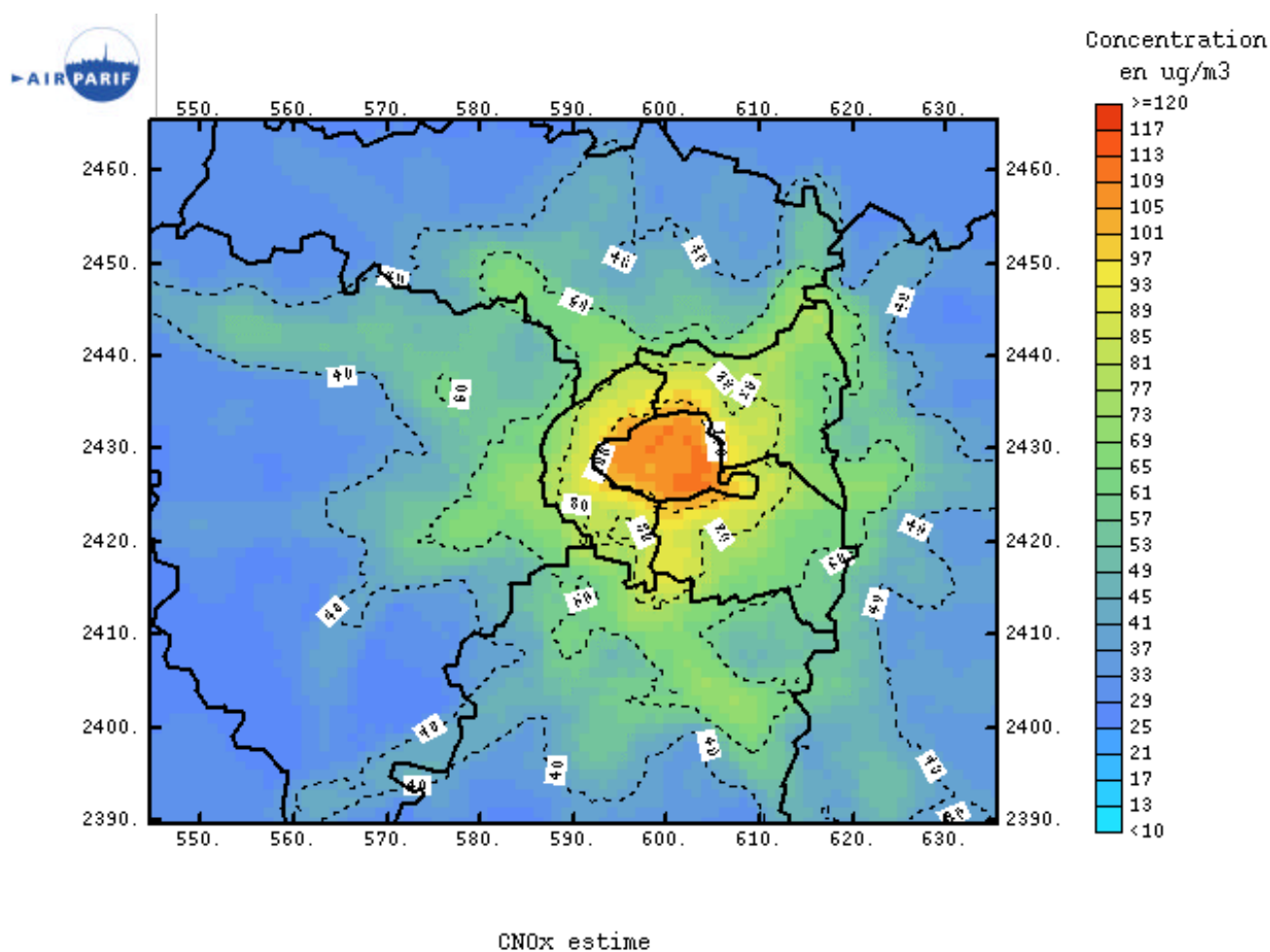
avec  $R^2 = 0.8799$   
avec  $C_{\text{NOx}}$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $E_{\text{NOx-29km}^2}$  en  $\text{T}/\text{an.km}^2$



## Cartographie des concentrations moyennes de NOx estimées pour la période 1997-1999

Connaissant les émissions de NOx sur l'ensemble de l'Ile-de-France (information de type « grille ») et disposant désormais d'une relation reliant les concentrations aux émissions, on peut cartographier les concentrations moyennes de NOx estimées grâce à la relation établie ci-dessus sur la région Ile-de-France.

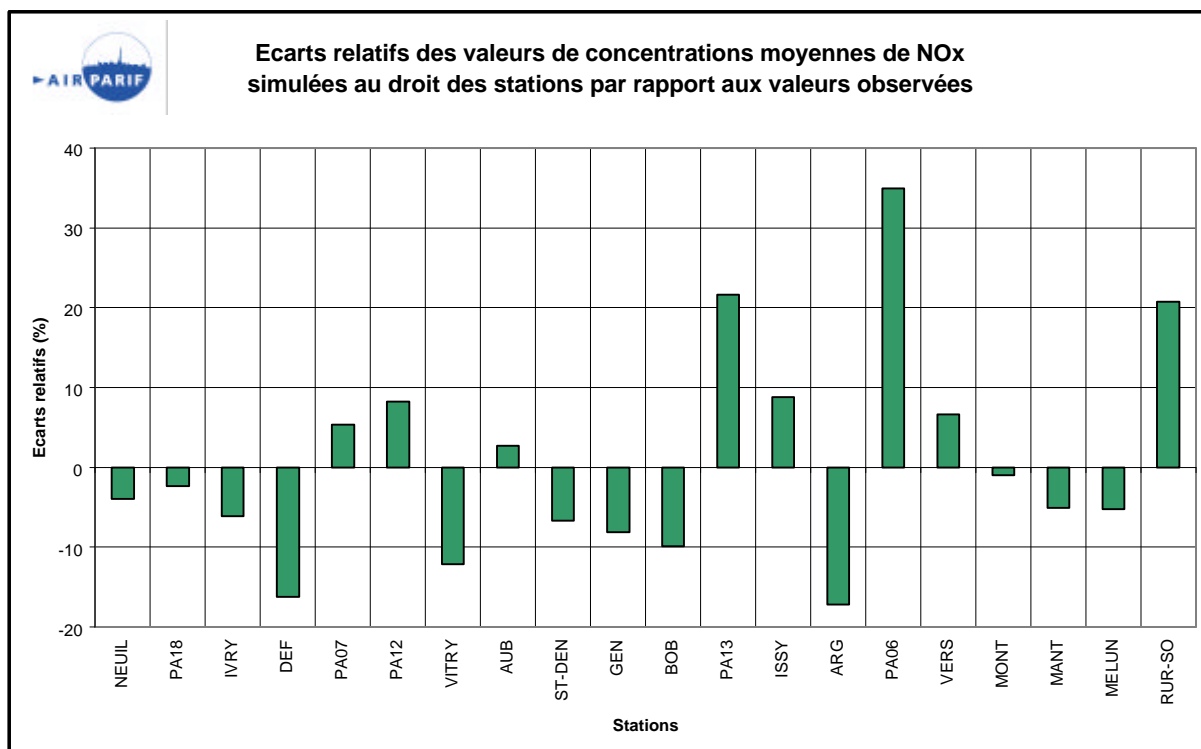
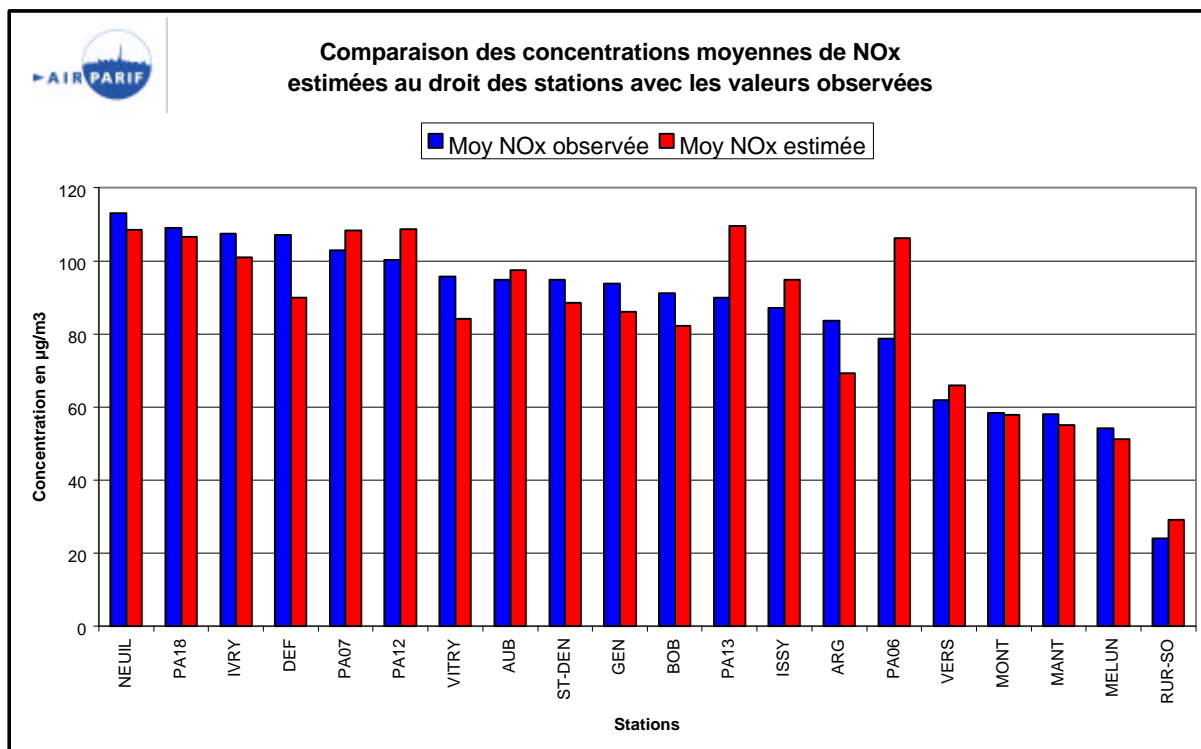
La carte ci-dessous présente les concentrations moyennes de NOx ainsi estimées.



Cette cartographie des concentrations de NOx estimées dans l'environnement reflète bien l'impact de la concentration des émissions dans le cœur dense de l'agglomération parisienne et le rôle joué par les émissions associées aux transports. Les niveaux de NOx au sein du cœur dense de l'agglomération parisienne sont compris entre 80 et 120 µg/m<sup>3</sup> alors que les niveaux en zone rurale sont aux alentours de 30 µg/m<sup>3</sup>.

## Evaluation de l'incertitude des résultats

L'erreur d'estimation a pu être évaluée en comparant les concentrations de NOx estimées par cette méthode au droit des stations de mesure avec les concentrations de NOx observées. Les graphiques suivants présentent les différences et écarts relatifs obtenus.



On constate que l'erreur d'estimation est relativement faible puisque l'écart relatif varie en valeur absolue de 0 à 35 % selon les stations et qu'il est en moyenne de 10 % seulement.

### 3.2.2. Cartographie des concentrations moyennes de NO<sub>2</sub>

#### Détermination de la relation empirique associant concentrations de NO<sub>x</sub> et de NO<sub>2</sub>

La détermination de cette relation repose sur les données expérimentales des stations de mesure d'Airparif.

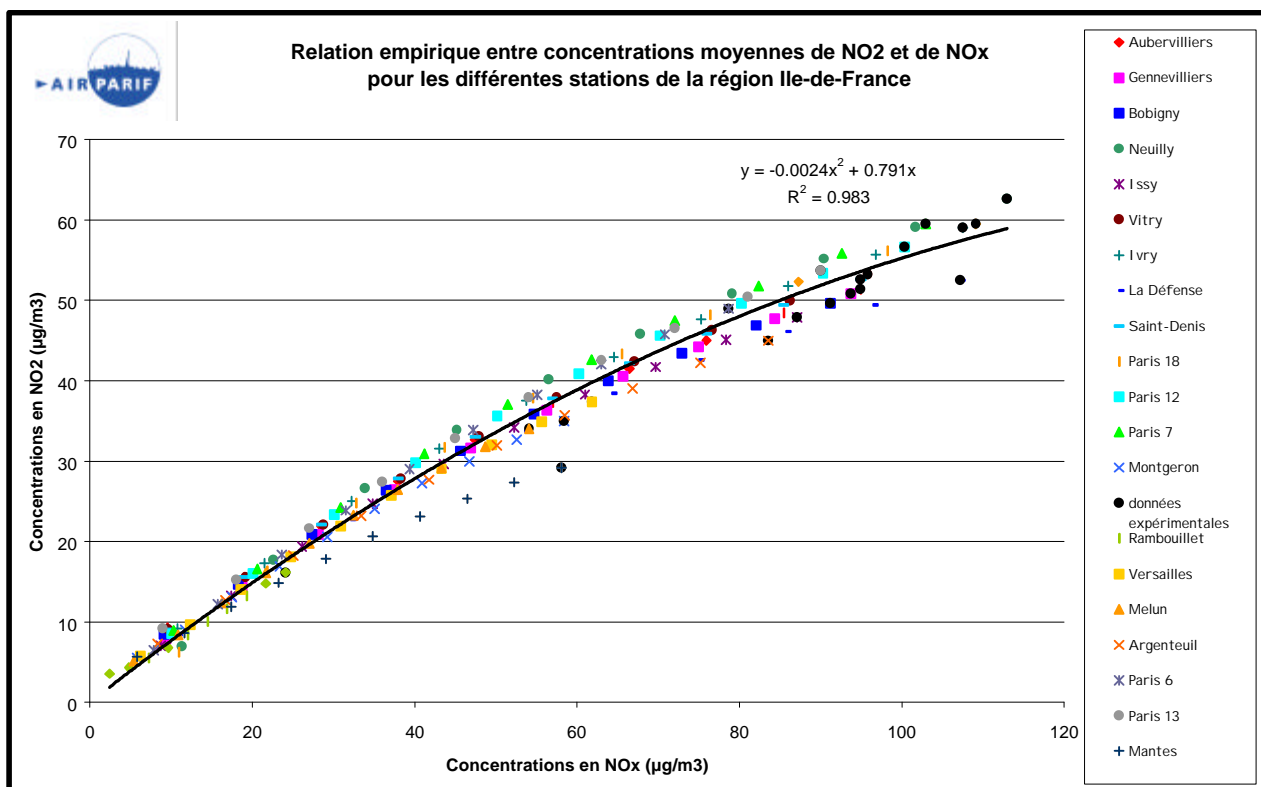
Dans la première partie de l'expertise, nous avons pu déterminer, par station, les pourcentages de réduction des concentrations de NO<sub>x</sub> à obtenir pour respecter les objectifs réglementaires relatifs au dioxyde d'azote. Cette détermination a pu se faire par l'intermédiaire d'une relation statistique (cf méthode A) entre « moyenne NO<sub>2</sub> » et « moyenne NO<sub>x</sub> ».

Via cette relation, on peut calculer, pour chacun des sites, les moyennes annuelles de NO<sub>2</sub> en fonction des moyennes annuelles de NO<sub>x</sub>, pour 9 hypothèses de réduction des concentrations de NO<sub>x</sub> variant tous les 10%. On obtient ainsi un nuage de points (moy<sub>NO<sub>2</sub></sub> estimée ; moy<sub>NO<sub>x</sub></sub> avec réduction) définissant une relation unique entre les concentrations de NO<sub>2</sub> et les concentrations de NO<sub>x</sub> pour chacune des stations. Cette figure (cf. ci-dessous) montre clairement la non-linéarité du problème.

On peut ensuite déterminer la fonction mathématique qui moyenne au mieux les comportements individuels des stations. La relation empirique déterminée est de la forme :

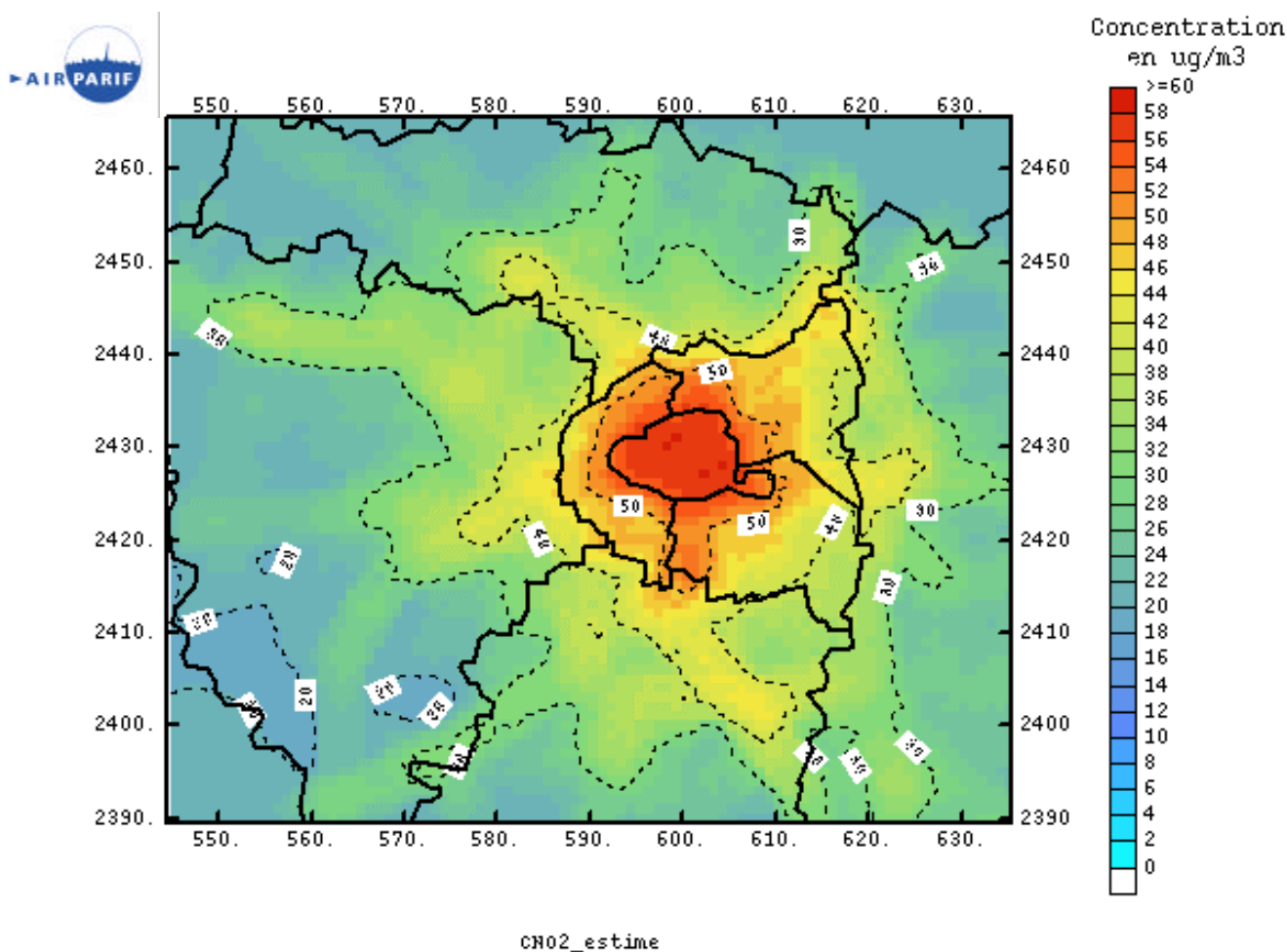
$$C_{NO_2} = -0.0024 \times C_{NO_x}^2 + 0.791 \times C_{NO_x}$$

