



Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



Etude n° 10 - 2004 **Influence des paramètres météorologiques** **sur la stratégie de mesure** **à l'aide de moyens mobiles**

Décembre 2004 - version définitive

Convention : CV 04 000 088

Jean Luc HOUDRET



PREAMBULE

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué de laboratoires de l'Ecole des Mines de Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches en liaison avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA), le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et l'ADEME. Ces travaux supportés financièrement par la Direction des Préventions des Pollutions et des Risques du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable sont réalisés avec le souci constant d'apporter l'appui scientifique et technique indispensable aux AASQA et d'assurer la liaison entre la recherche en matière de pollution atmosphérique et son application sur le terrain.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées en France, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre notamment des Directives européennes mais aussi dans un cadre prospectif pour fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper sur les évolutions futures.

ECOLE DES MINES DE DOUAI
DEPARTEMENT CHIMIE ET ENVIRONNEMENT

Etude n°10

**INFLUENCE DES PARAMETRES
METEOROLOGIQUES SUR LA STRATEGIE
DE MESURE A L'AIDE DE MOYENS MOBILES**

Jean-Luc HOUDRET
Décembre 2004

SOMMAIRE

RESUME DE L'ETUDE N°10 DU RAPPORT D'ACTIVITES 2004 DE L'EMD	4
1. INTRODUCTION.....	6
2. PRINCIPE.....	7
3. APPLICATION AU RESEAU DE STRASBOURG	8
3.1 LE RESEAU DE ASPA - STRASBOURG	8
3.2 LES POLLUANTS PRIS EN COMPTE	9
3.3 LES PARAMETRES METEOROLOGIQUES PRIS EN COMPTE.....	9
3.4 INFLUENCE DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES	10
3.4.1 Influence de la direction du vent : rose des vents	10
3.4.2 Influence de la direction du vent : roses de pollution	10
3.4.3 Influence de la vitesse du vent sur NO	12
3.4.4 Influence de la température	13
3.4.5 Influence de la température sur SO ₂	13
3.5 INFLUENCE DES PARAMETRES TEMPORELS	15
3.5.1 Principe.....	15
3.5.2 Influence de l'heure (variations trihoraires).....	16
3.5.3 Influence du jour de la semaine	17
4. APPLICATION DE LA NORME ISO 9359	18
4.1 BILAN COMPLET DES INFLUENCES DES PARAMETRES POUR STRASBOURG	18
4.2 BILAN COMPLET DES INFLUENCES DES PARAMETRES POUR D'AUTRES VILLES.....	19
4.3 STRATIFICATION DES SEQUENCES TRI-HORAIRE DE MESURE.....	19
4.4 CALCULS DES MOYENNES ET DES NOMBRES DE DEPASSEMENT PAR STRATE.....	20
4.5 DUREE DES CAMPAGNES	21
5. SIMULATION DE CAMPAGNES DE MESURE	22
5.1 STRASBOURG	22
5.1.1 Campagnes de 4 semaines	22
5.1.2 Campagnes de 4 quinzaines	25
5.1.3 Campagnes de 4 quinzaines glissantes	26
5.2 LE HAVRE.....	27
5.2.1 Campagnes de 4 semaines	27
5.2.2 Campagnes de 4 quinzaines	30
6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	31
ANNEXE A – FORMULAIRE	32
ANNEXE B – METHODE DE CALCUL.....	34

RESUME DE L'ETUDE N°10 DU RAPPORT D'ACTIVITES 2004 DE L'EMD

Etude suivie par : Jean-Luc HOUDRET
Tél : 03 27 71 26 13

INFLUENCE DE PARAMETRES METEOROLOGIQUES SUR LA STRATEGIE DE MESURE A L'AIDE DE MOYENS MOBILES

Dans le cadre des directives européennes, il est permis d'évaluer la qualité de l'air par des estimations objectives des teneurs en polluants dans les zones où elles sont inférieures aux seuils minima d'évaluation, selon les prescriptions du document « Guidance on Assessment under the EU Air Quality Directives » qui stipulent que 20% du temps doit être couvert. Les directives imposent également une surveillance représentative de tout le territoire, et surtout dans les zones où les seuils réglementaires risquent d'être dépassés.

Lorsque des mesures n'ont pas encore été réalisées sur un site donné, il n'est pas possible de savoir dans lequel des deux cas ci-dessus se positionne ce site. L'usage de moyens mobiles de mesure peut permettre de répondre à cette question préliminaire. Cette étude est issue de l'un des besoins exprimés par le groupe de travail sur les moyens mobiles de mesure, et a pour objectif :

- d'élaborer une stratégie d'utilisation des moyens mobiles de mesure,
- d'étudier et de prendre en compte l'impact des paramètres météorologiques sur les mesures réalisées lors de campagnes mobiles afin d'estimer les moyennes annuelles,
- de déterminer le nombre et les durées de campagnes mobiles qu'il faudrait mettre en œuvre sur un site ou dans une zone pour estimer la moyenne annuelle et le nombre de dépassements de seuils prédéterminés avec leurs incertitudes respectives qui auraient été obtenus dans une station fixe,
- d'établir un mode d'emploi de la norme ISO 9359 qui décrit à partir des mesures de pollution issues de campagnes mobiles la reconstitution sur un long terme d'une concentration moyenne assortie de son incertitude, et le dénombrement des dépassements de seuils prédéfinis.

La méthode est basée sur la connaissance des influences des paramètres météorologiques et/ou temporels sur les données du site-test choisi, et sur l'élaboration de strates de concentrations correspondant à des combinaisons de ces paramètres.

On calcule ensuite les moyennes et les écarts types des polluants concernés dans chaque strate, on détermine les nombres minimum de mesures qu'il conviendrait de faire pour une incertitude donnée dans chaque strate lors de campagnes ultérieures, on réalise les campagnes de mesure sur les autres sites à prospecter, et on ventile dans chaque strate les résultats obtenus correspondant aux mêmes combinaisons.

On reconstitue enfin les moyennes annuelles et/ou les nombres de dépassements de seuils au prorata annuel des occurrences des strates pendant les campagnes.

Afin d'illustrer le mode d'emploi de la méthode, on l'applique à deux bases annuelles de données issues de stations fixes de Strasbourg (année 2003) et du Havre (année 2002), puis à des données de campagnes de mesures mobiles simulées en prélevant une partie de ces bases, 4 fois une semaine puis 4 fois une quinzaine au début de chaque trimestre.

On testera la robustesse de la méthode en rééditant ces pseudo campagnes en les décalant autant de fois 1 semaine et 1 quinzaine qu'il est possible (Strasbourg).

Les résultats obtenus sont de deux types différents :

- d'abord, la pré-étude des sites permet de mieux connaître l'influence de paramètres météorologiques sur les données de pollution atmosphérique et des éléments pouvant aider à l'optimisation des stratégies de mesure et à l'élaboration des PSQA.
- ensuite, la méthode de stratification permet à partir de campagnes de mesures en nombre réduit, d'obtenir des estimations sur les données intégrées sur une année, dans les limites de l'incertitude choisie (ici 10%), et/ou requise par les textes réglementaires (de 15 à 25% selon les polluants).

La qualité des résultats de cette méthode est cependant limitée par la durée réduite des campagnes qui peut ne pas refléter totalement les événements qui se déroulent sur une année entière, comme surtout des pointes élevées de pollution. L'incidence sera plus importante sur les reconstitutions de nombres de dépassement de seuil que sur celles des moyennes.

Les annexes A et B de ce rapport ainsi que le classeur EXCEL de calcul automatique disponible auprès du LCSQA-EMD, permettront aux AASQA qui le désirent d'appliquer la méthode décrite dans ce rapport à leurs propres données.

INFLUENCE DE PARAMETRES METEOROLOGIQUES SUR LA STRATEGIE DE MESURE A L'AIDE DE MOYENS MOBILES

2. INTRODUCTION

Les directives européennes et le projet d'arrêté du MEDD imposent des objectifs de surveillance divers selon plusieurs critères :

- évaluation de la qualité de l'air par des estimations objectives des teneurs en polluants dans les zones où elles sont inférieures aux seuils minima d'évaluation,
- surveillance représentative de tout le territoire,
- surveillance renforcée dans les zones où les seuils réglementaires risquent d'être dépassés

L'usage de moyens mobiles de mesure peut apporter des informations sur le critère prévalant dans une zone donnée. Cette étude est issue de l'un des besoins exprimés par le groupe de travail sur les moyens mobiles de mesure, à savoir :

« les nombres de campagnes mobiles sur un site qu'il faudrait mettre en œuvre par an et de quelles durées, pour avoir une estimation de la moyenne annuelle qui aurait été obtenue avec une station fixe ».

L'application de la norme :

« ISO 9359 – Qualité de l'air – Echantillonnage aléatoire stratifié pour l'évaluation de la qualité de l'air ambiant »,

permet d'étudier et de prendre en compte l'impact de paramètres météorologiques et/ou temporels sur les mesures réalisées lors de campagnes mobiles afin d'estimer les moyennes annuelles et le nombre de dépassements de seuils prédéterminés avec leurs incertitudes respectives, qui auraient été obtenus dans une station fixe :

- pour des directions de vent sélectionnées par rapport à un émetteur industriel,
- pour des classes de concentration spécifiées,
- pour des classes de valeurs de paramètres météorologiques, tels que la température, la pluviométrie, la pression, ... ,
- selon l'heure du jour et le jour dans la semaine.

Cette norme décrit comment à partir de groupes de mesures partielles :

- reconstituer sur un plus long terme, par exemple sur une année, une concentration moyenne assortie de son incertitude,
- dénombrer les dépassements de seuils prédéfinis (ex : valeurs limites).

Par contre, cette norme est succincte sur les modalités de choix des classes de

paramètres à prendre en compte et la méthode de construction des strates. Cela est laissé au libre arbitre des utilisateurs selon leurs contextes locaux. Cette étude tente de combler ce manque. Des études de faisabilité appliquées aux données journalières de pollution atmosphérique à Lille de 1996 à 1999, aux données tri-horaires de Marseille de 1998 à 2000, de Toulon en 2000, de Toulouse en 2001 et 2002, de Le Havre en 2002 puis de Strasbourg en 2003 ont été réalisées.

3. PRINCIPE

Différentes combinaisons de paramètres météorologiques et/ou temporels entraînent la présence de fortes, moyennes ou faibles concentrations en polluants ; le nombre minimum de mesures nécessaires sur un site pour estimer une moyenne et un nombre de dépassements de seuil avec une incertitude donnée, requiert la connaissance des distributions des données et de leurs écarts types attendus sur un site-test similaire ; les résultats de ces estimations sont plus tributaires des concentrations élevées que des faibles ; aussi il est préférable de regrouper en strates définies par les combinaisons de paramètres, les données de mêmes ordres de grandeur, afin de réduire les écarts types des données dans chaque strate.

Il convient donc :

- en premier lieu de connaître les influences des paramètres météorologiques et/ou temporels sur les données du site-test choisi, et de créer des strates de concentrations correspondant à des combinaisons de ces paramètres,
- de calculer les moyennes et les écarts types des polluants concernés dans chaque strate,
- de déterminer les nombres minimum de mesures qu'il conviendrait de faire pour une incertitude donnée dans chaque strate lors de campagnes ultérieures,
- de réaliser les campagnes de mesure sur les autres sites à prospecter, et de ventiler dans chaque strate les résultats obtenus correspondant aux mêmes combinaisons,
- de reconstituer les moyennes annuelles et/ou les nombres de dépassements de seuils au prorata annuel des occurrences des strates pendant les campagnes,
- de tester et valider la méthode sur la base des nombres de mesures trouvés, en simulant des campagnes de mesures prises dans la base de données du site-test.

L'objectif de ce rapport est de rédiger un mode d'emploi applicable dans tous les réseaux, après l'avoir testée avec les données de plusieurs réseaux, et surtout pour diverses typologies de stations.

Un classeur EXCEL de calcul automatique est disponible sur demande. Les modalités d'utilisation sont décrites en annexe.

4. APPLICATION AU RESEAU DE STRASBOURG

A titre d'exemple, on applique la méthode aux données de STRASBOURG (ASPA) en 2003. On rappelle ensuite les résultats des études précédentes appliquées aux données de Marseille, Toulon et Toulouse. Les résultats obtenus au Havre non encore publiés sont synthétisés en 5.2 .

4.1 Le réseau de ASPA - Strasbourg

Les stations de Strasbourg prises en compte sont présentées dans la figure 1.



Figure 1 : stations de mesure – réseau de Strasbourg

4.2 Les polluants pris en compte

L'association ASPA a communiqué à l'EMD les données horaires de 2003 pour plusieurs stations de typologies différentes, ainsi que des mesures météorologiques horaires effectuées dans plusieurs stations. Les moyennes tri-horaires ont ensuite été calculées. Cette étude s'applique aux stations décrites dans le tableau 1 et représentées par la figure 1.

Tableau 1 : stations et polluants mesurés

Stations de mesure		Polluants mesurés					
Nom	Typologie	SO ₂	NO	NO ₂	O ₃	PM10	PM2.5
Strasbourg Ouest	Péri urbaine	x	x	x	x		
Strasbourg Illkirch	Trafic	x	x	x		x	
Strasbourg Centre	Urbaine	x	x	x	x	x	
Strasbourg Nord	Urbaine	x	x	x	x	x	
Strasbourg Clemenceau	Trafic	x	x	x		x	x
Strasbourg Sud	Péri urbaine				x		
Strasb Hôpital civil (DOAS)	Urbaine	x		x	x		
Strasbourg Est	Urbaine	x	x	x	x	x	x

La station météorologique CRR a été retenue car la base de données était la plus complète ; elle se situe en dehors de l'agglomération et est peut-être la plus représentative pour l'ensemble de la zone d'étude.

4.3 Les paramètres météorologiques pris en compte

Ce sont les suivants :

- la vitesse du vent et sa direction par secteur de 10 en 10 degrés,
- la température.

L'aspect temporel est également pris en compte de la manière suivante :

- Les heures des séquences de mesure tri-horaires,
- Les jours de la semaine.

La limitation volontaire à ces paramètres de base, disponibles dans toutes les associations, rend cette étude applicable par tous.

Note 1 : ces mesures ont été moyennées sur 3 heures afin de réduire la taille des fichiers horaires sur une année.

Note 2 : l'aspect saisonnier n'est pas considéré ici sur un plan temporel mais est pris en compte indirectement par les classes de température qui reflètent les variations saisonnières.

Note 3 : la norme ISO 9359 est applicable dans 3 cas de figure possibles selon la disponibilité de données antérieures :

- données de météorologie et de pollution,
- données de météorologie seules, sans données de pollution,
- données de pollution seules, sans données de météorologie ;
le premier cas est celui à privilégier et qui est traité dans cette étude.