avec  $R^2 = 0.938$



### Cartographie des concentrations moyennes de NO2 estimées pour la période 1997-1999

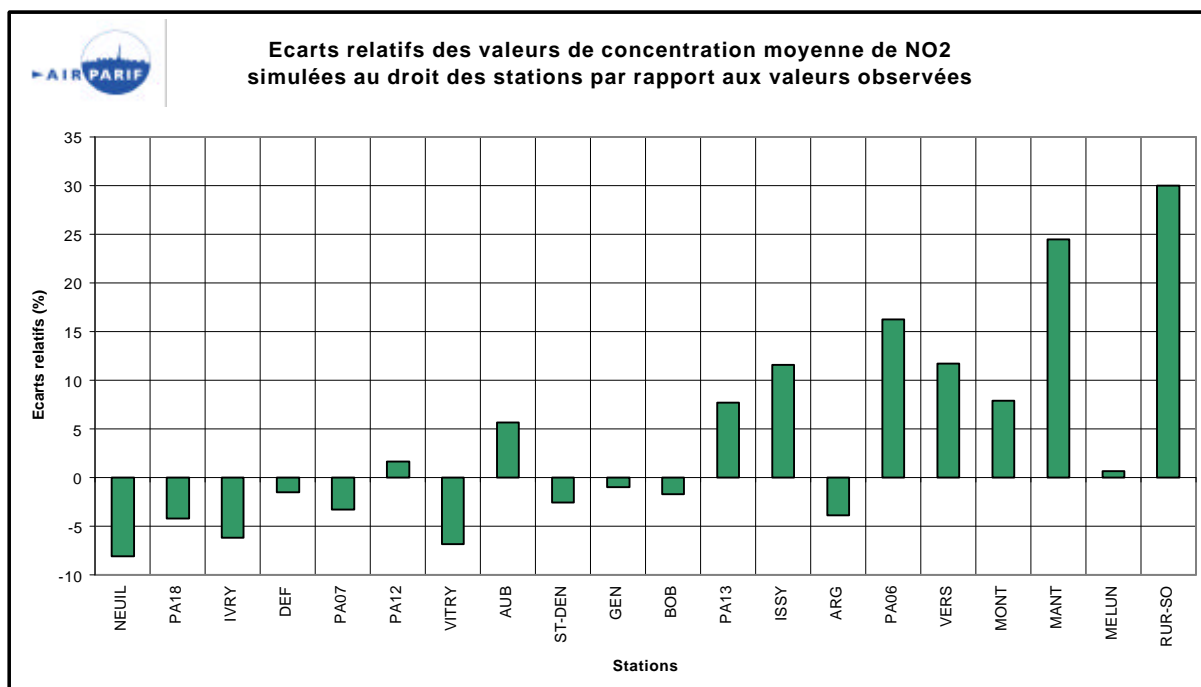
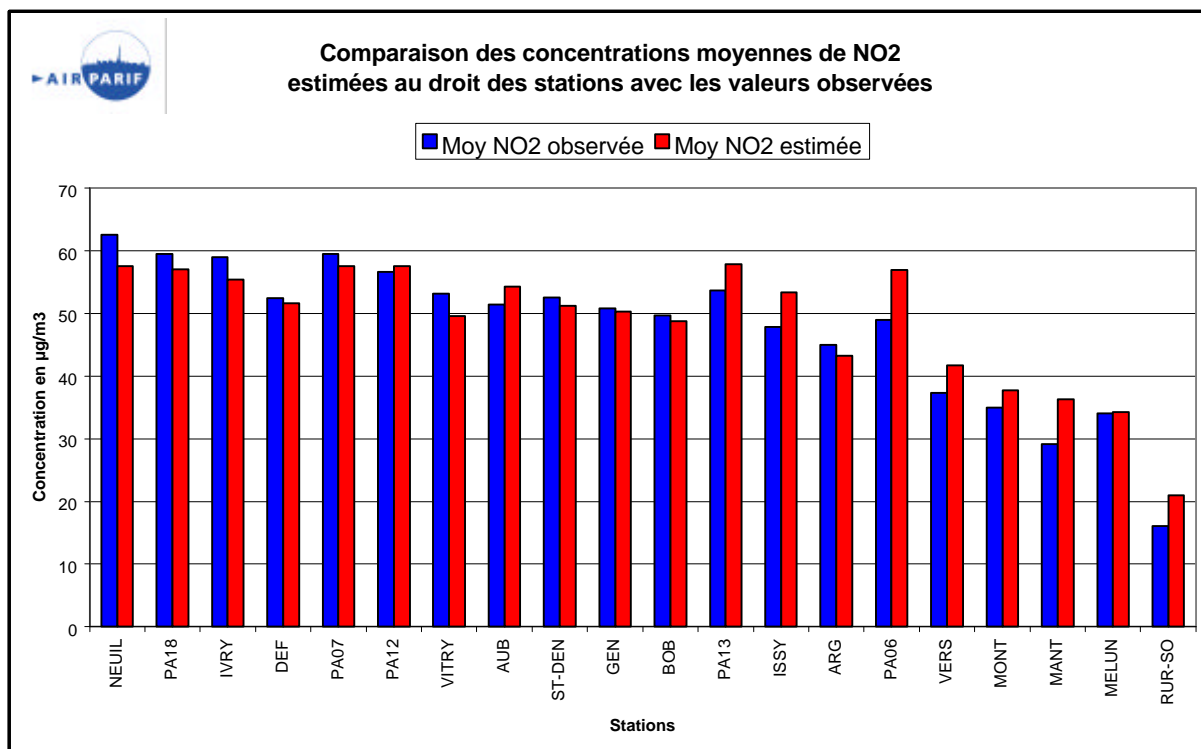
Cette relation déterminée, il est possible de cartographier les concentrations moyennes de NO2 estimées à l'échelle du domaine d'étude retenu (zone agglomérée). L'étape précédente nous a en effet permis de connaître les concentrations moyennes de NOx sur une grille (et non plus en des points). De la même façon, le logiciel Isatis va permettre de cartographier le NO2 à partir de la fonction mathématique décrite ci-dessus et de la variable « concentration moyenne de NOx » qui est désormais connue en tout point du domaine. La carte ci-dessous représente donc les concentrations moyennes de NO2 que nous avons pu estimer de cette manière sur le domaine aggloméré.



On constate que la ville de Paris et la proche banlieue parisienne sont situées au-dessus des valeurs de référence 2005 et 2010 et que l'ensemble du cœur dense de l'agglomération parisienne (zone interne à l'A86) ne respecte pas à l'heure actuelle la valeur de référence pour 2010.

## Evaluation de l'incertitude des résultats

L'erreur d'estimation a pu être évaluée là encore en comparant les concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> estimées par cette méthode au droit des stations de mesure avec les concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> observées sur ces stations. Les graphiques suivants présentent les différences et écarts relatifs obtenus.



On constate que l'erreur d'estimation est relativement faible puisque l'écart relatif varie en valeur absolue de 0 à 30 % selon les stations et qu'il est en moyenne de 8 % seulement.

### 3.2.3. Cartographie du percentile 50 de NO2

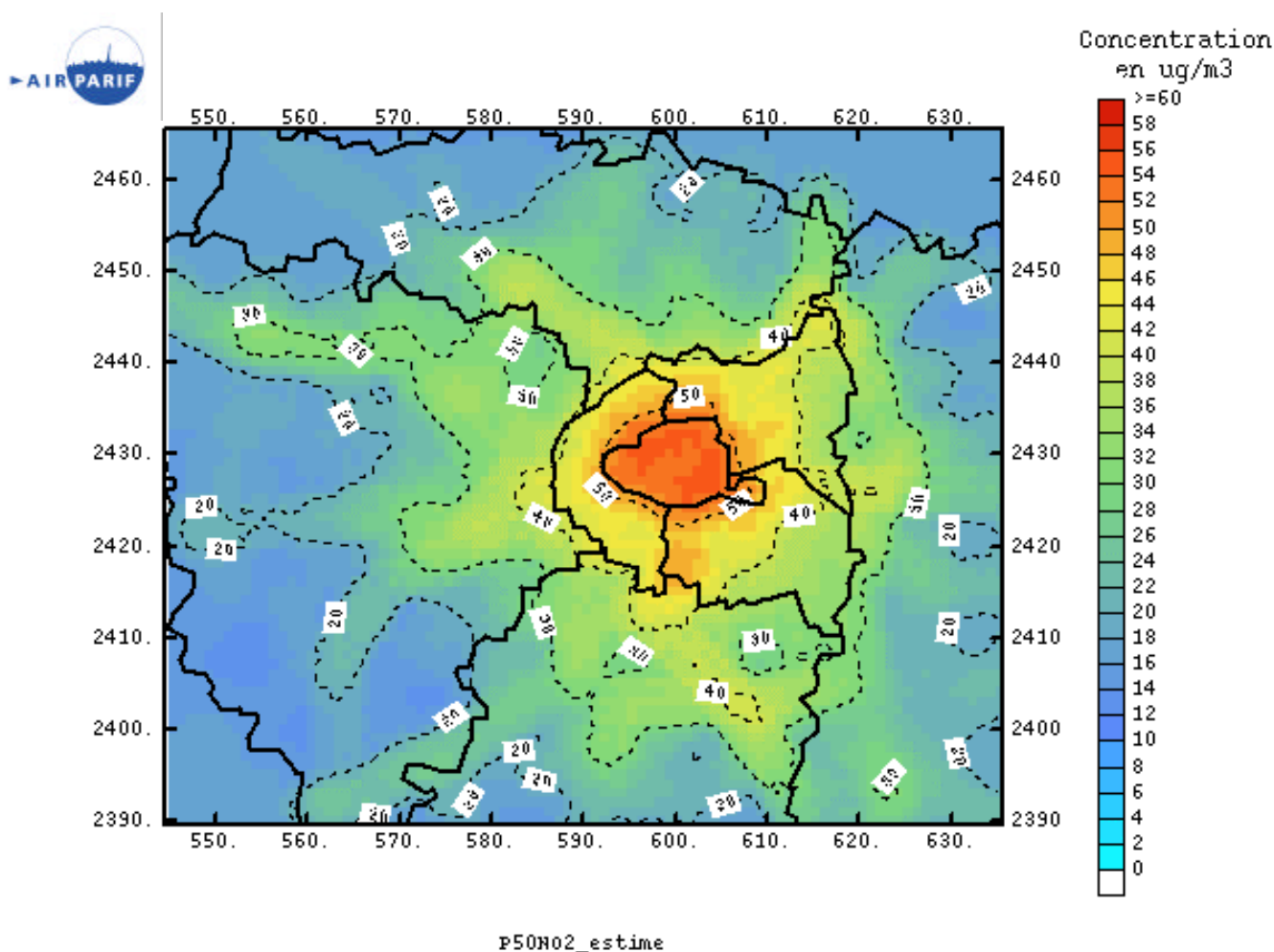
#### Rappel de la relation linéaire utilisée :

Une relation linéaire a pu être établie entre les concentrations moyennes et le percentile 50 de NO2 en un point, à partir des observations faites sur les stations de fond du réseau. Cette relation a déjà été présentée au paragraphe 2.2.1 (p. 8). Nous la rappelons ici :

$$P50 = 1.0421 \times Moy - 5.8414 \text{ avec } R^2 = 0.9963$$

#### Cartographie du percentile 50 de NO2 estimé pour la période 1997-1999

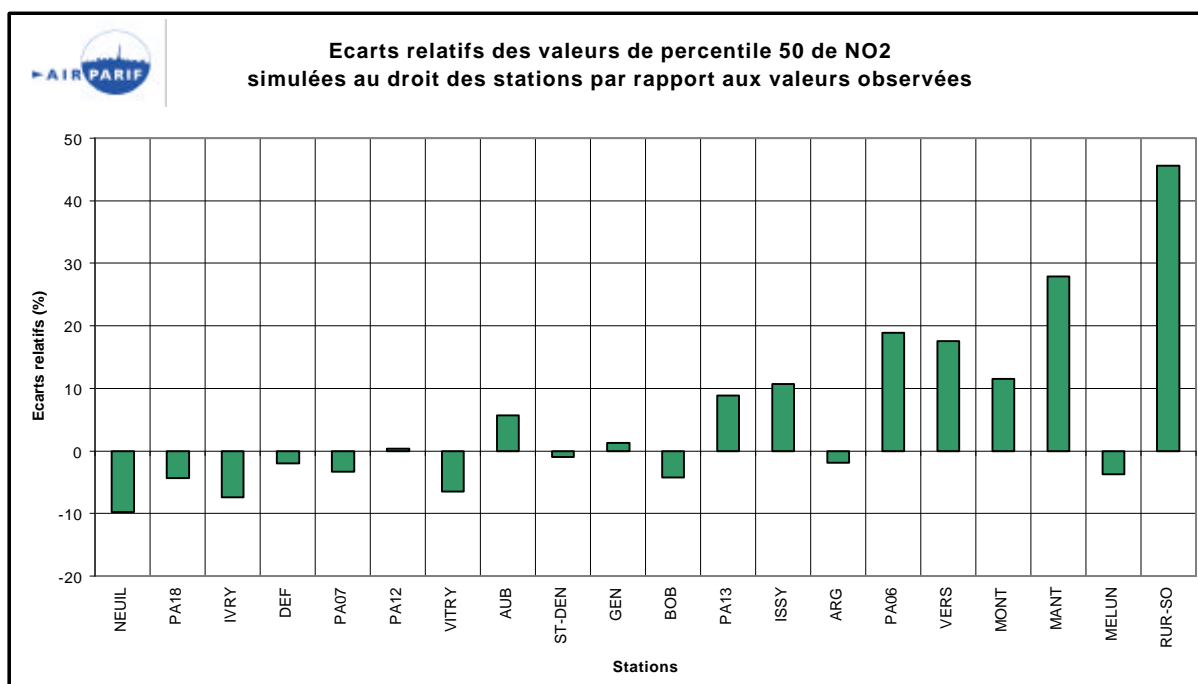
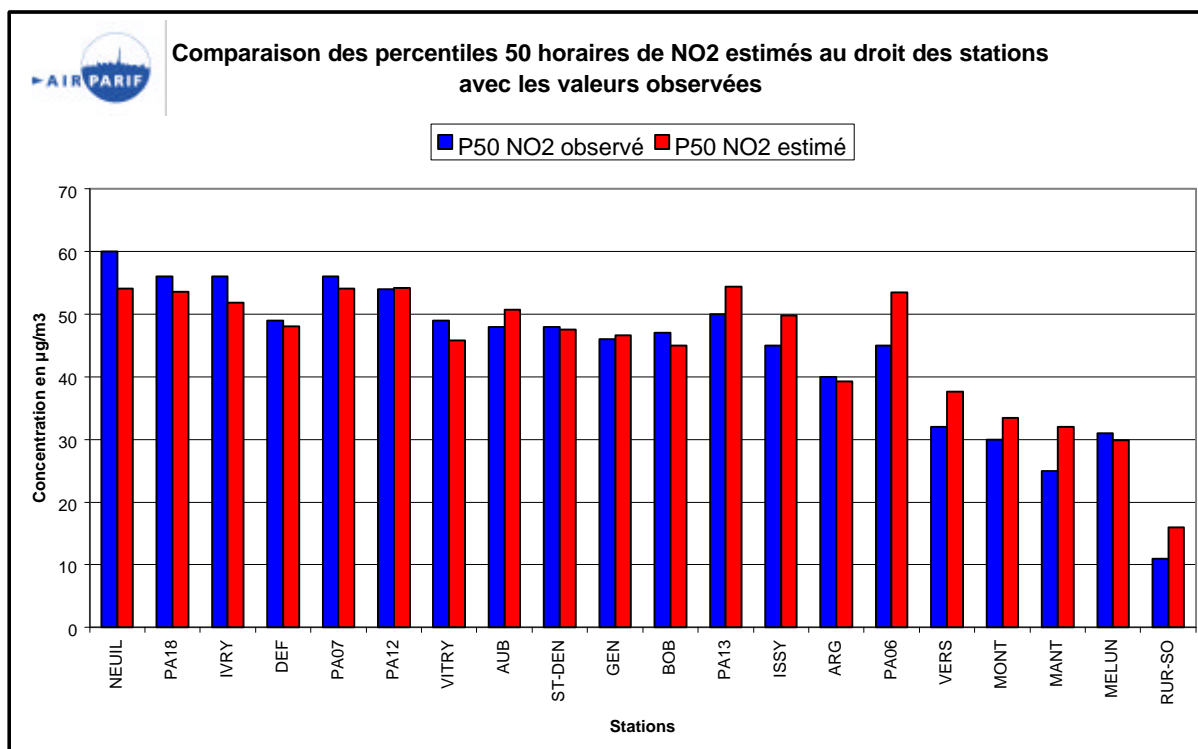
La cartographie du percentile 50 de NO2 se déduit de celle de la moyenne de NO2 par application de la relation précédente en tout point du domaine.



On constate que la ville de Paris et la proche banlieue parisienne sont situées au-dessus de l'objectif de qualité actuel et que le reste de l'agglomération parisienne respecte cet objectif.

## Evaluation de l'incertitude des résultats

L'erreur d'estimation a pu être évaluée en comparant les concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> estimées par cette méthode au droit des stations de mesure avec les concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> observées sur ces stations. Les graphiques suivants présentent les différences et écarts relatifs obtenus.



On constate que l'erreur d'estimation est relativement faible puisque l'écart relatif varie en valeur absolue de 0 à 46 % selon les stations et qu'il est en moyenne de 10 % seulement.

### 3.3. Recherche des pourcentages de réduction des émissions à appliquer de façon homogène sur l'Ile-de-France en vue du respect des valeurs de référence relatives au NO2 :

#### 3.3.1. Principe :

Nous allons ici essayer de déterminer les pourcentages de réduction des émissions d'oxydes d'azote qu'il est nécessaire d'appliquer de façon **homogène** en l'Ile-de-France pour obtenir le respect sur l'ensemble de la région de chacune des 3 valeurs de référence.

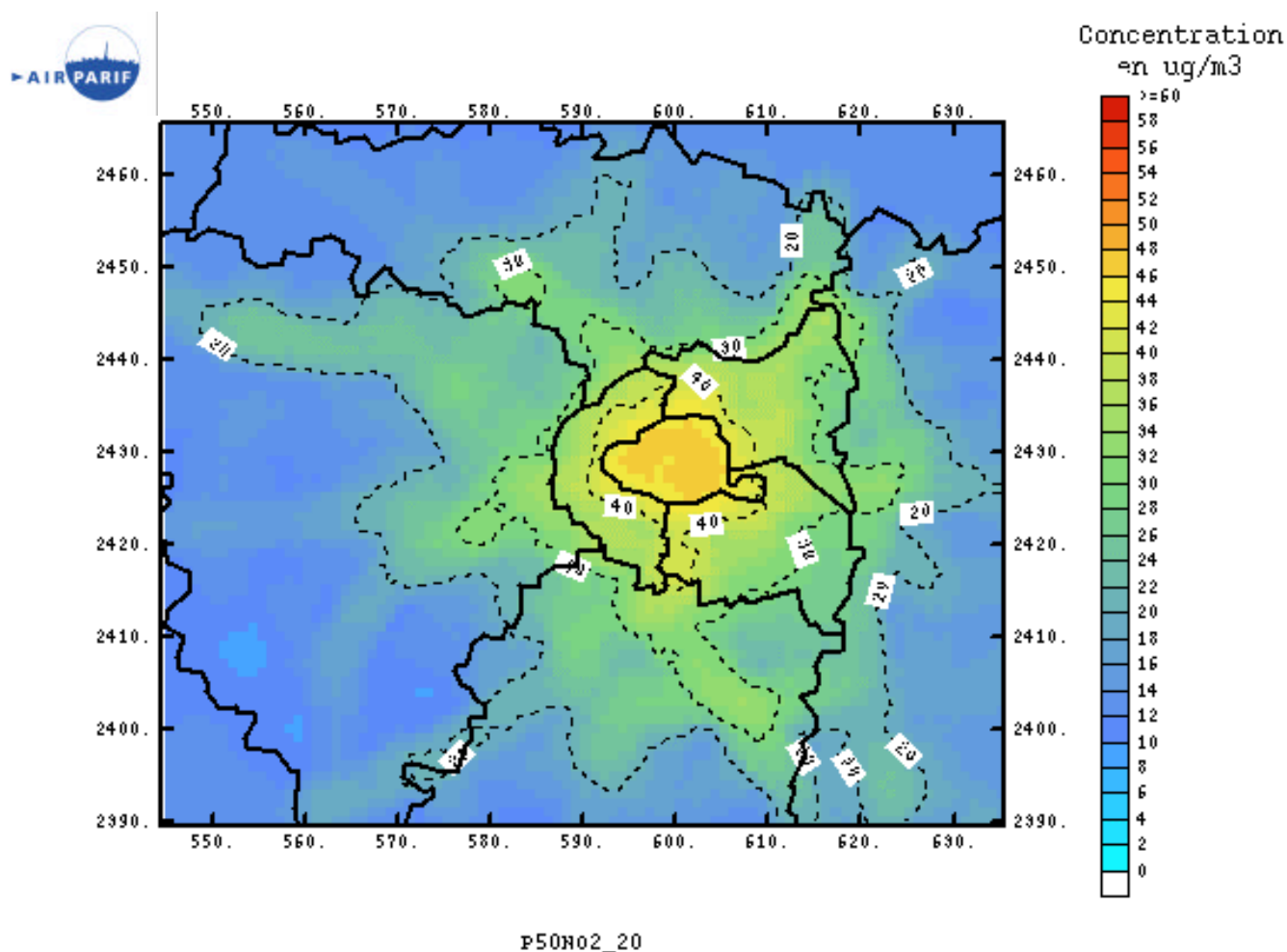
Le passage aux cartographies des concentrations moyennes de NO2 estimées pour un certain % de réduction des émissions implique au préalable, le recours à l'estimation des concentrations d'oxydes d'azote après réduction des émissions. Une subtilité réside dans cet exercice : si l'on a précédemment établi une relation empirique reliant concentrations et émissions d'oxydes d'azote, elle ne peut cependant être utilisée pour le calcul des concentrations correspondant à une modification des émissions au niveau global de la région Ile-de-France. La relation établie vise en effet à déterminer les conséquences en un point donné d'une modification locale des émissions de NOx sur les niveaux de concentrations de NOx susceptibles d'être observés en ce même point. Une des hypothèses de cette relation est que l'on ne change pas le contexte général, c'est à dire on ne modifie pas les émissions ailleurs que dans le voisinage immédiat du point auquel on s'intéresse. En effet, les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  de la relation empirique du type  $CNOx = \alpha ENOx^\beta$  qui a été déterminée plus haut (cf. page 32) dépendent a priori du contexte général de la région Ile-de-France en terme d'émissions. Cette relation est donc susceptible de varier avec le temps en fonction des modifications apportées aux émissions. Ainsi donc, si l'on cherche à estimer l'effet sur les concentrations de NOx d'une réduction homogène des émissions de NOx à l'échelle de l'Ile-de-France, il vaut mieux utiliser la logique physique qui veut que les NOx soient considérés comme passifs. Par conséquent, si on réduit de façon homogène d'un pourcentage  $x$  les émissions d'oxydes d'azote, alors les concentrations d'oxydes d'azote seront globalement réduites du même pourcentage.

La détermination des concentrations moyennes de NO2 induites par une diminution  $\alpha$  des émissions d'oxydes d'azote se déduisent ensuite des concentrations moyennes de NOx affectées de la même diminution  $\alpha$ , par application en tout point de la relation déterminée plus haut (cf. page 35).

Les trois cartes présentées dans les pages suivantes ont ainsi pu être élaborées pour 20, 30 et 50% de réduction des concentrations moyennes de NOx, en suivant la méthodologie décrite précédemment.

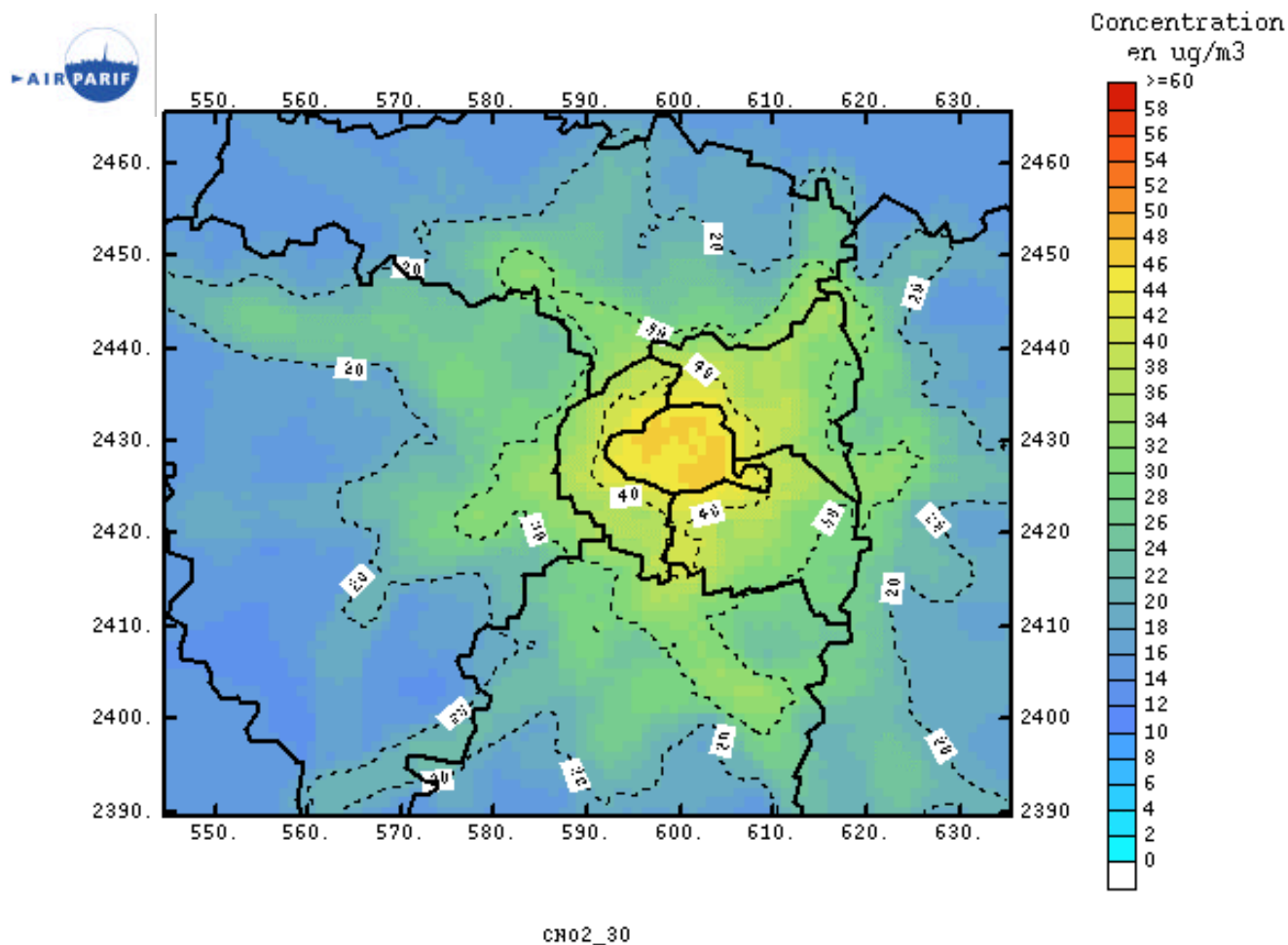
**3.3.2. Cartographie du percentile 50 de NO<sub>2</sub> estimé pour un pourcentage de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> de 20 % : respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO<sub>2</sub> < 50 µg/m<sup>3</sup>)**

La carte ci-dessous présente les concentrations de NO<sub>2</sub> (en percentile 50) dans l'hypothèse d'une réduction des émissions de NO<sub>x</sub> de 20 % par rapport au niveau de 1998 : l'étude montre que ce taux permet de satisfaire à des concentrations partout inférieures à la valeur de référence actuellement fixé à 50 µg/m<sup>3</sup> (en percentile 50).



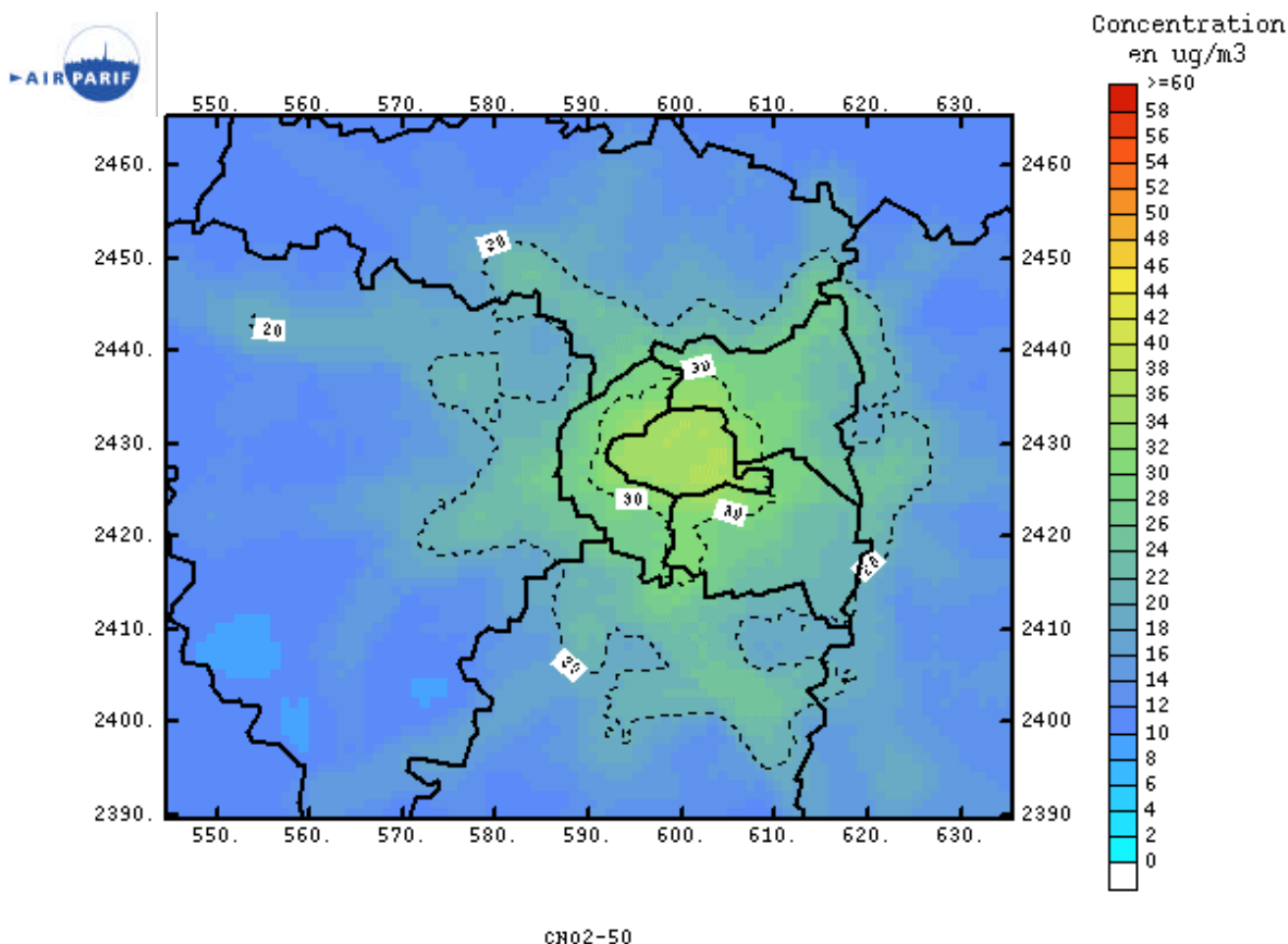
**3.3.3. Cartographie des concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> estimées pour un pourcentage de réduction des NO<sub>x</sub> de 30 % : respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO<sub>2</sub> < 50 µg/m<sup>3</sup>)**

La carte ci-dessous présente les concentrations de NO<sub>2</sub> (en moyenne annuelle) obtenues dans l'hypothèse d'une réduction des émissions de NO<sub>x</sub> de 30 % par rapport au niveau de 1998 : l'étude montre que ce taux permet de satisfaire à des concentrations partout inférieures à la valeur de référence relative à l'échéance 2005 et s'établissant à 50 µg/m<sup>3</sup> (en moyenne annuelle).



**3.3.4. Cartographie des concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> estimées pour un pourcentage de réduction des NO<sub>x</sub> de 50 % : respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO<sub>2</sub> < 40 µg/m<sup>3</sup>)**

La carte ci-dessous présente les concentrations de NO<sub>2</sub> (en moyenne annuelle) obtenues dans l'hypothèse d'une réduction des émissions de NO<sub>x</sub> de 50 % par rapport au niveau de 1998 : l'étude montre que ce taux permet de satisfaire à des concentrations partout inférieures à la valeur de référence relative à l'échéance 2010 et s'établissant à 40 µg/m<sup>3</sup> (en moyenne annuelle).



#### 4. EVALUATION DES IMPLICATIONS DE LA STRATEGIE DE REDUCTION DES NOX SUR LES CONCENTRATIONS EN OZONE

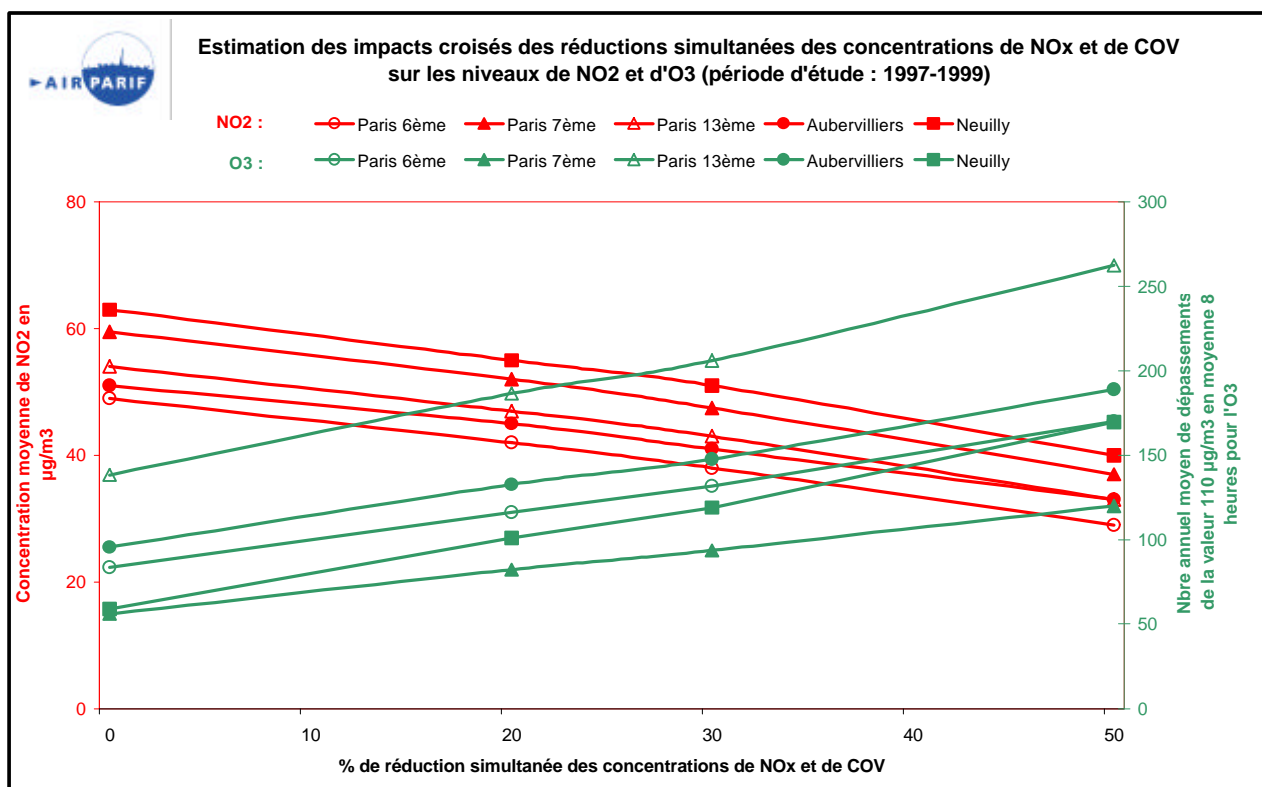
Compte tenu de l'impact croisé des réductions de NOx et de COV non seulement sur le NO2 mais aussi sur l'ozone, nous avons cherché à nous interroger également sur l'impact potentiel des réductions envisagées sur les niveaux d'ozone susceptibles d'être observés au sein et sous le panache de l'agglomération parisienne.

##### 4.1. Implications des stratégies de réduction des NOx sur les concentrations en ozone au sein de l'agglomération parisienne :

La méthode analytique n°2 a été mise en œuvre pour déterminer les impacts sur les niveaux d'ozone des efforts de réduction des NOx envisagés en vue du respect des valeurs de référence pour le NO2.

Il convient ici de rappeler que la méthode analytique n°2, tout comme les approches statistiques, postule implicitement que la réduction de x% des NOx s'accompagne d'une réduction proportionnelle des COV. En effet, la variabilité des concentrations de NOx et de COV dans l'atmosphère peut être supposée étroitement liée puisque dépendant essentiellement de la dispersion.

Le graphique ci-dessous présente les effets croisés des réductions simultanées de NOx et de COV de 20, 30 et 50% sur la moyenne de NO2 et sur le nombre annuel moyen de dépassements de la valeur 110 µg/m3 en moyenne sur 8 heures pour l'ozone, tels qu'ils ont pu être évalués à partir des données de la période 1997-1999, pour 5 sites de l'agglomération parisienne.



On voit qu'une réduction simultanée des concentrations de NOx et de COV de 50 % s'accompagnerait d'une augmentation des concentrations d'ozone dans le cœur dense de l'agglomération parisienne (zone globalement située à l'intérieur du périmètre délimité par l'A86, cf. PROA Ile-de-France). Ainsi, le nombre d'heures de dépassement de la valeur 110 µg/m<sup>3</sup> en moyenne 8 heures serait multipliée par un facteur 2 environ sur les sites urbains de l'agglomération parisienne. Un nombre de dépassements pouvant aller en moyenne de 120 à 260 heures environ par an selon les sites serait ainsi estimé, amenant ces sites à se rapprocher du comportement actuel de sites urbains plus éloignés du centre de Paris (ex : Montgeron - 150 heures de dépassement par an en moyenne sur la période 1997/1999) voire même de sites périurbains (ex : Mantes-la-Jolie - 185 heures de dépassement par an en moyenne sur la période 1998/1999).

#### **4.2. Implications des stratégies de réduction des NOx sur les concentrations en ozone sous le panache de l'agglomération parisienne :**

Les approches mises en œuvre dans le cadre de cette étude ne permettent pas de répondre à la question des implications des stratégies de réduction des NOx sur les concentrations en ozone pour les zones situées sous le vent de l'agglomération parisienne. Néanmoins, un certain nombre d'études de sensibilité de la pollution photochimique aux réductions d'émissions en région parisienne sont menées actuellement, que ce soit dans le cadre du programme ESQUIF ou dans le cadre du programme PRIMEQUAL-PREDIT. Bien que les résultats de ces études ne soient pas encore publiés, un certain consensus semble se dégager, du moins sur le plan qualitatif. Pour les jours de forte pollution photochimique, une réduction simultanée des émissions de NOx et de COV conduirait en général à une diminution d'ozone dans le panache, là où la concentration d'ozone est maximale. Néanmoins, cette réduction des concentrations maximales d'ozone resterait relativement faible (inférieure à 20 %) même pour des réductions simultanées importantes des précurseurs NOx et COV (de l'ordre de 50 %).

## 5. CONCLUSION

---

Cette étude réalisée par Airparif, avec la contribution scientifique de deux experts, Robert Vautard (Laboratoire de Météorologie Dynamique) et Matthias Beekmann (Service d'Aéronomie) permet d'apporter des premiers éléments de réponse à la question cruciale de la répercussion des efforts de réduction des émissions d'oxydes d'azote sur les niveaux ambiants de dioxyde d'azote et d'ozone.

L'expertise qui a été conduite repose à la fois sur une analyse approfondie des données de surveillance du réseau de mesure pour la période 1997-1999 et sur la mise en œuvre d'approches analytiques visant à expliciter de manière simplifiée les relations non-linéaires existant entre concentrations de NOx et de NO2.