Pour créer les strates, on a au préalable déterminé les degrés d'influence de chaque paramètre météorologique et temporel retenu, sur chacun des polluants considérés et pour chaque station ; cela a permis de définir les classes les plus homogènes possibles pour lesquelles les concentrations mesurées pour chaque polluant sont assez voisines les unes des autres, par exemple de faibles, moyennes, fortes, à très fortes, afin d'obtenir pour chaque classe des écarts types plus faibles que celui de l'ensemble des données. On combine ensuite les paramètres choisis pour créer les strates.

4.4 Influence des paramètres météorologiques

4.4.1 Influence de la direction du vent : rose des vents

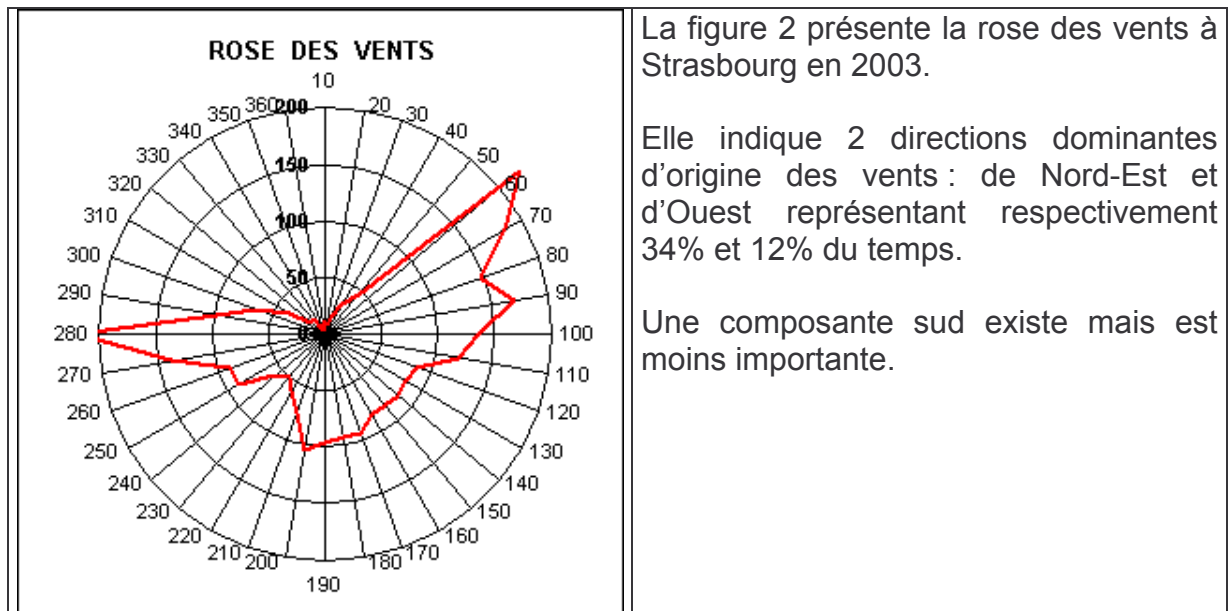


Figure 2 : rose des vents

4.4.2 Influence de la direction du vent : roses de pollution

Afin d'établir des classes de directions de vent, les figures suivantes présentent les roses de pollution appliquées à SO_2 et O_3 à Strasbourg en 2003. On calcule pour chaque station les moyennes des concentrations tri-horaires pour chaque direction de vent (de 10 en 10 degrés) .

4.4.2.1 Roses de SO₂ : 7 stations

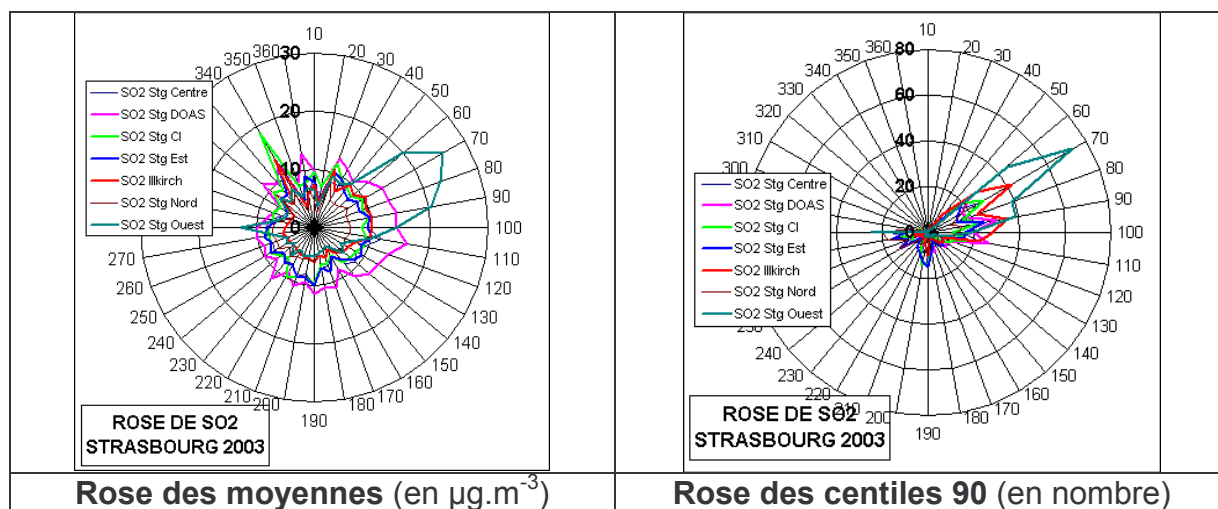


Figure 3 : roses de SO₂

On voit que seule la station de Strasbourg-Ouest subit une influence des vents de nord-est sur les concentrations moyennes. Les autres stations sont indépendantes de la direction du vent. Les roses des moyennes de NO, NO₂ et PM non représentées ici sont assez semblables à celles de SO₂, mise à part celle de Strasbourg-Ouest.

La rose des dépassements du centile 90 pour SO₂ (figure 3 de droite) est par contre très orientée vers des vents d'origine Nord-Est. Cependant, les faibles niveaux de SO₂ rencontrés sont en fait peu significatifs.