La première partie de l'étude a permis de définir, station par station, les pourcentages de réduction des concentrations en NOx qu'il serait souhaitable d'atteindre pour respecter les valeurs de référence relatives au NO2. On a utilisé pour cela une approche empirique qui s'appuie sur une idée originale développée par Richard Derwent du Meteorological Office. La validité des résultats produits par cette méthode a pu être vérifiée par la mise en œuvre parallèle de deux autres approches de nature statistique et de deux approches analytiques développées par Robert Vautard et Matthias Beekmann. La plupart des sites de fond et la totalité des sites de proximité automobile situés dans l'agglomération parisienne dépassent à l'heure actuelle les valeurs de référence pour le NO2, notamment l'objectif 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3). Les résultats obtenus ont montré que les efforts de réduction des concentrations de NOx à mener, par rapport aux niveaux observés en 1997-99, en vue du respect des valeurs de référence sont très importants. Ainsi, pour certains sites de fond situés dans Paris intra-muros (ex : Paris 7<sup>ème</sup> ou Paris 18<sup>ème</sup>) en ou très proche banlieue parisienne (ex : Neuilly-sur-Seine, Ivry-sur-Seine), les efforts nécessaires pour le respect des objectifs 2010, 2005 et actuel atteignent respectivement les 50-60 %, 30-35 % et 20-30 %. Quant aux sites de proximité, les efforts de réduction estimés sont colossaux et ce quel que soit le site : 70-80 % de réduction nécessaire pour l'objectif 2010, 50-70 % pour l'objectif 2005 et encore 40-70 % pour l'objectif actuel.

La seconde partie de l'étude s'est attachée à représenter les résultats obtenus dans le cadre de la première partie de l'étude sous forme cartographique à l'échelle de l'agglomération parisienne. Un premier volet a permis de représenter les concentrations de NOx estimées pour la période 1997-1999 à partir du cadastre des émissions de l'année 1998. Par application en tout point du domaine de la relation non-linéaire existant entre concentrations de NO2 et concentrations de NOx mise en lumière dans la première partie de l'étude, les cartographies des niveaux estimés de NO2 (moyenne et percentile 50) ont ensuite été rendues possibles. Partant alors de l'hypothèse que les NOx peuvent être considérés comme passifs et que par conséquent une réduction sur l'ensemble de l'Ile-de-France d'un facteur x % des émissions de NOx se traduit par une diminution des concentrations de NOx par un même facteur, il fut ensuite facile de représenter les concentrations attendues en NO2 correspondant à un effort de réduction de x % des émissions de NOx de manière homogène sur l'ensemble du domaine. Les cartographies associées respectivement aux intensités de réduction de 20, 30 et 50 % des émissions de NOx par rapport aux émissions estimées de 1998 montrent le respect en tout point du domaine des valeurs de référence actuelle, 2005 et 2010, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus dans la première partie sur les stations de fond.

La dernière partie de l'étude essaye de dégager quelques éléments concernant l'impact potentiel des réductions de NOx (et simultanément des COV) envisagées sur les niveaux d'ozone, que ce soit au sein de l'agglomération parisienne ou plus loin sous le panache de l'agglomération. La baisse des niveaux de NO2 s'accompagnera vraisemblablement d'une hausse des concentrations moyennes d'ozone au sein de l'agglomération parisienne. En grande couronne, sous le panache de l'agglomération parisienne, les

niveaux d'ozone devraient quand à eux diminuer légèrement, du moins pour les jours de forte pollution photochimique.

Ces résultats laissent entrevoir que les réductions d'émissions de NOx attendues à l'horizon 2005 (-35% par rapport à la situation de 1994, ce qui correspond à -22% par rapport à la situation de 1998 si l'on fait l'hypothèse d'une distribution égale des réductions sur les 11 ans) permettront peut-être d'atteindre l'objectif 2005 sur les stations de fond mais qu'elles ne seront certainement pas suffisantes pour respecter les valeurs de référence 2010 en situation de fond et encore moins en situation de proximité automobile. Pour atteindre les objectifs, il faudrait, en sus de l'intensification des mesures de réductions des émissions, baisser également les concentrations d'ozone de fond, c'est-à-dire de l'ozone apporté par les masses d'air en provenance d'autres régions, françaises ou européennes. La mise en œuvre des méthodes analytiques ont en effet permis de montrer que, bien souvent, les concentrations en NO2 étaient plus sensibles à une diminution des concentrations d'Ox de fond qu'à une diminution des concentrations de NOx locales. Qui plus est, la baisse des concentrations d'ozone de fond ne peut agir que favorablement également sur les niveaux d'ozone observés en Ile-de-France et venir ainsi contrebalancer l'effet négatif de l'augmentation des teneurs en ozone en milieu urbain due à la diminution simultanée des niveaux de NOx et de COV. On voit dès lors que le problème dépasse largement l'échelle de l'agglomération parisienne puisque la diminution des niveaux d'Ox de fond ne peut se faire que par un renforcement des stratégies de réduction des émissions à l'échelle nationale, voire européenne.

## REFERENCES

---

Airparif (1999), *Evaluation de l'exposition globale de la population francilienne à la pollution atmosphérique*, volet d'étude n°1.

Airparif (2000), *Méthodologie de réalisation d'un inventaire d'émissions au sein du système Simpar*, rapport interne.

Beekmann (2000), *Description statistique et analytique de la relation entre concentrations de dioxyde d'azote et émissions d'oxydes d'azote en Ile-de-France*, étude réalisée pour le compte de la DRI RE Ile-de-France, convention n°2000-237-001.

Derwent R G and D R Middleton (1996), *An empirical Function for the Ratio NO<sub>2</sub> : NO<sub>x</sub>*, Clean Air, Vol. 26, No.3/4.

DRI RE Ile-de-France (1999), *Qualité de l'air en Ile-de-France : le plan régional*.

Géovariances (1997), *Isatis Documentation*.

SEIPH (1999), *SEIPH Air Quality in London 1997*.

Vautard (2000), *Etude des équilibres photochimiques en vue de réductions d'émissions pour le respect des valeurs de référence de qualité de l'air pour le dioxyde d'azote*, étude réalisée pour le compte de la DRI RE Ile-de-France, convention n°2000-237-002.

# **ANNEXE 1 :**

**Présentation des approches statistiques  
complémentaires (méthodes B et C)**

## Présentation de l'approche statistique (Méthode B) :

(1b) Les trois premières étapes sont identiques à celles décrites dans la méthode A, à savoir les points (1a), (2a) et (3a).

(2b) De la même façon que l'on a calculé  $Moy_i(NO_2)$ , on calcule  $Moy_i(NO_x)$ .

(3b) Point par point, il est donc possible d'obtenir le tracé de la courbe :

$$Moy_i(NO_2) = f(Moy_i(NO_x))$$

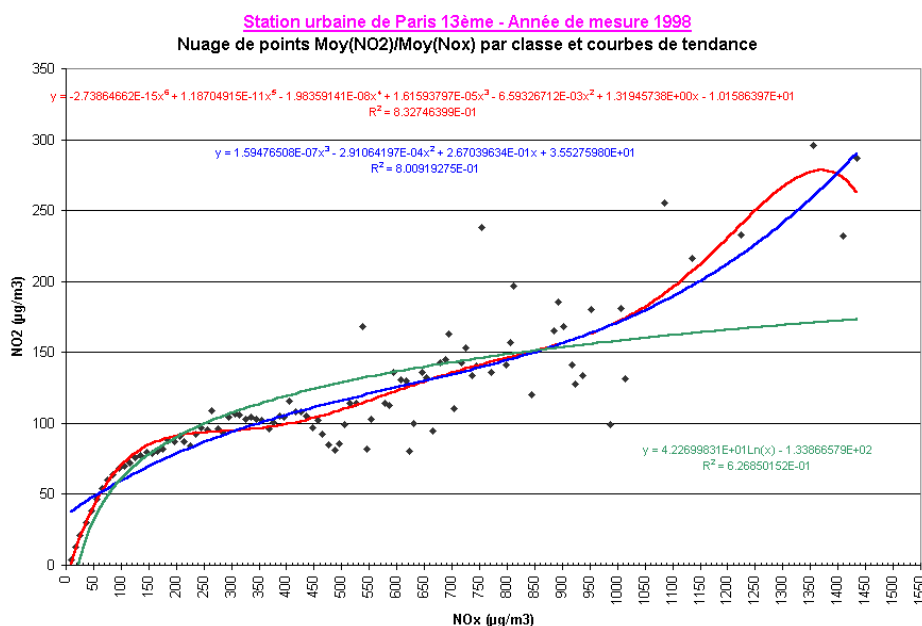
(4b) L'enjeu est alors d'en estimer l'équation par l'intermédiaire de fonctions mathématiques classiques telles les fonctions polynomiales ou encore logarithmiques.

(5b) L'utilisation de la relation du type  $y = f(x)$  ainsi déterminée va permettre de calculer des valeurs de NO<sub>2</sub> « estimées » pour chacune des valeurs expérimentales de NO<sub>x</sub>. On peut ensuite calculer la moyenne des valeurs de NO<sub>2</sub> calculées.

(6b) La comparaison "mesure/calcul" entre cette dernière et la moyenne expérimentale est alors possible.

(7b) Enfin, toujours par l'intermédiaire de la fonction choisie, si l'on injecte dans l'équation les valeurs de NO<sub>x</sub> affectées d'un coefficient réducteur  $x$ , on va ainsi pouvoir en déduire les valeurs de NO<sub>2</sub> et donc la moyenne de ces dernières correspondant à la réduction affectée aux concentrations de NO<sub>x</sub> initiales. On peut vérifier dès lors si la moyenne annuelle de NO<sub>2</sub> ainsi obtenue par le calcul, respecte ou non l'objectif de qualité visé.

Le graphe présenté ci-dessous illustre cette seconde approche sur l'exemple du site urbain du 13<sup>ème</sup> arrondissement de Paris pour l'année de mesure 1998.



## Présentation de l'approche statistique (Méthode C) :

Cette troisième et dernière méthode d'analyse statistique, repose sur une unique résolution graphique.

**(1c)** Soit une station de mesure S pour laquelle on dispose des séries de données horaires de NO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> pour une période entière de mesure.

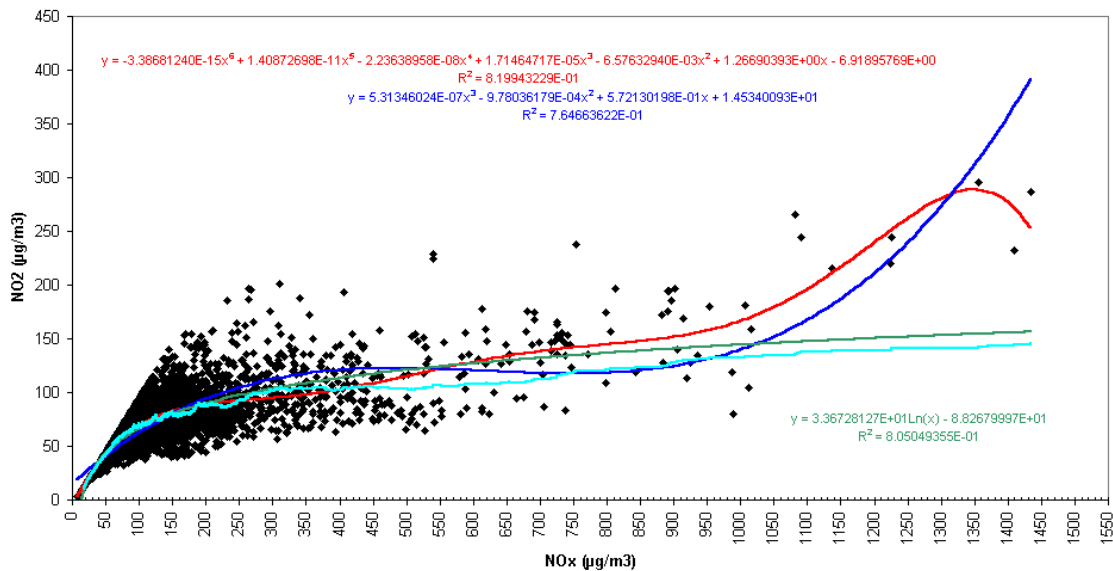
Ces données vont être traitées ici dans leur forme "brute", c'est à dire que l'on trace le nuage de points 'NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub>'.

**(2c)** A l'instar de la méthode B décrite précédemment, le but est ici d'identifier la fonction mathématique représentant au mieux le nuage de points tracé. Les fonctions testées sont du type polynomial ou logarithmique.

**(3c)** La suite du traitement effectué devient dès lors semblable à ce que nous avons précédemment explicité dans les rubriques 5b à 7b.

Le graphique de la page suivante explicite cette dernière approche. Le site considéré est inchangé ; il s'agit toujours du site urbain du 13<sup>ème</sup> arrondissement de Paris et la période de mesure reste l'année 1998.

**Station urbaine de Paris 13ème - Année de mesure 1998**  
**Nuage de points NO<sub>2</sub> - No<sub>x</sub>, courbes de tendance**  
**et courbe représentant la moyenne mobile sur 100 périodes (en bleu clair)**



## **ANNEXE 2 :**

**Confrontation des résultats  
des 3 méthodes statistiques (A, B, C)**

## Premières investigations des modèles statistiques

Dans un premier temps, nous avons testé chacune des trois méthodes de calcul sur l'ensemble des stations de Paris et de la petite couronne appartenant au réseau, et ce pour deux années de mesure distinctes : 1994 et 1998. Cette sélection regroupe un ensemble de 21 stations soit 7 sites trafic et 14 sites urbains.

La mise en œuvre des différents calculs a reposé sur l'utilisation d'une macro de calcul élaborée par Airparif. Le programme ainsi développé reprend toutes les étapes de calcul nécessaires et décrites précédemment. Concernant les méthodes B et C, les fonctions mathématiques les plus satisfaisantes retenues sont deux fonctions polynomiales (degré 6 et degré 3) et la fonction logarithmique.

Pour un jeu de données complet (soit une année de mesure sur un site), il a permis :

- d'obtenir, via chacune des trois méthodes statistiques, le calcul de la moyenne NO<sub>2</sub> avant application d'une quelconque réduction sur les concentrations de NO<sub>x</sub> ;
- d'en vérifier la cohérence par un calcul de l'écart (exprimé en %) entre moyenne calculée et moyenne expérimentale ;
- d'identifier, en ce qui concerne les méthodes B et C, les fonctions mathématiques les plus satisfaisantes, c'est à dire celles pour lesquelles l'écart "mesure-calcul" est le plus faible ;
- de tester différents coefficients réducteurs qui seraient à appliquer aux concentrations expérimentales de NO<sub>x</sub> en vue du respect des objectifs de qualité visé, à savoir une valeur de X µg/m<sup>3</sup> en moyenne annuelle. Dans la phase de test des méthodes statistiques, nous nous sommes limités au respect du seuil 2010 (moyenne annuelle = 40 µg/m<sup>3</sup>).
- d'identifier, selon chaque méthode, le pourcentage de réduction qu'il serait nécessaire d'appliquer aux concentrations de NO<sub>x</sub> afin que la condition " $Moy(NO_2) \leq X \mu g / m^3$ " soit respectée.
- de générer les graphiques associés à chacune des méthodes de calcul testées.

A titre illustratif, les pages qui suivent présentent les résultats comparés des trois méthodes pour quelques stations de l'agglomération parisienne.

Les résultats que nous avons obtenus lors de cette série de tests se sont avérés très satisfaisants et cohérents. Dès lors, la méthode A a été retenue pour être appliquée plus largement, celle-ci étant plus facile à mettre en œuvre et présentant l'avantage, contrairement aux méthodes B et C, de conserver la moyenne expérimentale de NO<sub>2</sub>, lorsqu'aucun % de réduction n'est apporté aux concentrations de NO<sub>x</sub>.

# Site de la Porte d'Auteuil - Année 1994

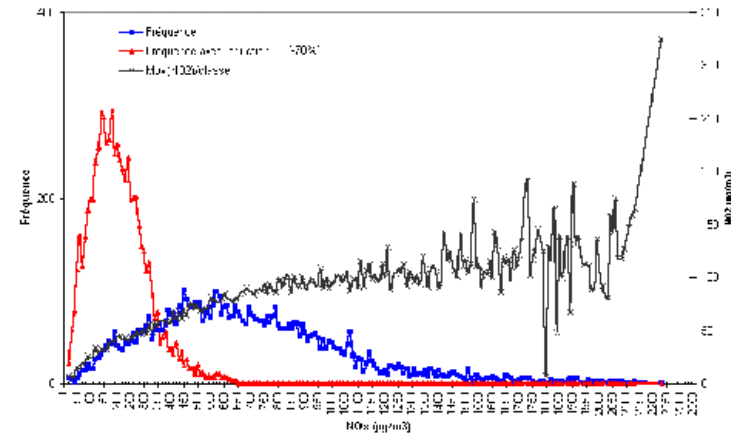
Estimations du % de réduction des NOx nécessaires  
au respect de la valeur de référence 2010 :

Méthode A :            69 %

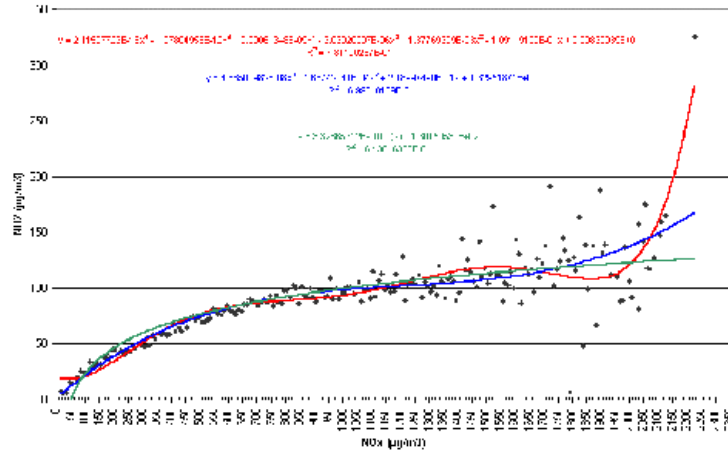
Méthode B :            66 %

Méthode C :            69 %

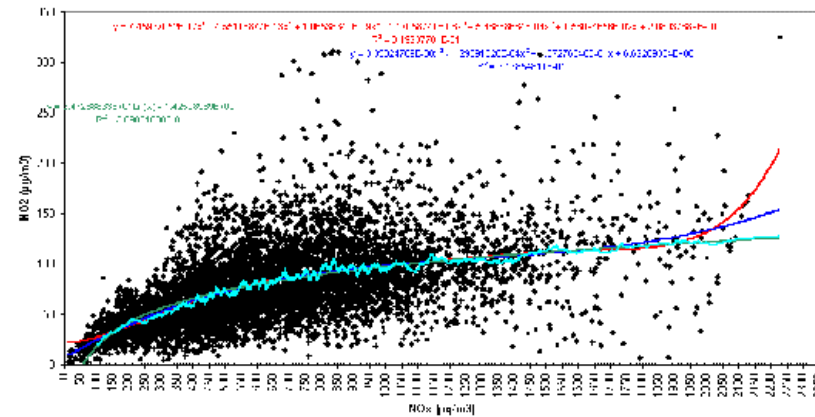
**A** Station trafic de la porte d'Auteuil - Année de mesure 1994  
Distribution des fréquences des mesures horaires de NOx et  
Moyenne de NO2 par classe de NOx



**B** Station trafic de la porte d'Auteuil - Année de mesure 1994  
Nuage de points Moy(NO2)/Moy(NOx) par classe et courbes de tendance