4.4.2.2 Roses de NO₂ : 7 stations

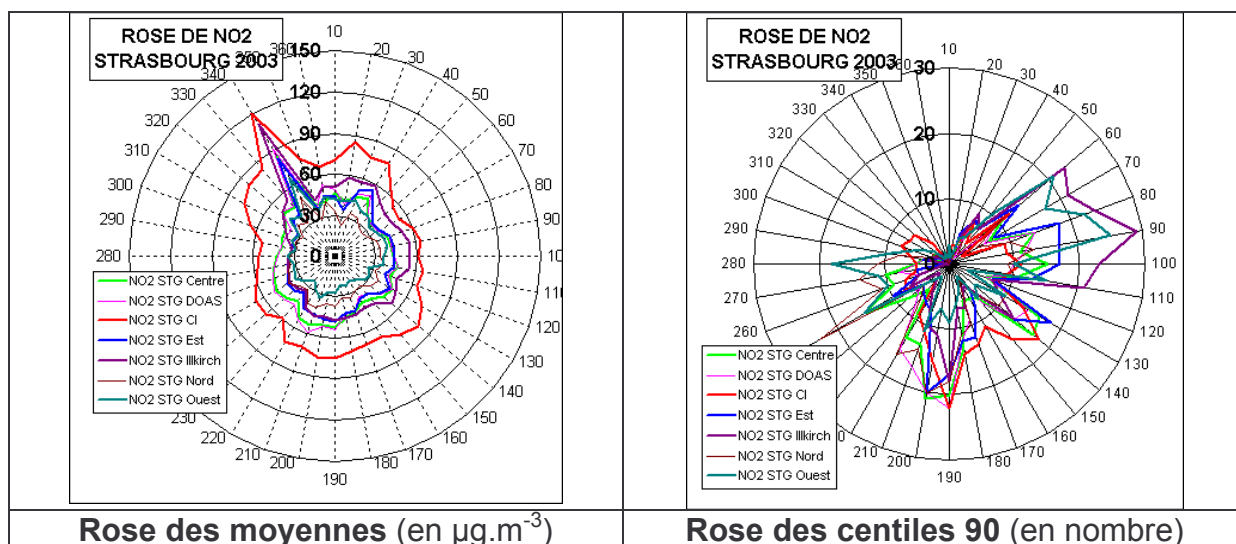


Figure 4 : roses de NO₂

La rose des moyennes de NO₂ (figure 4 de gauche) ne fait pas apparaître de direction de vent privilégiée ; par contre, les pointes (figure 4 de droite) apparaissent lors des vents dominants et aussi par vent de sud.

4.4.2.3 Roses de O₃ : 6 stations

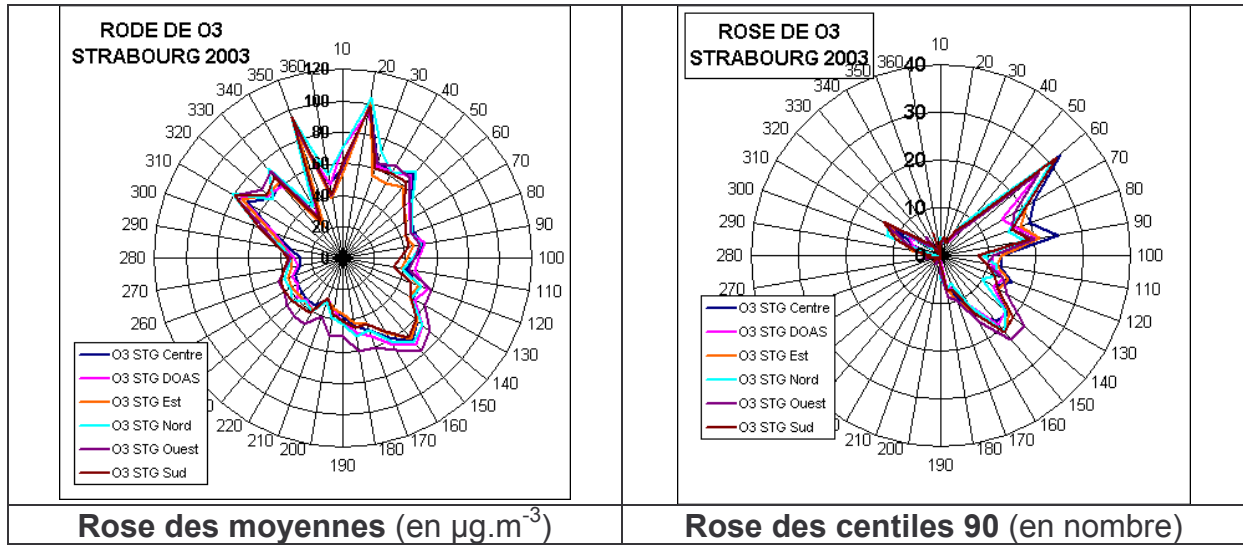


Figure 5 : roses de O₃

On voit sur la figure 5 de gauche que les valeurs moyennes de O₃ sont un peu plus importantes pour certaines directions de vent autres que les composantes dominantes de nord-est et d'ouest. Par contre, les pointes de O₃ apparaissent sur la figure 5 de droite seulement par vents de nord-est et de sud-est. Ces constatations sont à peu près identiques pour les 6 stations considérées.

4.4.3 Influence de la vitesse du vent sur NO

L'étendue des vitesses de vent est de 0 à 9 mètres par seconde ; un premier choix de 8 classes de vitesse de vent a été réalisé. Les résultats sont présentés sur la figure 6 où on porte les moyennes des valeurs tri-horaires de NO en ordonnée en fonction des vitesses de vent en abscisse.

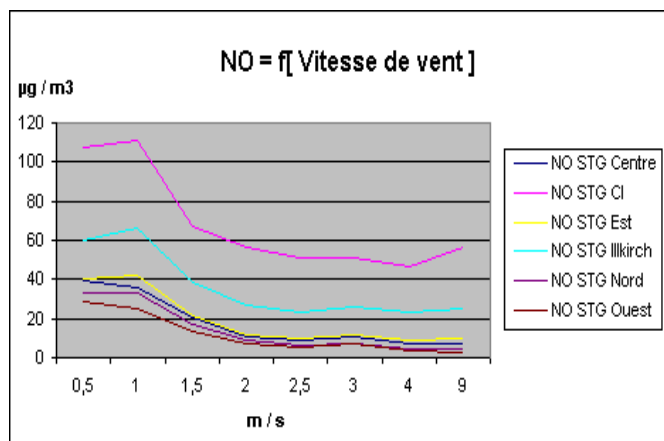


Figure 6 : moyennes de NO en fonction de la vitesse du vent

On considère donc 2 classes de vitesse de vent de part et d'autre de $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

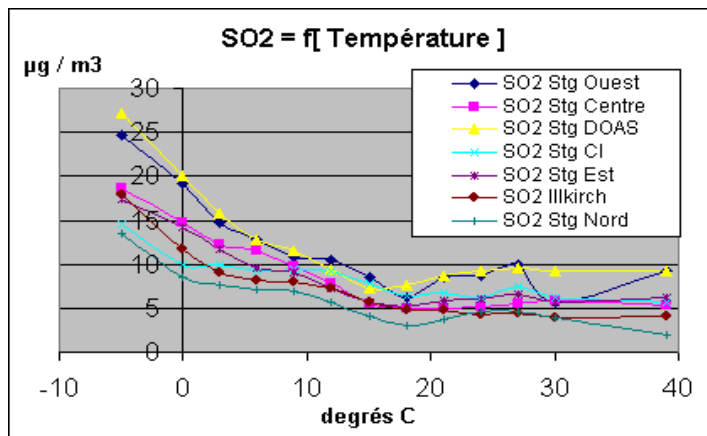
On constate que les concentrations tri-horaires en NO en fonction de la vitesse de vent diminuent rapidement lorsque la vitesse du vent augmente, surtout de $1 \text{ à } 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, puis plus lentement au-delà. On distingue les 2 stations trafic, Clémenceau et Illkirch. Les courbes obtenues avec SO₂, NO₂ et PM sont assez similaires.

4.4.4 Influence de la température

Les températures s'échelonnent de -5 à $+40$ degrés ; cette étendue a été dans un premier temps divisée en 16 classes : $T^{\circ}\text{C} < 0$, puis de 2 en 2 degrés.

Les moyennes des valeurs tri-horaires en polluants ont été calculées pour chaque classe, et par polluant. Les influences de la température sur les divers polluants sont représentées sur les figures suivantes.

4.4.5 Influence de la température sur SO_2

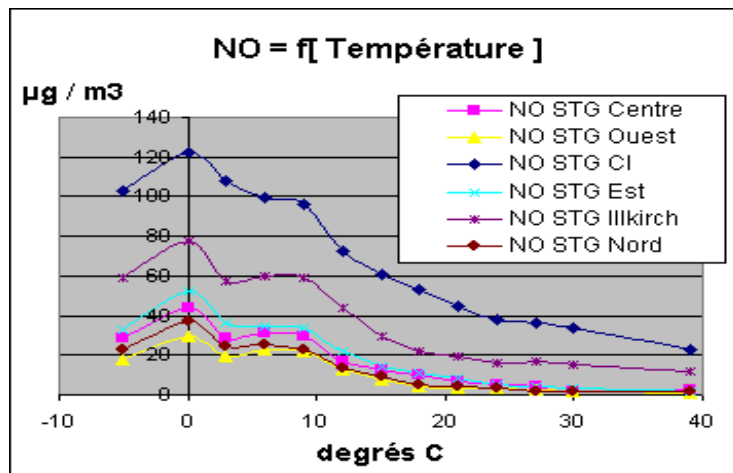


Comme attendu, SO_2 est qualifié de polluant hivernal ; les hausses de concentrations sont liées à des baisses de température.

Figure 7 : moyennes de SO_2 par classe de température

On considère donc 2 classes de température de part et d'autre de 12°C .

4.4.5.1 Influence de la température sur NO



On observe sur la figure 8 une analogie entre les stations de mesure du NO. Une élévation de température entraîne une baisse des concentrations. On distingue nettement par les niveaux atteints, les 4 stations de fond et les 2 stations de proximité automobile : Clémenceau et Illkirch.

Figure 8 : moyennes de NO par classe de température

On considère donc 2 classes de température de part et d'autre de 10°C .

4.4.5.2 Influence de la température sur NO₂

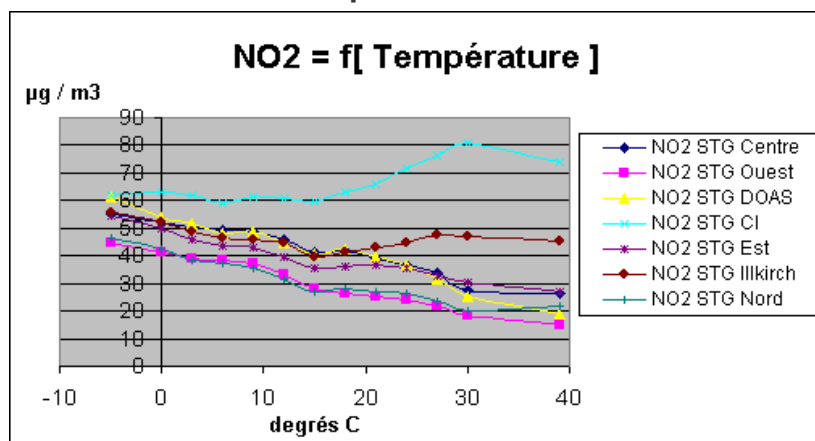


Figure 9 : moyennes de NO₂ en fonction de la température

Lorsque la température augmente, les concentrations baissent pour les stations de fond ; à la différence des 2 stations de proximité automobile (STG-CI. et Illkirch) où par contre, les niveaux augmentent avec la température.

On considère donc pour les stations de fond 2 classes de température de part et d'autre de 12°C.

4.4.5.3 Influence de la température sur O₃

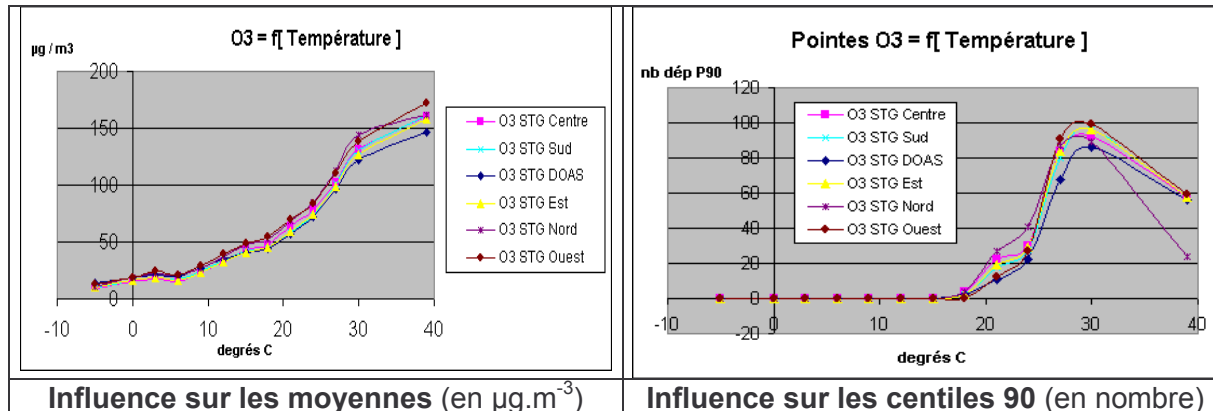


Figure 10 : moyennes et pointes de O₃ en fonction de la température

On constate une très forte similitude entre les 6 stations. Une élévation de température entraîne une augmentation continue des moyennes des concentrations en O₃ sur l'ensemble de l'échelle des températures (figure 10 de gauche).

L'apparition des pointes est plus tranchée, au-delà de 20°C comme le montre la figure 10 de droite.

On considère donc 2 classes de part et d'autre de 20°C.

Le nombre de pointes de O₃ est plus faible entre 30 et 40°C ; il s'agit de 59 séquences tri-horaires enregistrées pendant les après-midi des jours de canicule en juillet / août 2003.

4.4.5.4 Influence de la température sur les PM2.5 et PM10

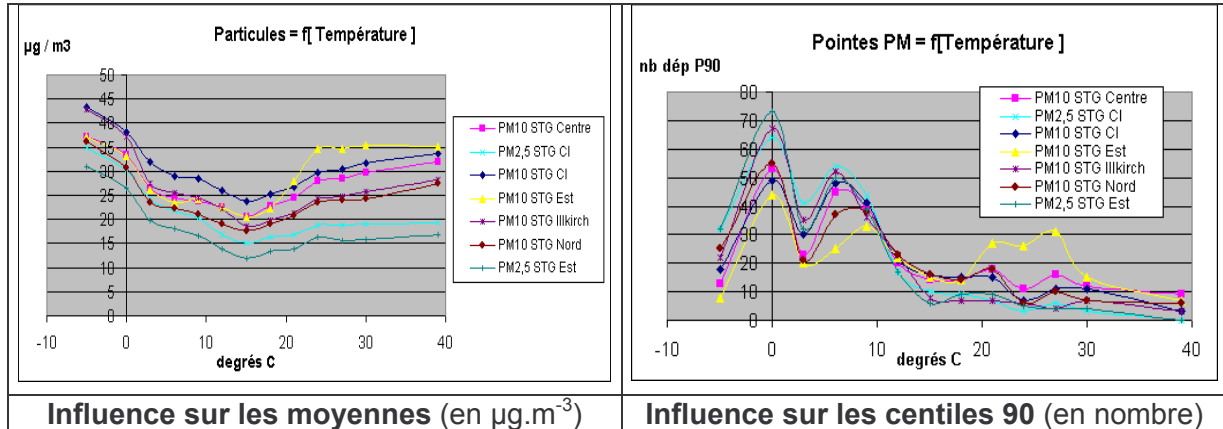


Figure 11 : moyennes et pointes de PM en fonction de la température

On observe une analogie entre les stations de mesure des PM. Une élévation de température entraîne une baisse des moyennes des concentrations jusqu'à 14 degrés environ ; puis elles augmentent jusqu'à 22°C et se stabilisent au-delà. Cela met en évidence une pollution hivernale et une pollution estivale.