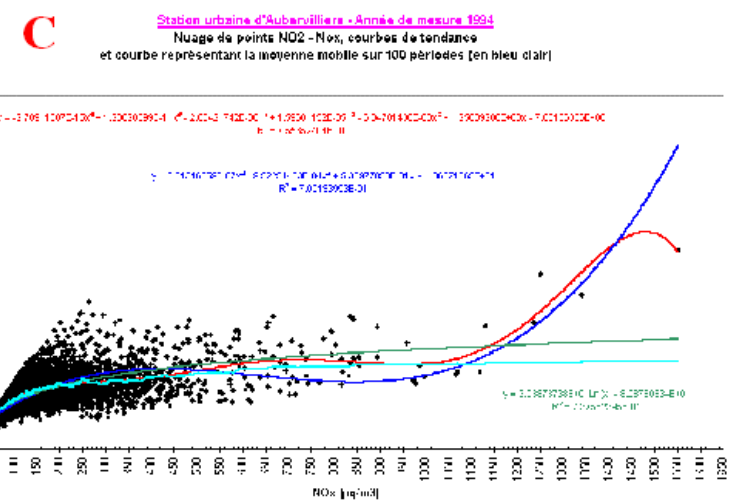
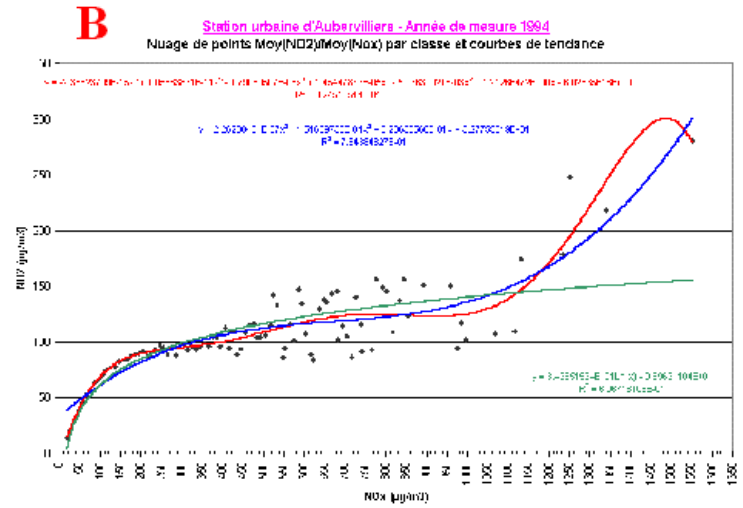
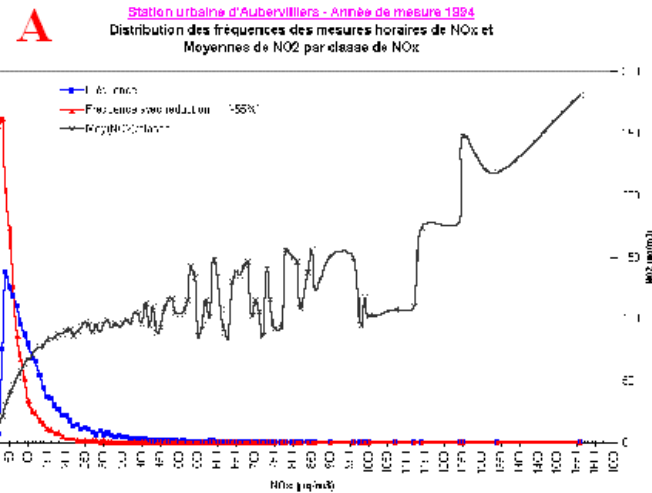
**C** Station trafic de la porte d'Auteuil - Année de mesure 1994  
Nuage de points NO2 - Nox, courbes de tendance  
et courbe représentant la moyenne mobile sur 100 périodes (en bleu clair)



# Site d'Aubervilliers- Année 1994

**Estimations du % de réduction des NOx nécessaires au respect de la valeur de référence 2010 :**

- Méthode A : 52 %
- Méthode B : 51 %
- Méthode C : 51 %



# Site de Paris 7ème - Année 1994

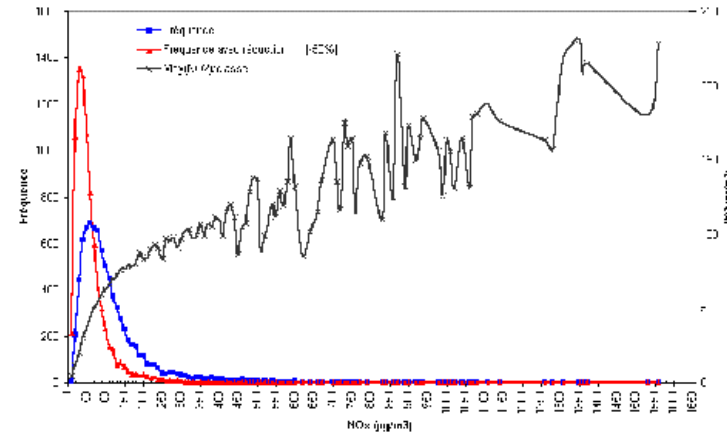
Estimations du % de réduction des NOx nécessaires  
au respect de la valeur de référence 2010 :

Méthode A :            47 %

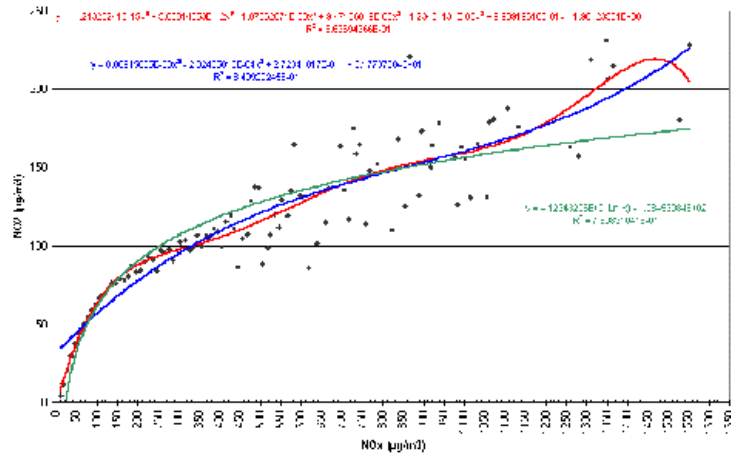
Méthode B :            44 %

Méthode C :            46 %

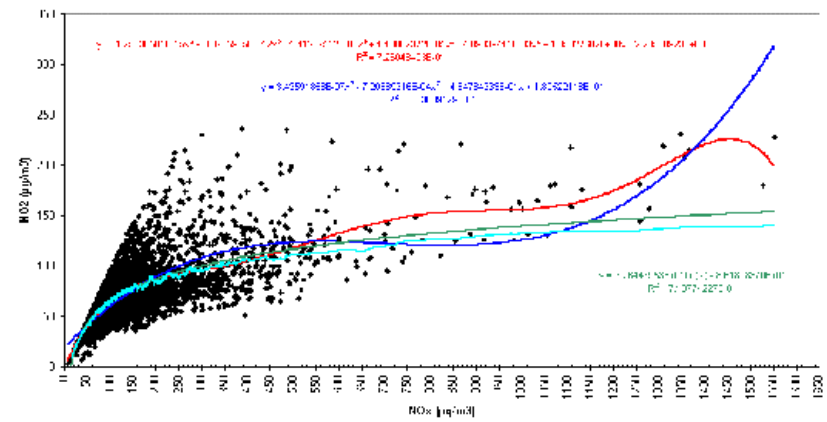
**A** Station urbaine de Paris 7ème - Année de mesure 1994  
Distribution des fréquences des mesures horaires de NOx et Moyennes de NO2 par classe de NOx



**B** Station urbaine de Paris 7ème - Année de mesure 1994  
Nuage de points Moy(NO2)/Moy(NOx) par classe et courbes de tendance



**C** Station urbaine de Paris 7ème - Année de mesure 1994  
Nuage de points NO2 - Nox, courbes de tendance et courbe représentant la moyenne mobile sur 100 périodes (en bleu clair)



# Site de Paris 18ème - Année 1994

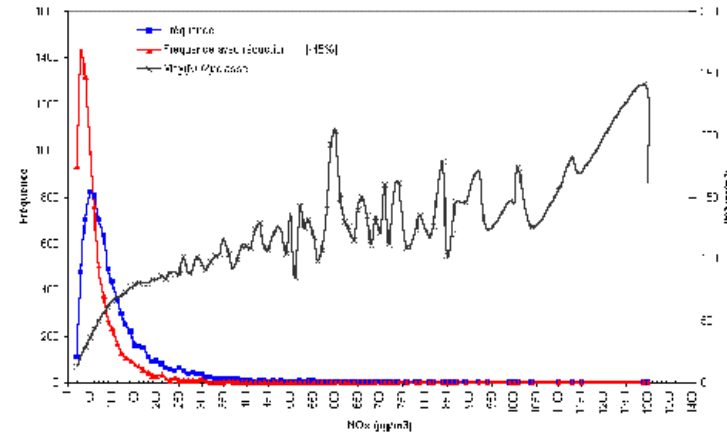
Estimations du % de réduction des NOx nécessaires  
au respect de la valeur de référence 2010 :

Méthode A :            44 %

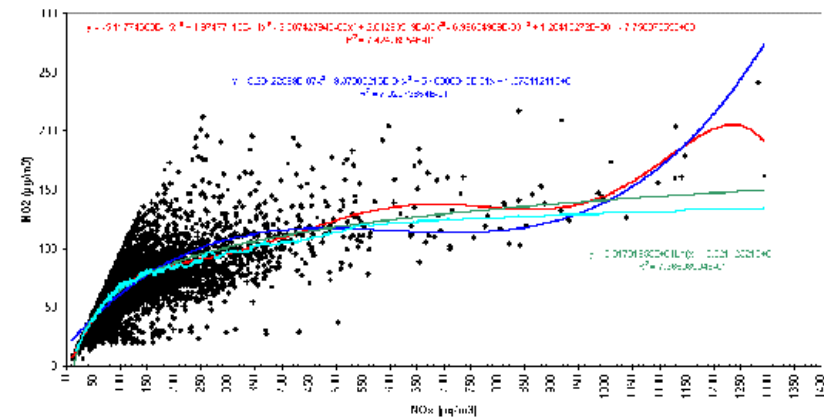
Méthode B :            43 %

Méthode C :            42 %

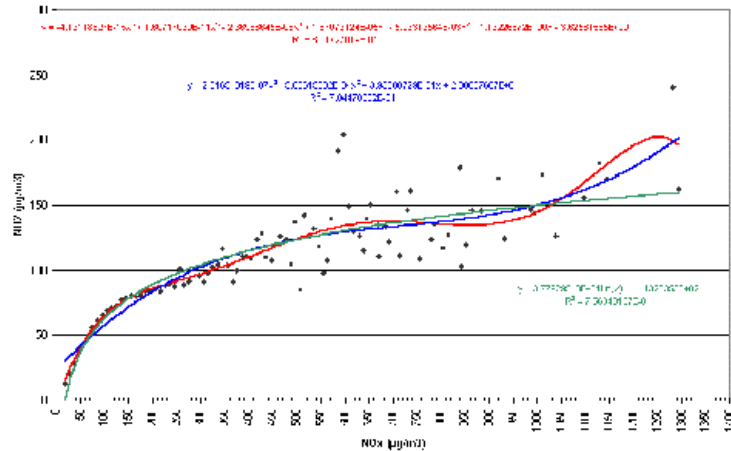
**A** Station Urbaine de Paris 18ème - Année de mesure 1994  
Distribution des fréquences des mesures horaires de NOx et Moyennes de NO2 par classe de NOx



**C** Station urbaine de Paris 18ème - Année de mesure 1994  
Nuage de points NO2 - NOx, courbes de tendance et courbe représentant la moyenne mobile sur 100 périodes (en bleu clair)



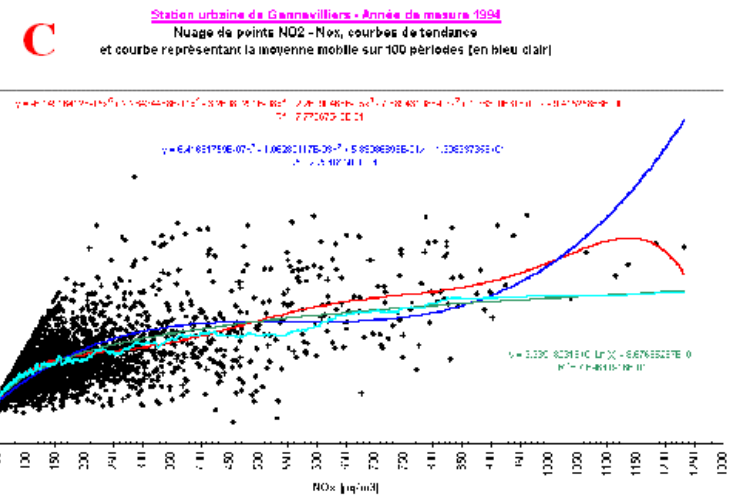
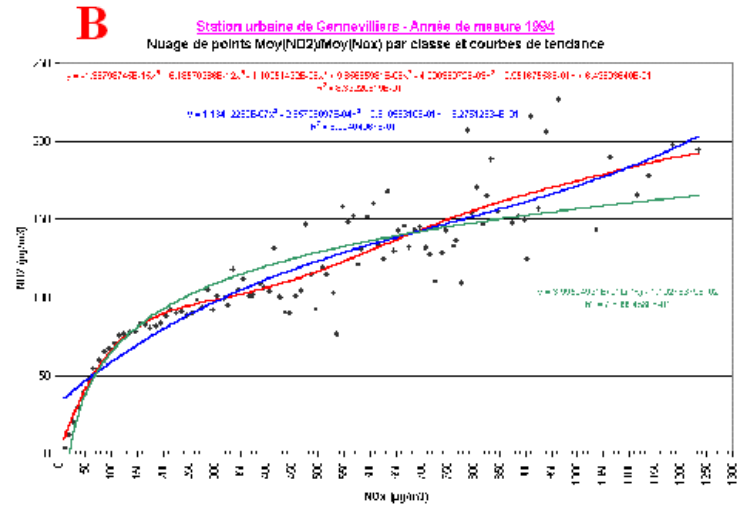
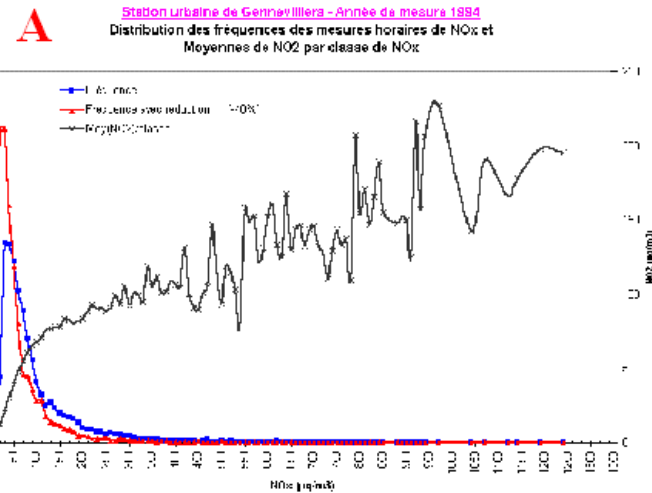
**B** Station urbaine de Paris 18ème - Année de mesure 1994  
Nuage de points Moy(NO2)/Moy(NOx) par classe et courbes de tendance



# Site de Gennevilliers - Année 1994

Estimations du % de réduction des NOx nécessaires  
au respect de la valeur de référence 2010 :

Méthode A :           38 %  
Méthode B :           38 %  
Méthode C :           37 %

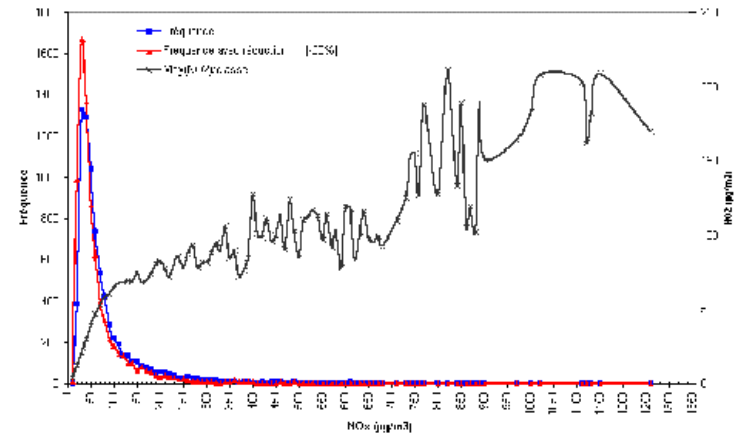


# Site de Colombes - Année 1994

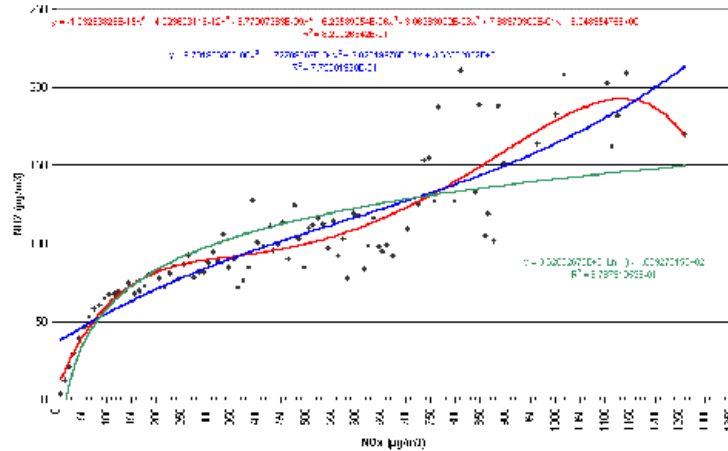
**Estimations du % de réduction des NOx nécessaires  
au respect de la valeur de référence 2010 :**

Méthode A :	18 %
Méthode B :	17 %
Méthode C :	18 %

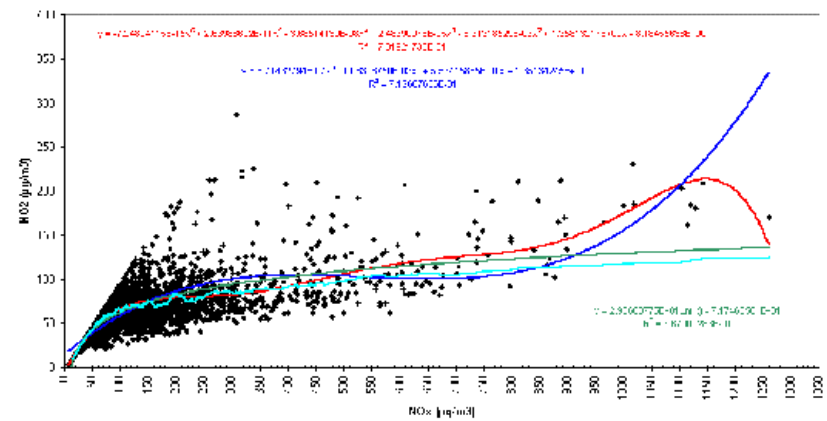
**A** Station urbaine de Colombes - Année de mesure 1994  
Distribution des fréquences des mesures horaires de NOx et Moyennes de NO2 par classe de NOx



**B** Station urbaine de Colombes - Année de mesure 1994  
Nuage de points Moy(NO2)/Moy(NOx) par classe et courbes de tendance



**C** Station urbaine de Colombes - Année de mesure 1994  
Nuage de points NO2 - NOx, courbes de tendance et courbe représentant la moyenne mobile sur 100 périodes (en bleu clair)



# **ANNEXE 3 :**

**Résultats de l'approche statistique  
(méthode A) sur les stations de  
l'agglomération parisienne**

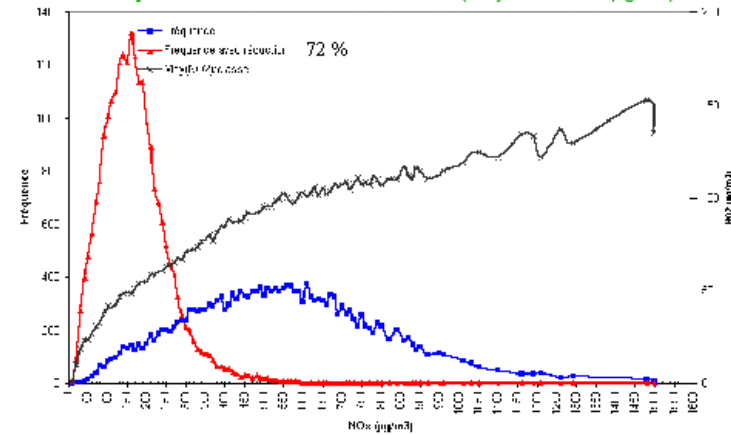
**Période d'étude : 1997-1999**



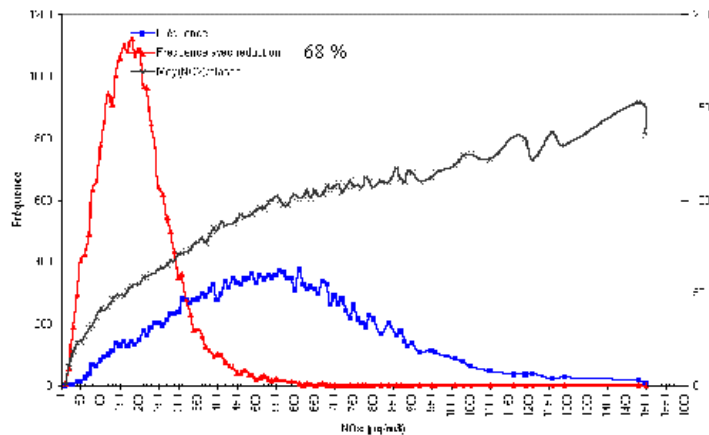
Application de la méthode statistique A

Station :		Porte d'Auteuil	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	589,66	94,91	91,00
10	530,70	90,67	90,57
20	471,73	85,97	85,48
30	412,76	80,75	79,86
40	353,80	74,74	73,66
50	294,83	67,85	66,83
60	235,87	60,15	59,31
70	176,90	51,62	51,06
80	117,93	41,68	42,02
90	58,97	27,87	32,14
100	0,00	n.s	n.s

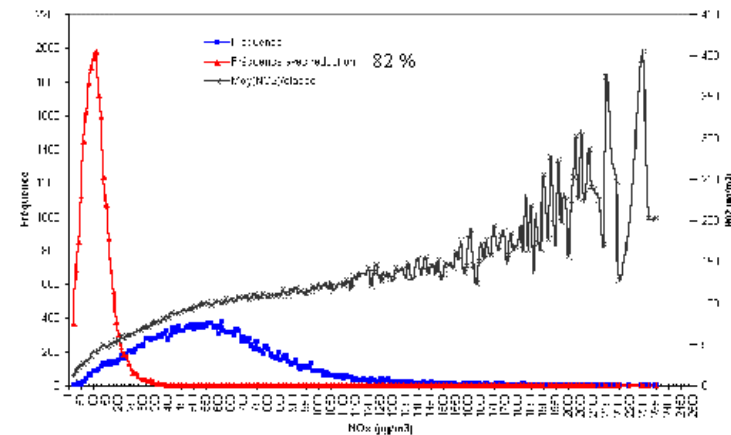
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)



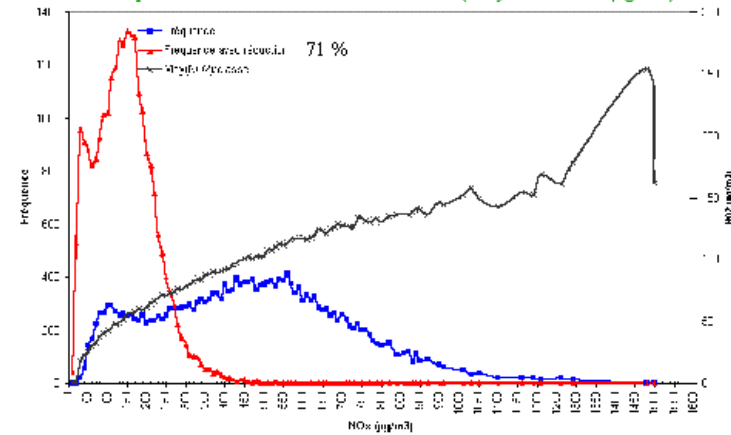
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



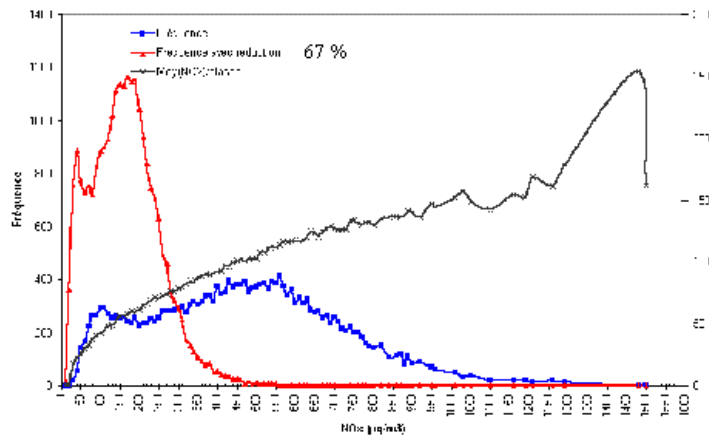
Application de la méthode statistique A

Station :		Place V Basch	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	482,83	98,85	98,00
10	434,55	93,48	97,32
20	386,27	87,84	90,91
30	337,98	81,66	83,98
40	289,70	74,97	76,49
50	241,42	67,67	68,42
60	193,13	59,70	59,73
70	144,85	50,77	50,38
80	96,57	39,84	40,33
90	48,28	24,44	29,55
100	0,00	n.s	n.s

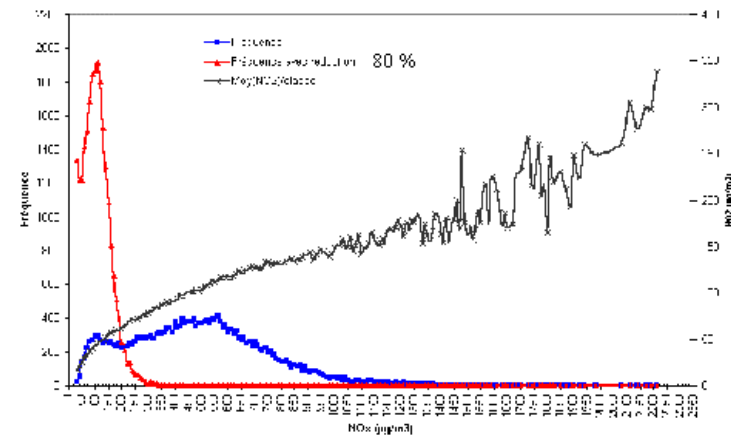
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)



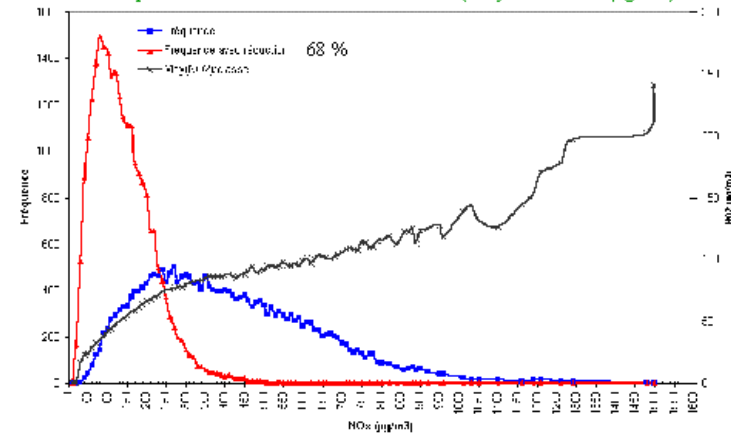
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



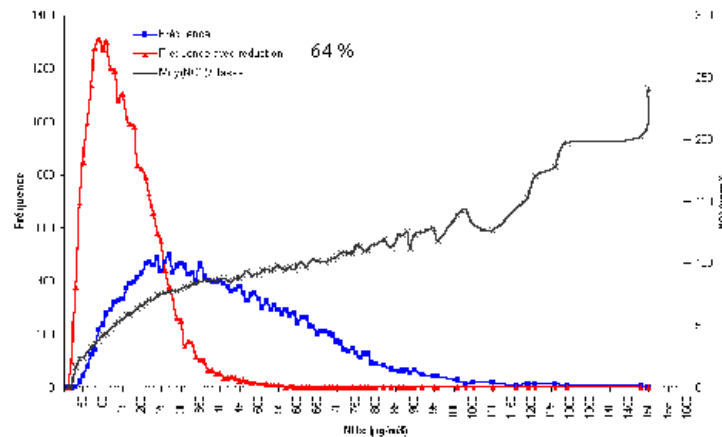
Application de la méthode statistique A

Station :		Autoroute A1	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	423,54	85,56	81,00
10	381,18	81,62	73,55
20	338,83	77,67	70,04
30	296,48	73,39	66,53
40	254,12	68,62	63,02
50	211,77	63,01	59,51
60	169,42	56,20	55,99
70	127,06	47,59	52,46
80	84,71	36,48	48,92
90	42,35	21,19	45,36
100	0,00	n.s	n.s

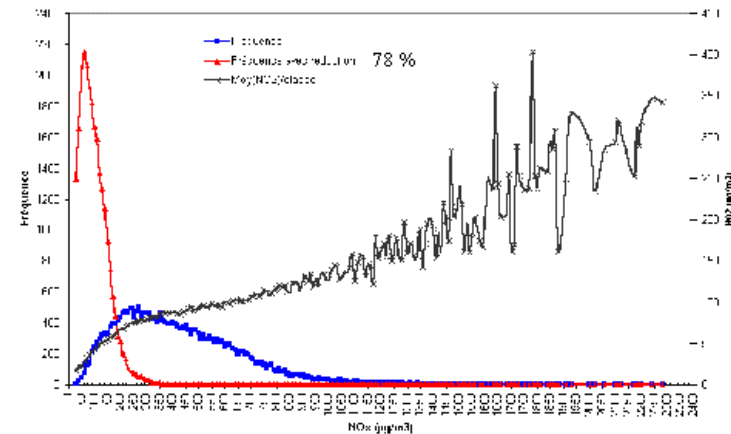
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)



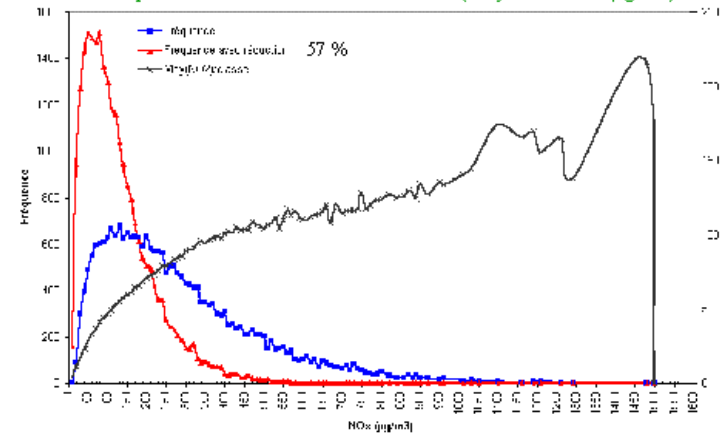
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



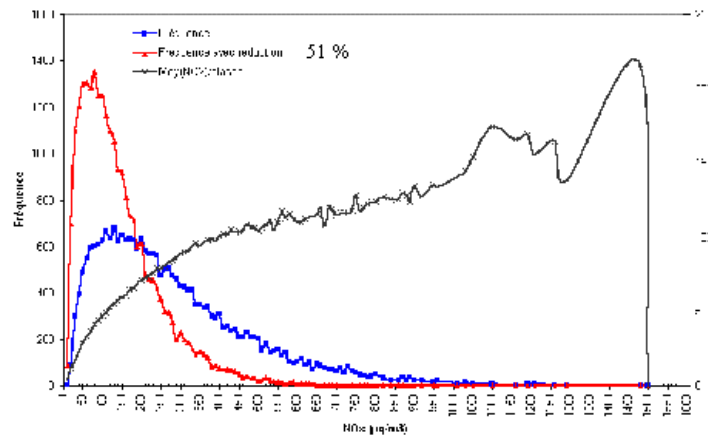
Application de la méthode statistique A

Station :		RN4	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	286,67	77,19	73,00
10	258,00	73,50	68,47
20	229,33	69,40	64,32
30	200,67	64,92	59,97
40	172,00	59,88	55,42
50	143,33	54,16	50,67
60	114,67	47,63	45,71
70	86,00	40,01	40,53
80	57,33	30,67	35,13
90	28,67	18,39	29,50
100	0,00	0,5	0,5

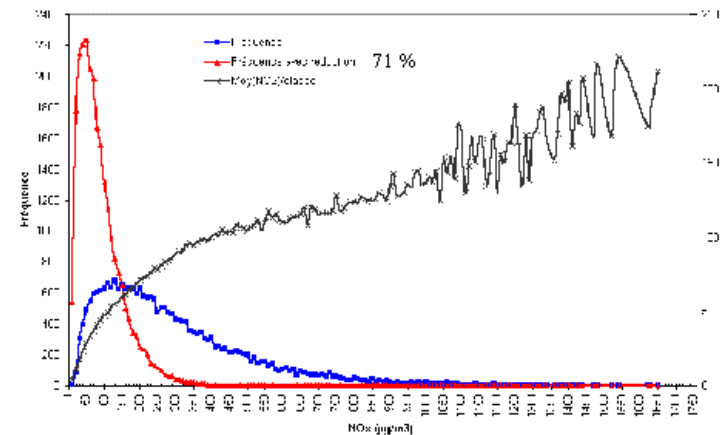
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)



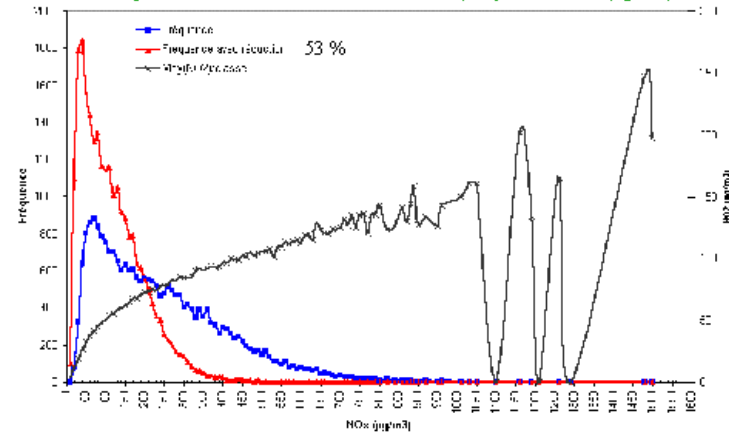
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



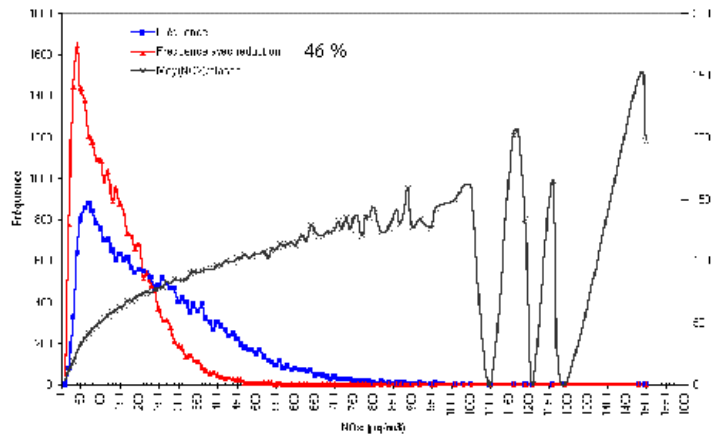
Application de la méthode statistique A

Station :		Champs Elysées	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	242,55	72,22	69,00
10	218,29	68,59	62,89
20	194,04	64,94	58,73
30	169,78	60,94	54,44
40	145,53	56,47	50,01
50	121,27	51,40	45,43
60	97,02	45,60	40,71
70	72,76	38,66	35,83
80	48,51	29,72	30,80
90	24,25	17,25	25,61
100	0,00	n.s	n.s

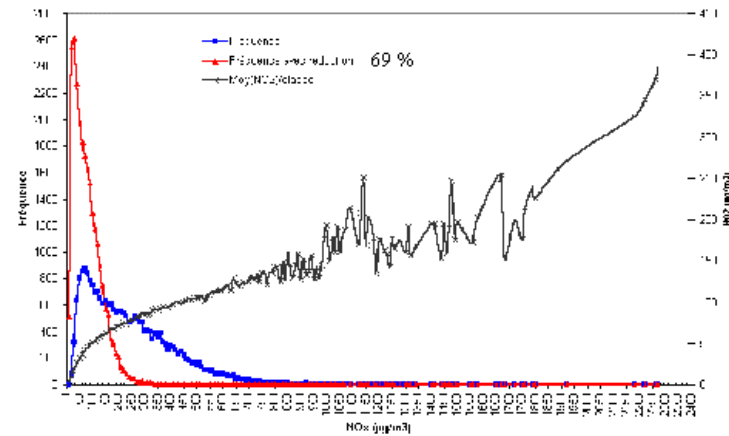
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)



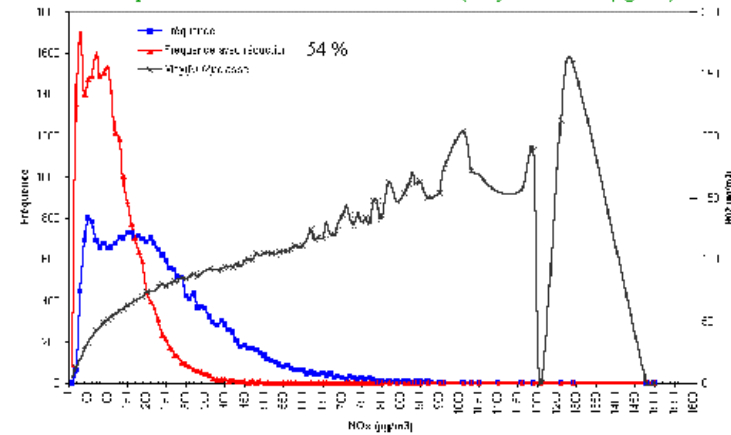
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



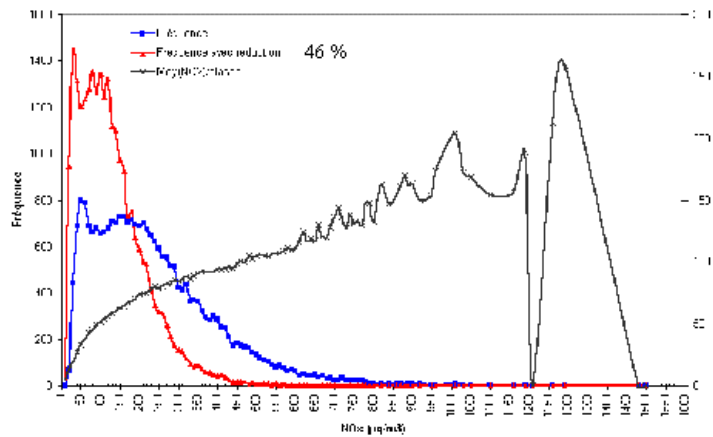
Application de la méthode statistique A

Station :		Rue Bonaparte	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	234,53	71,88	70,00
10	211,08	68,46	63,86
20	187,62	64,81	59,07
30	164,17	60,96	54,21
40	140,72	56,63	49,38
50	117,26	51,68	44,64
60	93,81	45,97	40,10
70	70,36	39,15	35,87
80	46,91	30,28	32,08
90	23,45	18,02	28,87
100	0,00	n.s	n.s