L'effet de la température est différent sur l'apparition des pointes qui apparaissent entre 0 et 10 °C, et qui sont peu nombreuses pour les températures négatives et inexistantes pour les températures élevées (sauf STG-Est).

On choisit pour les moyennes une séparation en 2 classes, l'une entre 5 et 22°C et l'autre en dehors de cet intervalle.

Pour les pointes, on choisit une séparation en 2 classes de part et d'autre de 10°C.

4.5 Influence des paramètres temporels

4.5.1 Principe

Les concentrations en polluants sont également fonction des périodes où ont eu lieu les émissions, reflète des activités humaines, **l'heure dans la journée, la journée dans la semaine** et le moment dans l'année.

Note : le moment dans l'année est en fait l'influence saisonnière sur les polluants d'origine non industrielle ; il n'est pas traité ici directement mais par l'influence de la température.

4.5.2 Influence de l'heure (variations trihoraires)

On calcule pour chaque ensemble de séquences de 3 heures et par station, les moyennes de chaque polluant. Cette influence temporelle sur les polluants est représentée sur les graphiques suivants. L'influence sur les apparitions des pointes est similaire et n'a donc pas été reportée ici.

4.5.2.1 Influence de l'heure de la journée sur NO

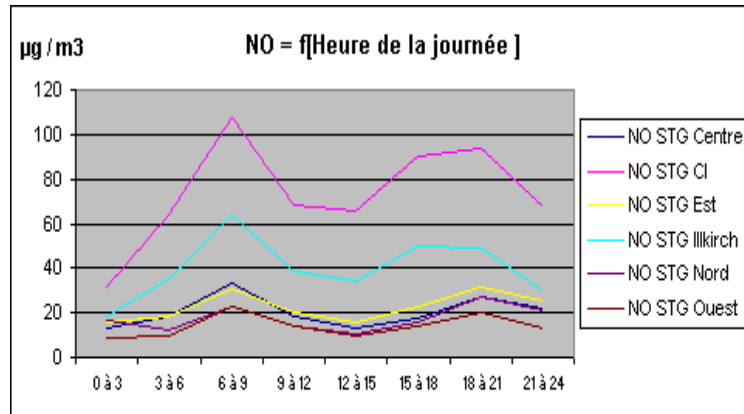


Figure 12 : moyennes de NO en fonction de l'heure de la journée

On observe une analogie certaine entre les stations avec les pointes en NO de 6 à 9 heures et entre 15 à 21 heures; On distingue nettement les 4 stations de fond des 2 de proximité automobile. On définit 2 classes de mesures :

classe 1 : de 21h à 6h et de 9h à 15h et classe 2: de 6h à 9h et de 15h à 21h.

4.5.2.2 Influence de l'heure de la journée sur O₃

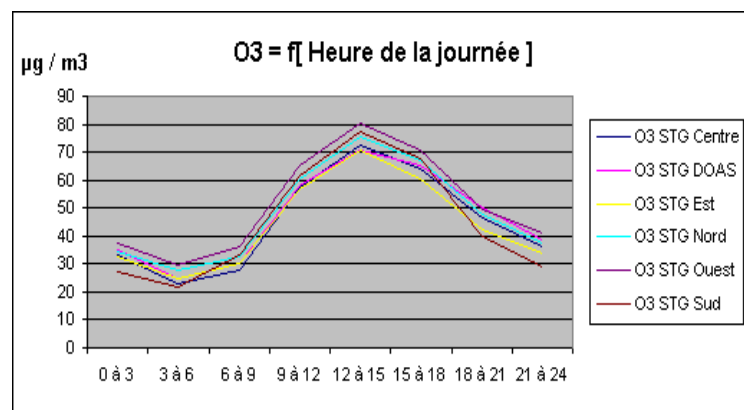


Figure 13 : moyennes de O₃ en fonction de l'heure de la journée

On observe une analogie certaine entre les 6 stations. Les niveaux élevés de 9h à 18 heures en O₃ définissent la séparation en 2 classes :

Classe 1 : de 18h à 9h et Classe 2 : de 9h à 18 h.

4.5.3 Influence du jour de la semaine

On calcule pour chacun des 7 jours, les moyennes de chaque polluant par station. Cette influence temporelle sur les polluants est représentée sur les graphiques suivants. L'influence sur les apparitions des pointes est similaire et n'est pas reportée ici.