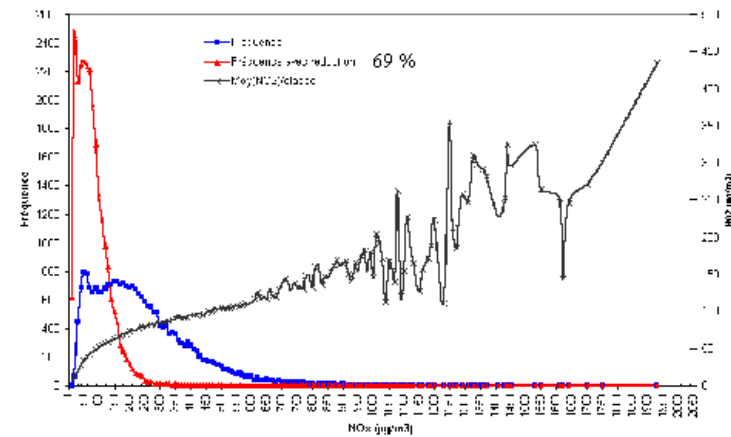
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)



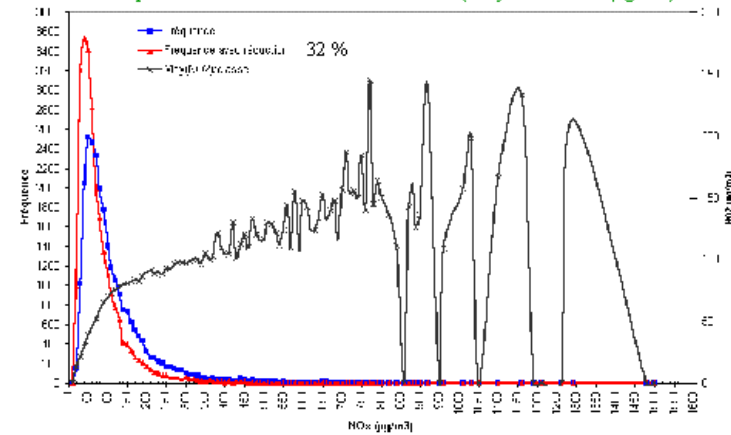
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



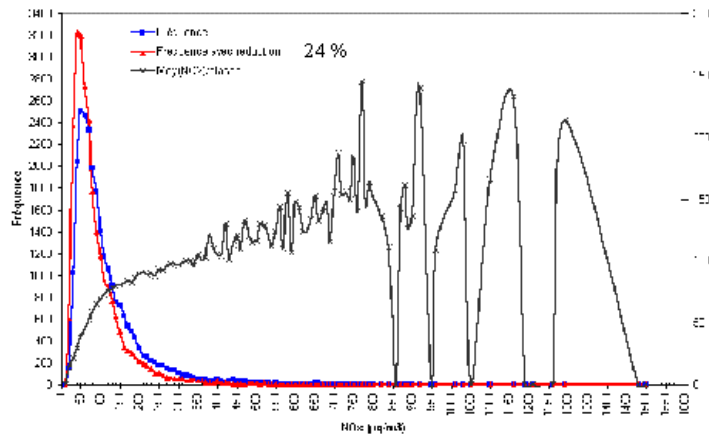
Application de la méthode statistique A

Station :		Neuilly	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	112,98	62,62	60,00
10	101,68	59,13	54,24
20	90,39	55,16	50,32
30	79,09	50,85	46,12
40	67,79	45,83	41,62
50	56,49	40,18	36,79
60	45,19	33,84	31,63
70	33,89	26,60	26,12
80	22,60	17,70	20,22
90	11,30	6,94	13,93
100	0,00	2,5	2,5

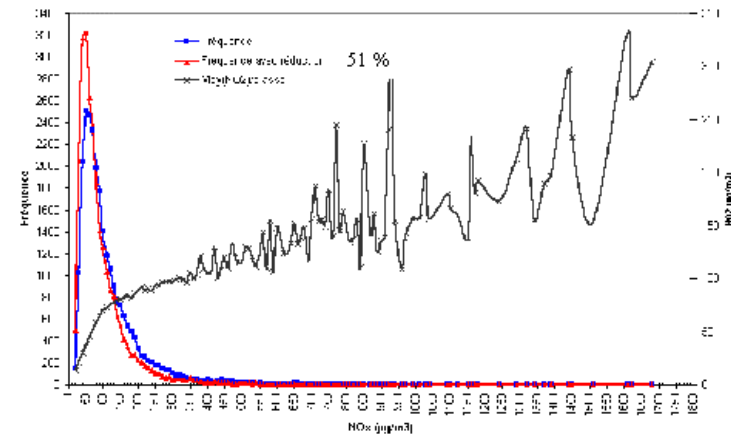
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)



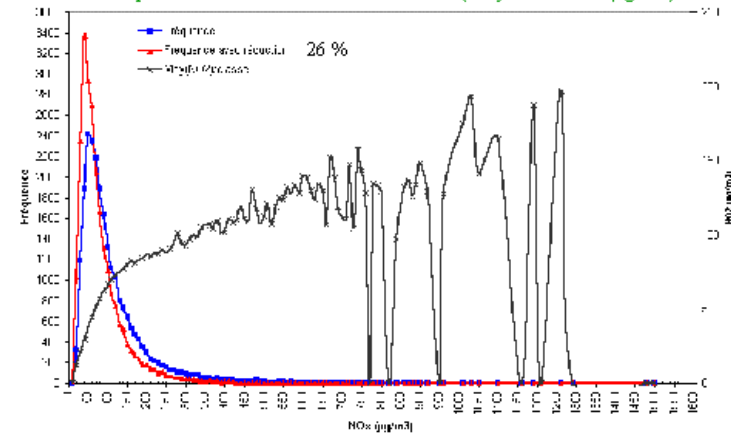
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



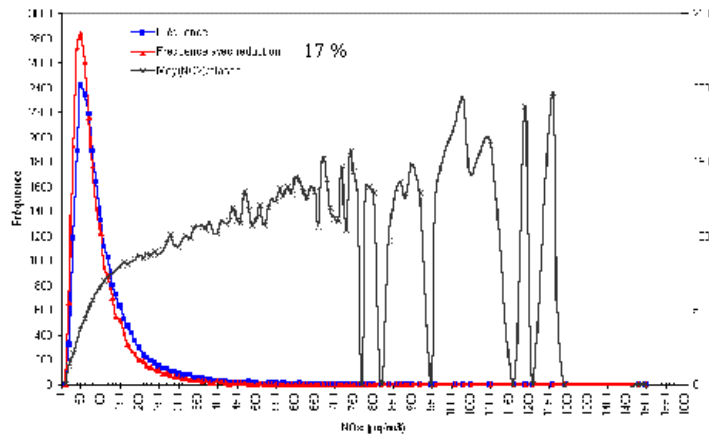
Application de la méthode statistique A

Station : Paris 18			
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	109,11	59,53	56,00
10	98,20	56,17	52,34
20	87,29	52,30	48,38
30	76,38	48,19	44,09
40	66,47	43,37	39,47
50	54,56	37,87	34,48
60	43,65	31,74	29,10
70	32,73	24,81	23,31
80	21,82	16,32	17,07
90	10,91	6,25	10,36
100	0,00	2,5	2,5

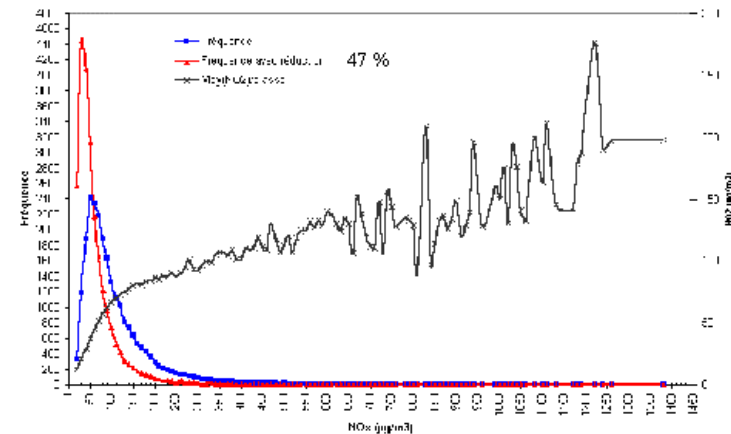
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)



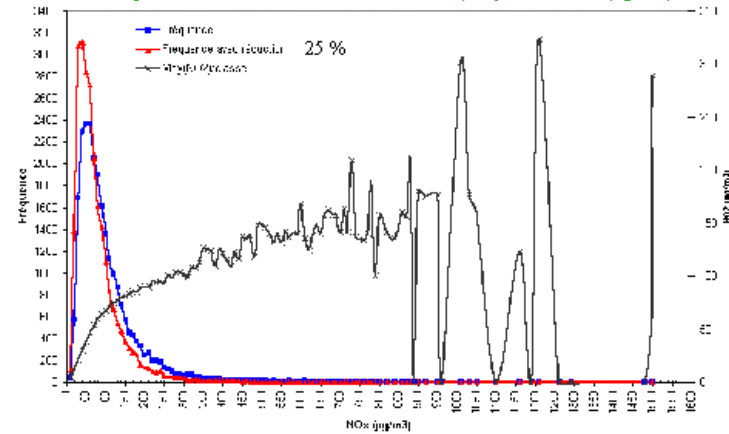
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



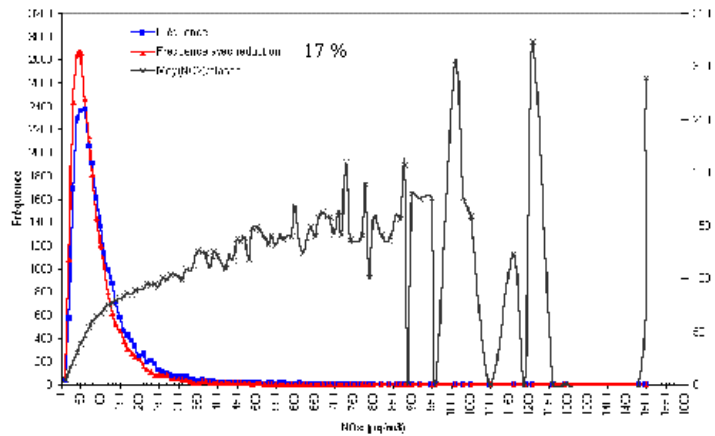
Application de la méthode statistique A

Station : Paris 7			
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	102,92	59,50	56,00
10	92,63	55,85	53,85
20	82,34	51,77	52,04
30	72,04	47,50	50,20
40	61,75	42,64	48,35
50	51,46	37,02	46,48
60	41,17	30,93	44,59
70	30,88	24,20	42,68
80	20,58	16,60	40,76
90	10,29	8,92	38,82
100	0,00	2,5	2,5

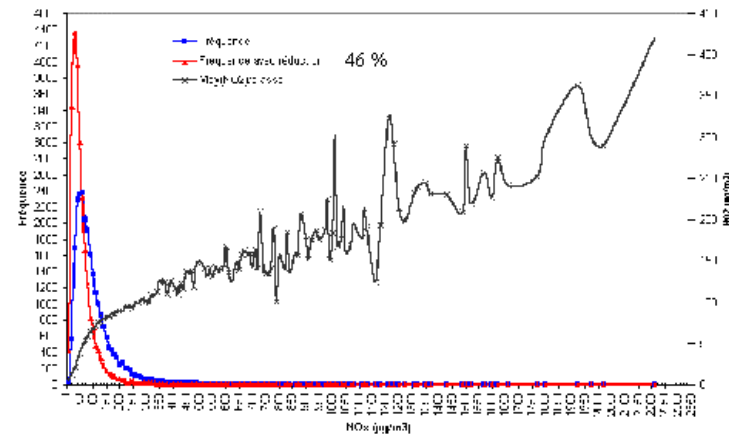
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)



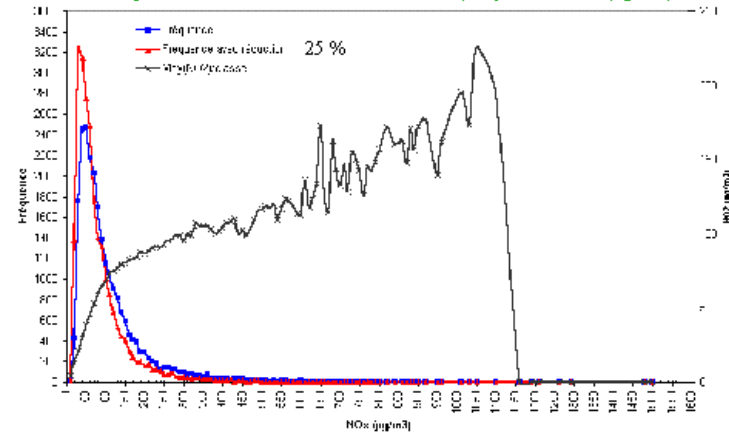
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



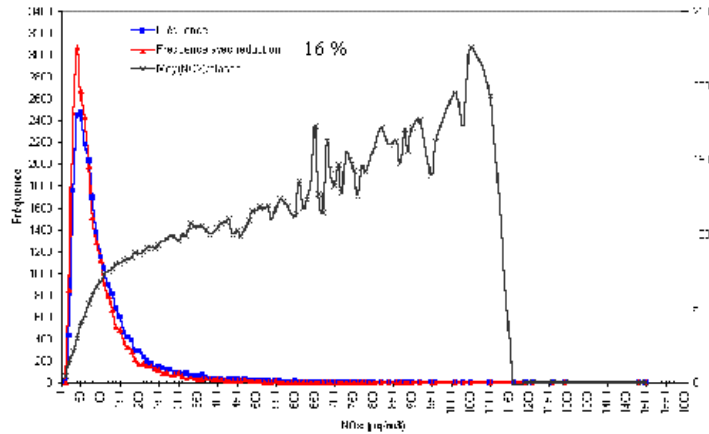
Application de la méthode statistique A

Station :		Ivry	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	107,51	59,03	56,00
10	96,76	55,72	51,00
20	86,01	51,78	46,64
30	75,26	47,66	41,95
40	64,50	42,90	36,91
50	53,75	37,51	31,49
60	43,00	31,56	25,68
70	32,25	25,03	19,46
80	21,50	17,33	12,80
90	10,75	9,21	5,67
100	0,00	0,5	0,5

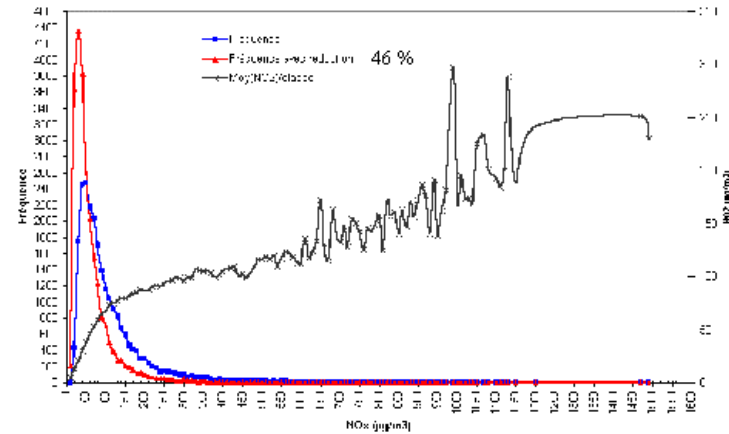
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)



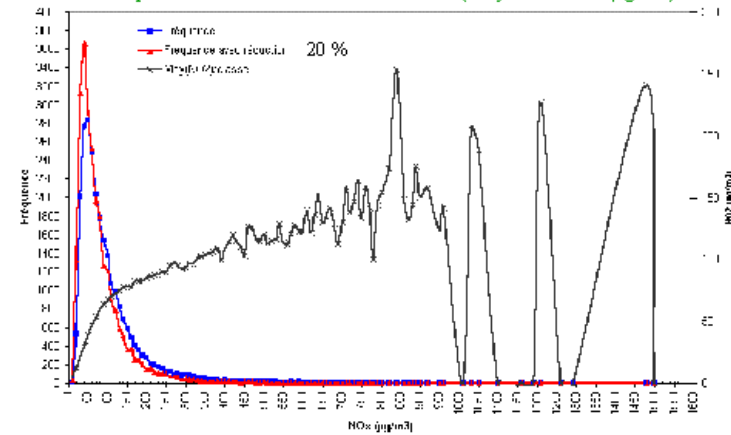
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



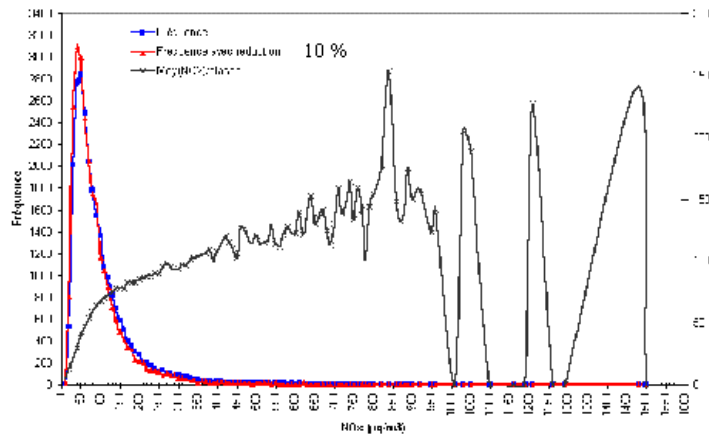
Application de la méthode statistique A

Station :		Paris 12	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	100,32	56,65	54,00
10	90,29	53,42	52,73
20	80,26	49,61	51,31
30	70,22	45,61	49,87
40	60,19	40,90	48,42
50	50,16	35,61	46,95
60	40,13	29,82	45,47
70	30,10	23,37	43,97
80	20,06	16,01	42,46
90	10,03	8,49	40,93

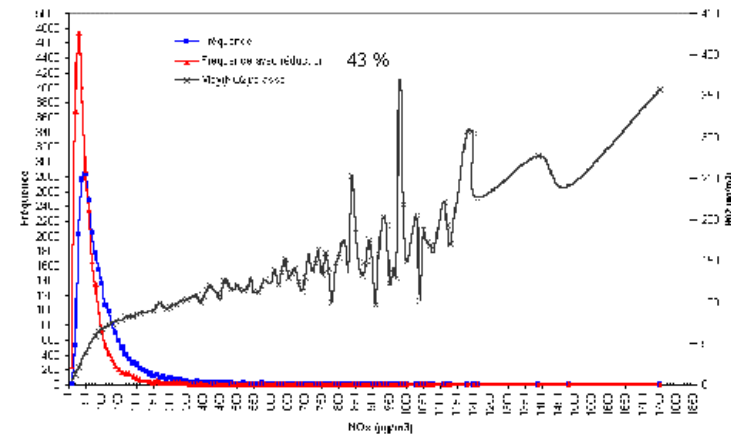
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



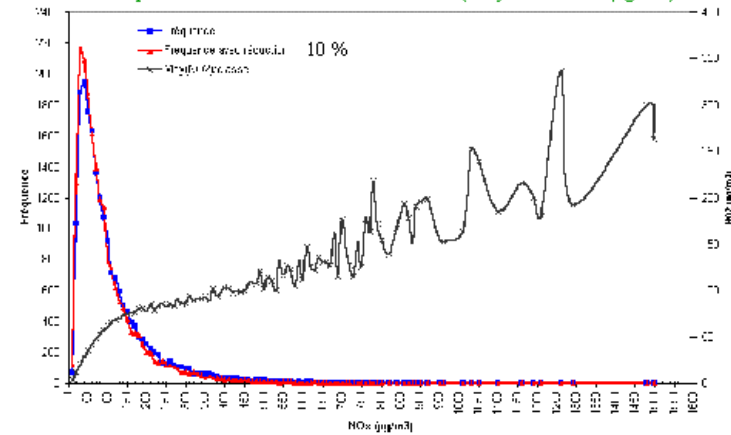
Application de la méthode statistique A

Station :		La Défense	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	107,17	52,48	49,00
10	96,46	49,46	46,40
20	85,74	46,14	42,37
30	75,02	42,57	38,02
40	64,30	38,44	33,34
50	53,59	33,76	28,31
60	42,87	28,59	22,90
70	32,15	22,70	17,10
80	21,43	15,85	10,88
90	10,72	8,38	4,23
100	0,00	n.s	n.s

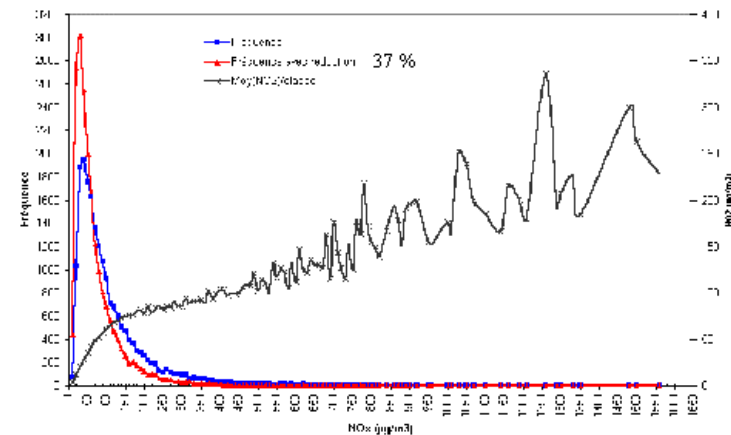
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence actuelle*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



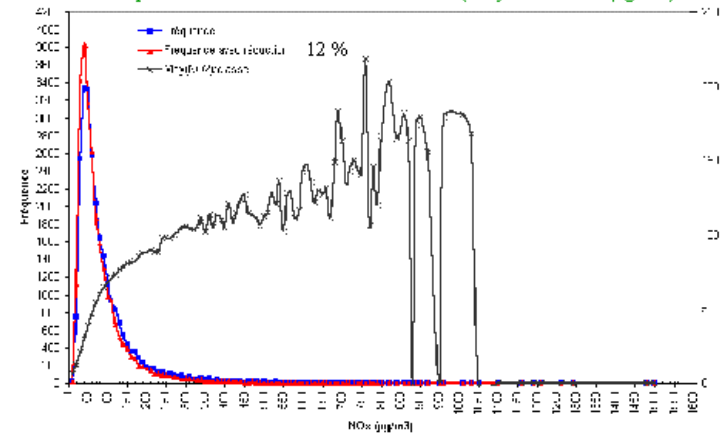
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



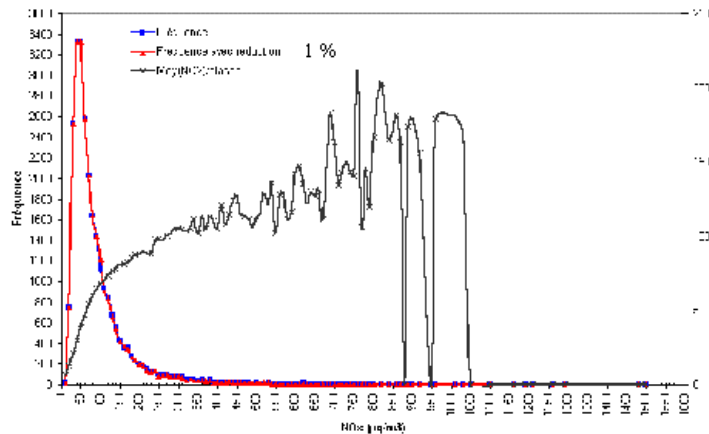
Application de la méthode statistique A

Station : Paris 13			
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	90,02	53,70	50,00
10	81,02	50,39	47,85
20	72,02	46,54	46,04
30	63,01	42,54	44,19
40	54,01	37,91	42,32
50	45,01	32,85	40,43
60	36,01	27,41	38,50
70	27,01	21,64	36,55
80	18,00	15,21	34,57
90	9,00	9,20	32,56
100	0,00	2,5	2,5

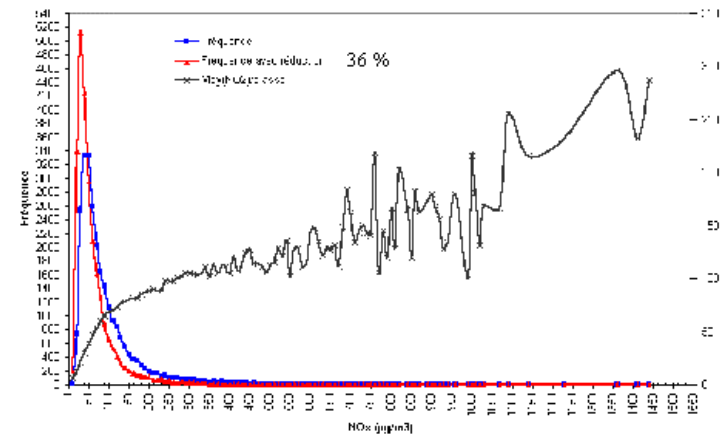
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



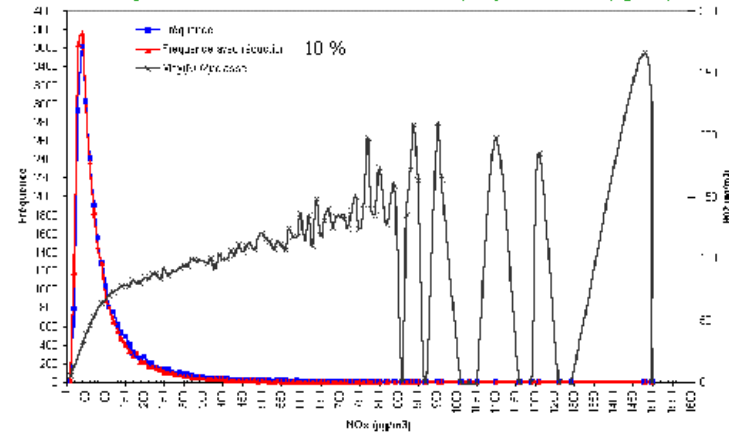
Application de la méthode statistique A

Station :		Saint-Denis	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	94,92	52,60	48,00
10	86,43	49,42	43,22
20	75,94	45,87	39,47
30	66,44	42,18	35,50
40	56,95	37,81	31,30
50	47,46	33,02	26,86
60	37,97	27,86	22,16
70	28,48	22,10	17,19
80	18,98	15,56	11,95
90	9,49	9,11	6,41
100	0,00	2,5	2,5

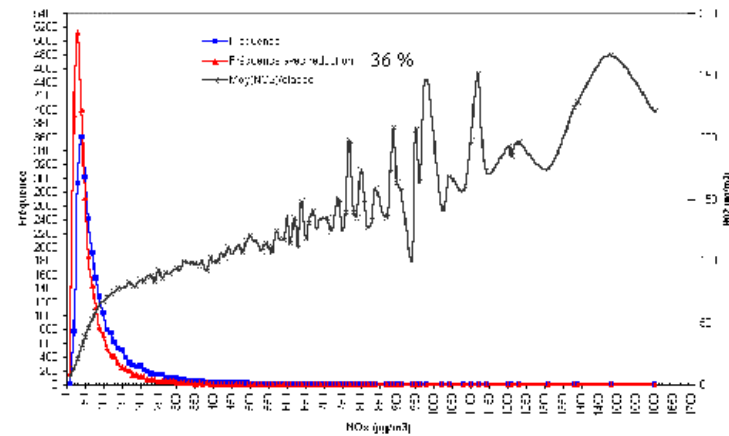
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence actuelle*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



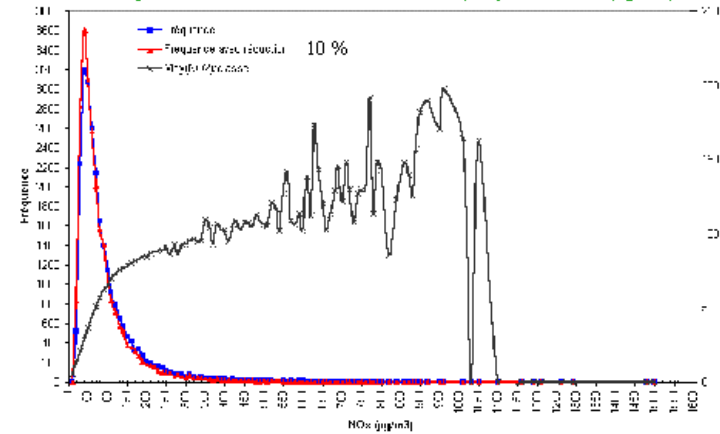
Application de la méthode statistique A

Station :		Vitry	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	95,79	53,21	49,00
10	86,21	49,98	49,17
20	76,63	46,28	47,77
30	67,05	42,40	46,35
40	57,47	37,97	44,91
50	47,90	33,06	43,46
60	38,32	27,80	41,99
70	28,74	22,06	40,51
80	19,16	15,55	39,00
90	9,58	9,08	37,49
100	0,00	n.s	n.s

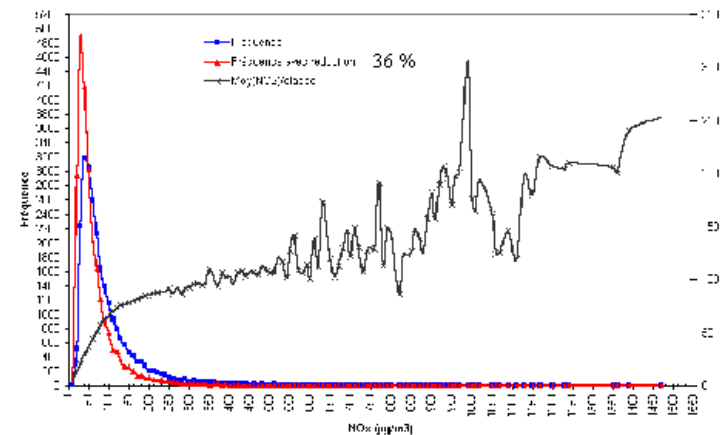
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence actuelle*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



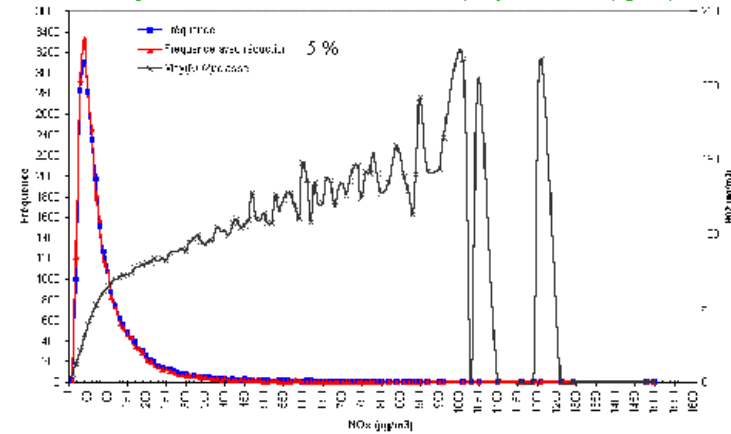
Application de la méthode statistique A

Station :		Aubervilliers	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	94,92	51,40	48,00
10	86,43	48,45	47,69
20	75,93	45,01	46,43
30	66,44	41,49	45,15
40	56,95	37,29	43,87
50	47,46	32,63	42,58
60	37,97	27,52	41,27
70	28,48	21,91	39,95
80	18,98	15,57	38,62
90	9,49	9,24	37,28
100	0,00	n.s	n.s

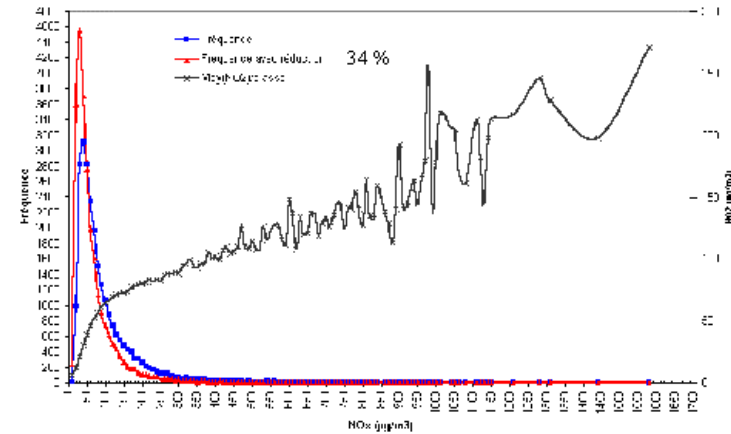
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence actuelle*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



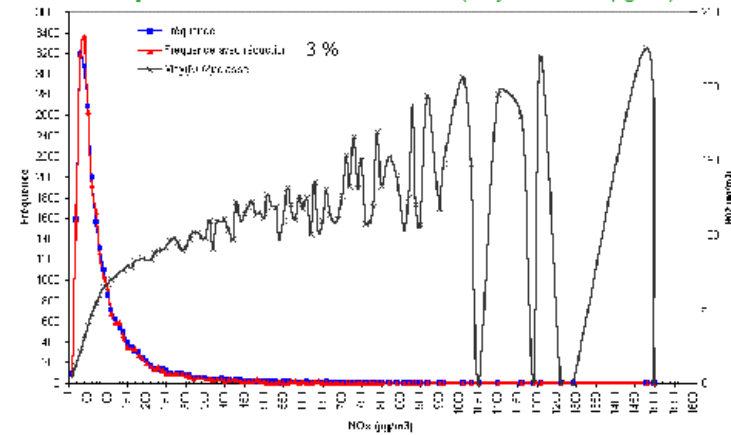
Application de la méthode statistique A

Station :		Gennevilliers	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	93,73	50,83	46,00
10	84,36	47,73	40,01
20	74,98	44,19	37,32
30	66,61	40,57	34,55
40	58,24	36,32	31,71
50	48,86	31,63	28,78
60	37,49	26,48	25,77
70	28,12	20,84	22,68
80	18,75	14,39	19,50
90	9,37	7,90	16,24
100	0,00	2,5	2,5

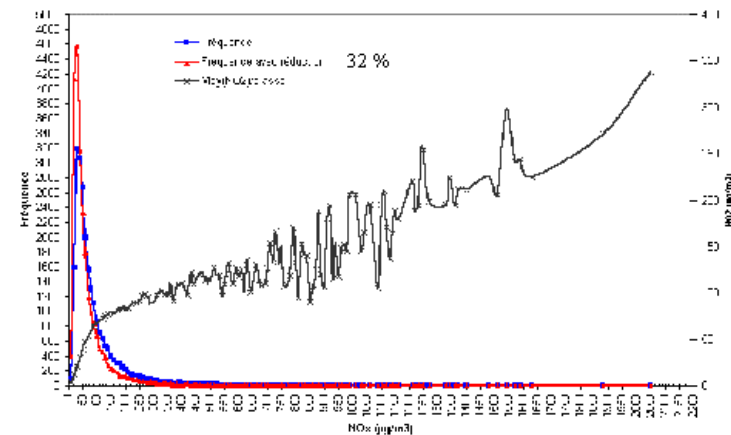
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence actuelle*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)



Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



Application de la méthode statistique A

Station :		Bobigny	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	91,17	49,65	47,00
10	82,06	46,88	48,96
20	72,94	43,44	47,90
30	63,82	39,98	46,83
40	54,70	35,87	45,75
50	45,59	31,28	44,65
60	36,47	26,38	43,53
70	27,35	20,88	42,40
80	18,23	14,63	41,26
90	9,12	8,43	40,10
100	0,00	n.s	n.s

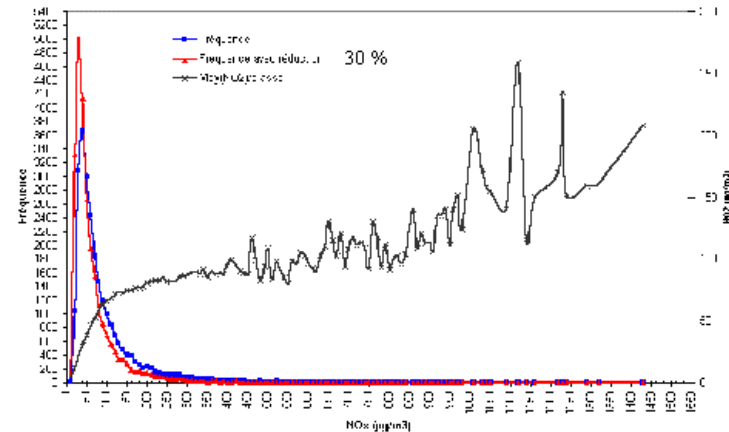
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence 2005*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence actuelle*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



Application de la méthode statistique A

Station :		Paris 6	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	78,68	48,97	45,00
10	70,82	45,77	39,64
20	62,95	42,02	35,82
30	55,08	38,27	31,80
40	47,21	33,84	27,56
50	39,34	29,01	23,10
60	31,47	23,86	18,41
70	23,61	18,38	13,47
80	15,74	12,20	8,27
90	7,87	6,48	2,81
100	0,00	n.s	n.s

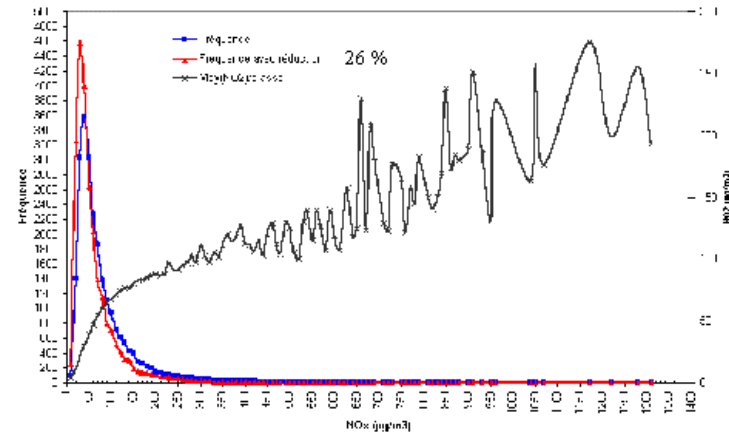
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence 2005*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence actuelle*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



Application de la méthode statistique A

Station :		Issy	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	87,09	47,86	45,00
10	78,38	45,08	43,67
20	69,67	41,72	42,25
30	60,96	38,27	40,81
40	52,25	34,21	39,36
50	43,54	29,63	37,89
60	34,84	24,73	36,39
70	26,13	19,36	34,89
80	17,42	13,22	33,36
90	8,71	7,05	31,82
100	0,00	n.s	n.s

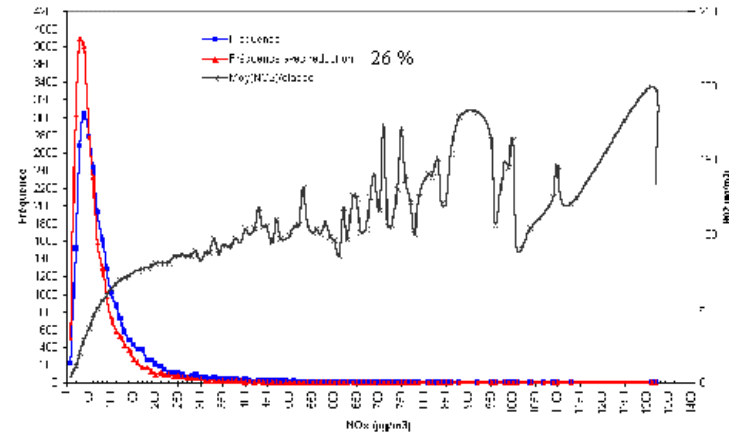
Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence 2005*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence actuelle*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)



Application de la méthode statistique A

Station :		Argenteuil	
TABLEAU RECAPITULATIF			
% réduction des NOx	Moy NOx	Moy NO2	P50 NO2
0	83,53	44,99	40,00
10	75,17	42,21	37,25
20	66,82	39,02	32,91
30	58,47	35,72	28,26
40	50,12	31,94	23,29
50	41,76	27,70	17,99
60	33,41	23,21	12,34
70	25,06	18,25	6,31
80	16,71	12,72	-0,09
90	8,35	7,25	-6,89
100	0,00	n.s	n.s

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2005 (Moy NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence 2005*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence actuelle (P50 NO2 < 50 µg/m3)

*Cette station respecte déjà la valeur de référence actuelle*

Détermination du % de réduction des NOx nécessaire au respect de la valeur de référence 2010 (Moy NO2 < 40 µg/m3)