4.5.3.1 Influence du jour de la semaine sur NO

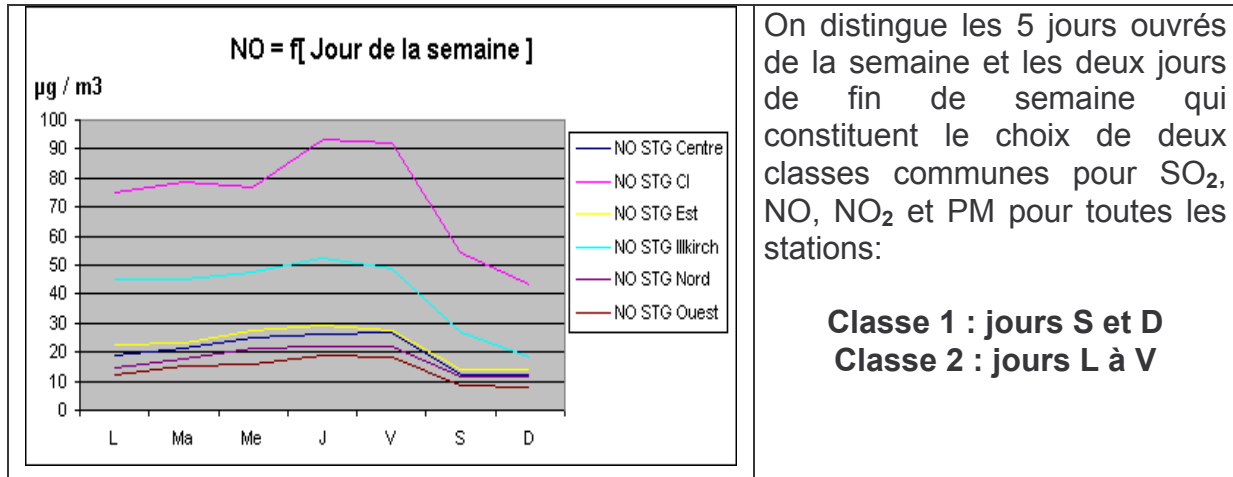


Figure 14 : NO en fonction du jour de la semaine

4.5.3.2 Influence du jour de la semaine sur O₃

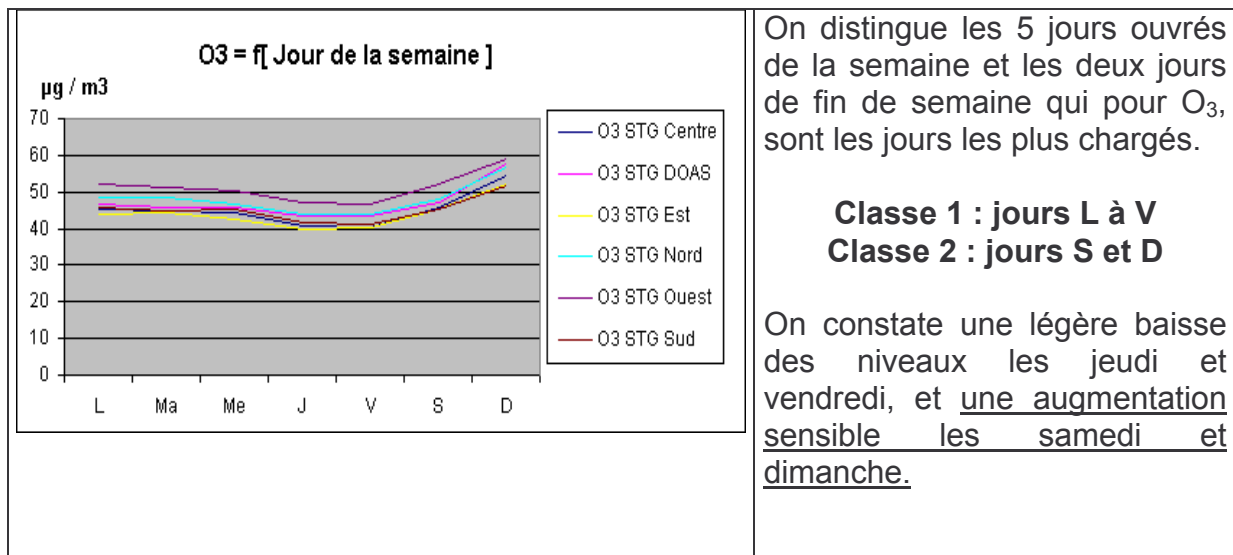


Figure 15 : O₃ en fonction du jour de la semaine

5. APPLICATION DE LA NORME ISO 9359

5.1 Bilan complet des influences des paramètres pour Strasbourg

Le tableau ci-dessous récapitule les degrés d'influence des paramètres pris en compte appliqués aux données de Strasbourg en 2003.

Les moyennes des données tri-horaires de base ont été calculées pour chaque classe de paramètre et pour chaque polluant.

Tableau 2 : récapitulatif des classes de paramètres d'influence favorisant des valeurs moyennes élevées à STRASBOURG

Paramètres D'influence	Polluants considérés				
	SO ₂	NO	NO ₂	O ₃	PM
Origine du vent en degrés	Sans effet notable	60 à 280	Sans effet notable	20 à 50 130 à 160 310 à 330	Sans effet notable
Vitesse du vent m/s	0 à 1,5	0 à 1,5	0 à 1,5	> 2,5	0 à 1,5
Température	< 10 °C	< 10 °C	< 12 °C	> 20 °C	< 5 °C et > 22 °C
Heure TU	6 à 12 et 18 à 21	6 à 9 et 15 à 21	6 à 9 et 15 à 21	9 à 18	6 à 9 et 18 à 24
Jour de la semaine	1 à 5 sauf O ₃ : 6 et 7				

D'autres paramètres ont également une influence sur les concentrations en polluants : *la pression atmosphérique, la hauteur de la couche de mélange, la pluviométrie, la nébulosité, les radiations solaires, ...*, mais n'ont pas été traités dans cette étude. En effet, on peut se limiter aux 5 paramètres du tableau 2 car il existe une synergie entre ces 5 paramètres et ceux qui n'ont pas été retenus ; à titre d'exemple :

- les températures élevées sont souvent liées à un ensoleillement important, à l'absence de pluie, à des hautes pressions, etc ..., qui contribuent à la même action sur les polluants,
- la direction du vent n'a d'importance que pour les mesures en zone industrielle, ce qui n'était pas le cas à Strasbourg.

5.2 Bilan complet des influences des paramètres pour d'autres villes

Les études similaires précédentes dans d'autres villes ont été basées sur la stratification suivante :

Tableau 3 : récapitulatif des classes de paramètres d'influence favorisant des valeurs tri-horaires élevées dans plusieurs villes

VILLES	Vitesse du vent (m.s ⁻¹) (toutes données)	Température (degrés) (SO ₂ , NO _x)	Température (degrés) (O ₃)	Température (degrés) (PM ₁₀)
Marseille	< 3	< 8	> 20	
Toulon	< 2	< 12	> 20	< 10 et > 20
Toulouse	< 1,5	< 10	> 20	< 2 et > 20
Le Havre	< 3	< 6	> 18	< 8 et > 20
Strasbourg	< 1,5	< 10	> 20	< 5 et > 22

Les paramètres temporels (heures et jours) sont les mêmes dans chaque ville. Ce bilan montre que l'on pourrait pratiquer à peu près le même schéma de stratification dans chacune des villes considérées.

5.3 Stratification des séquences tri-horaires de mesure

CETTE ETAPE EST INDISPENSABLE ET OBLIGATOIRE

Il convient de disposer sur l'année utilisée pour la pré-étude éventuelle, et pour l'année incluant les campagnes de mesure, du maximum de données de vitesse de vent et de température.

On complète cette base de données en affectant de la valeur de classe « 2 », les séquences tri-horaires correspondant pour chaque polluant aux conditions fixées dans le tableau 2, et de la valeur « 1 » pour toutes les autres.

Ensuite, pour chaque séquence de 3 heures pour chaque polluant, on calcule la somme « Σ » des nombres de classes « 2 » simultanées correspondant aux paramètres générateurs de concentrations élevées, soit « $\Sigma = 0 \text{ à } 4$ ».

Note 1 : la direction du vent n'est pas prise en compte en milieu urbain, sinon « $\Sigma = 0 \text{ à } 5$ ».

Note 2 : pour simplifier la méthode, on a attribué par pure hypothèse une importance égale à chacun des paramètres d'influence pris en compte ; on pourrait affiner la stratification en pondérant les influences des divers paramètres. On peut en effet imaginer une hiérarchie des influences dans cet ordre décroissant : *la température, la vitesse du vent, les jours ouvrés ...*

On définit ensuite 3 strates dans lesquelles on ventile les séquences selon le modèle suivant :

Strate 1 : $\Sigma = 0 \text{ et } 1$, Strate 2 : $\Sigma = 2$, Strate 3 : $\Sigma = 3 \text{ et } 4$.

Note 3 : ce choix permet d'avoir des strates contenant des nombres de séquences les plus voisins

possibles ; la norme ISO 9359 préconise de limiter à 3 ou 4 le nombre de strates, car un nombre plus élevé n'est plus efficace pour la réduction des écarts types, et réduirait trop les nombres de mesures par strate, à fortiori encore plus lors de campagnes courtes.

Exemple d'application :

le tableau 2 a montré que les concentrations en NO sont plus élevées lorsque :

- la vitesse du vent est $< 1,5$ m/s,
- ou la température est $< 10^{\circ}\text{C}$,
- ou de 6 à 9h et de 15 à 21h,
- ou du lundi au vendredi.

Dans le cas d'une séquence de mesure où ces 4 paramètres sont simultanément dans cet état (classe « 2 »), cette séquence sera ventilée dans la strate 3. Si cette séquence était intervenue un dimanche, elle serait encore dans la strate 3. Mais si le vent avait en plus une vitesse $> 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la séquence serait alors ventilée dans la strate 2. Si en plus, la température était de $> 10^{\circ}\text{C}$, elle passerait en strate 1.

5.4 Calculs des moyennes et des nombres de dépassement par strate

On calcule ensuite pour chaque strate, les moyennes des données de pollution et les nombres de dépassement de seuils prédéfinis, par polluant et par station. Grâce à la stratification, on obtient, des groupes de données plus centrées autour de leurs moyennes respectives, et donc affectées d'écarts type réduits par rapport à celui de la population totale des données.

Ces calculs sont réalisés dans 3 cas de figure :

- sur une base annuelle complète de données lors de tests de la méthode de reconstitution, en simulant des campagnes en prélevant une partie de la base, **C'EST LE CAS DANS CETTE ETUDE**,
- sur une base annuelle antérieure dans une zone de mêmes caractéristiques météorologiques que celle où est prévue une campagne, cela permet d'estimer la durée totale des campagnes à réaliser pour une incertitude prédéterminée, et les nombres de séquences de mesure par strate, **UTILE MAIS NON OBLIGATOIRE**
- sur les données issues des campagnes, **OBLIGATOIRE**.

Si l'utilisateur admet que la méthode est applicable à l'ensemble d'une zone élargie qu'il juge homogène, et à d'autres années que celle qu'il a étudiée, il n'aura pas à refaire la pré-étude à l'avenir. Les connaissances dont il dispose sur ses propres conditions locales sont peut-être suffisantes pour qu'il n'ait pas à faire de pré-étude des influences pour créer ses strates.

Ces calculs (formulaire en annexe A) sont automatisés sur un classeur EXCEL créé pour cet usage, disponible sur demande et explicité en annexe B.

5.5 Durée des campagnes

Les reconstitutions de moyennes et de nombres de dépassements de seuils nécessitent un nombre minimum de séquences de mesure pour une incertitude pré-définie. L'étude est basée sur une incertitude choisie de +/-10%.

Note : les calculs (classeur EXCEL) fournissent les nombres de séquences de 3 heures à réaliser.

Le tableau 4 indique pour chaque ville traitée, selon les stations considérées et par polluant, les nombres « **mini à maxi** » de semaines de campagnes à réaliser. Le choix de la semaine comme base de travail se justifie par les influences variées des 7 jours hebdomadaires, et par le fait qu'une campagne de mesure pour des raisons logistiques est rarement inférieure à cette durée.

Tableau 4 : Nombres de semaines requises pour les campagnes

	SO ₂	NO	NO ₂	O ₃	PM 10
Marseille 1998	4 à 6	6 à 7	2 à 3	2 à 3	
Toulon 2000	4 à 5	8 à 17	2 à 4	1 à 2	2 à 3
Toulouse 2001	4 à 8	3 à 15	1 à 2	1 à 2	2 à 3
Toulouse 2002	3 à 5	3 à 15	1 à 2	1 à 2	2 à 3
Le Havre 2002	13 à 15	10 à 12	2 à 3	1 à 2	2 à 3
Strasbourg 2003	2 à 10	10 à 12	1 à 2	3 à 4	2 à 4

A titre d'exemple pour expliciter ce tableau, à Marseille en 1998, les 3 stations de mesure de SO₂ prises en compte requéraient de 4 à 6 semaines de mesure.

La disparité entre les nombres de semaines requises dépendent des écarts types obtenus, et des étendues de mesure de chaque polluant, liés à la variabilité temporelle de ce dernier.

Les nombres de semaines les plus élevés requis pour SO₂ (au Havre et à Strasbourg) correspondent à des stations de proximité industrielle ; ceux requis pour NO correspondent à des stations de proximité automobile ; dans les deux cas, l'étendue de mesure est très large. Les nombres de semaines requis pour NO₂, O₃ et PM10 sont en général plus faibles pour des raisons inverses, c'est-à-dire correspondant à des étendues de mesure étroites liées à des pollutions de fond de variabilité temporelle plus faible.

Si l'on considère que lors de campagnes, on mesure plusieurs polluants en même temps, on va considérer que :

LA DUREE MINIMALE CUMULEE DES CAMPAGNES SERA DONC DE 4 SEMAINES MINIMUM EN SITUATION DE FOND,

ET D'AU MOINS 12 SEMAINES EN SITUATION DE PROXIMITE POUR SO₂ ET NO.

6. SIMULATION DE CAMPAGNES DE MESURE

Ces nombres théoriques sont destinés à suggérer à l'utilisateur un ordre de grandeur des nombres de mesures à effectuer par strate et donc par type de conditions, ce qui signifie que le planning doit être préparé selon des prévisions météorologiques propices aux hautes concentrations en polluant considéré, ozone en été, SO₂ en hiver, etc ..., périodes de vent faible, directions de vent spécifiques.

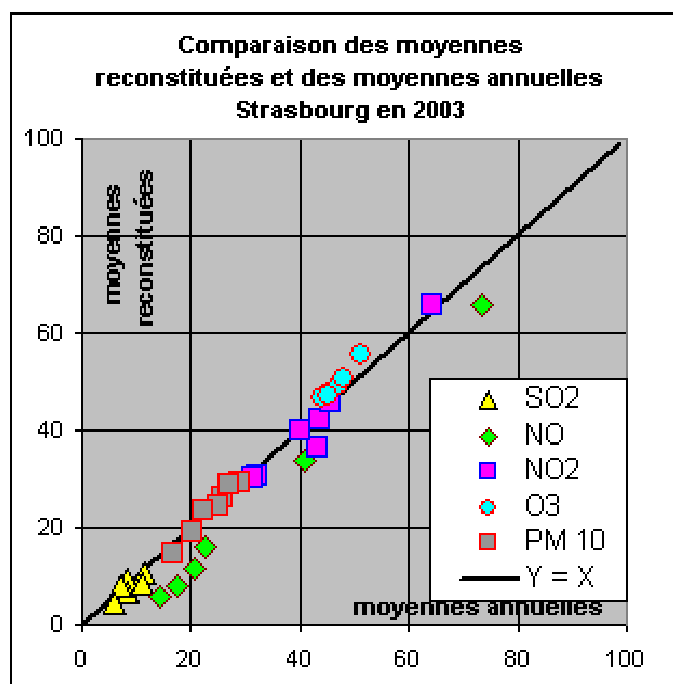
En réalité, les campagnes de mesure se programment en général trop longtemps à l'avance pour que des prévisions météorologiques fiables soient disponibles ; il semble alors judicieux de faire des campagnes de 4 à plus de 12 semaines étalées dans l'année (cf §4.5), de durées suffisantes pour espérer inclure les périodes les plus propices.

6.1 Strasbourg

6.1.1 Campagnes de 4 semaines

Une simulation a été réalisée en prélevant dans la base de données les 4 premières semaines de mesure du début de chaque trimestre (soit donc 28 jours au total), avec des valeurs communes des paramètres pour tous les polluants, mais avec une variante pour la température pour les PM10.

Les figures 16 et 17 présentent ces résultats.



Les valeurs de SO₂ sont toujours très faibles en zone urbaine et sont donc peu significatives.

On constate une sous-estimation des reconstitutions des moyennes de NO, surtout pour les niveaux faibles (<20µg.m⁻³).

Les moyennes de O₃ sont légèrement surestimées.

Les reconstitutions des moyennes de NO₂ et de PM sont très acceptables.

Figure 16 : reconstitutions de moyennes à Strasbourg (en µg.m⁻³)

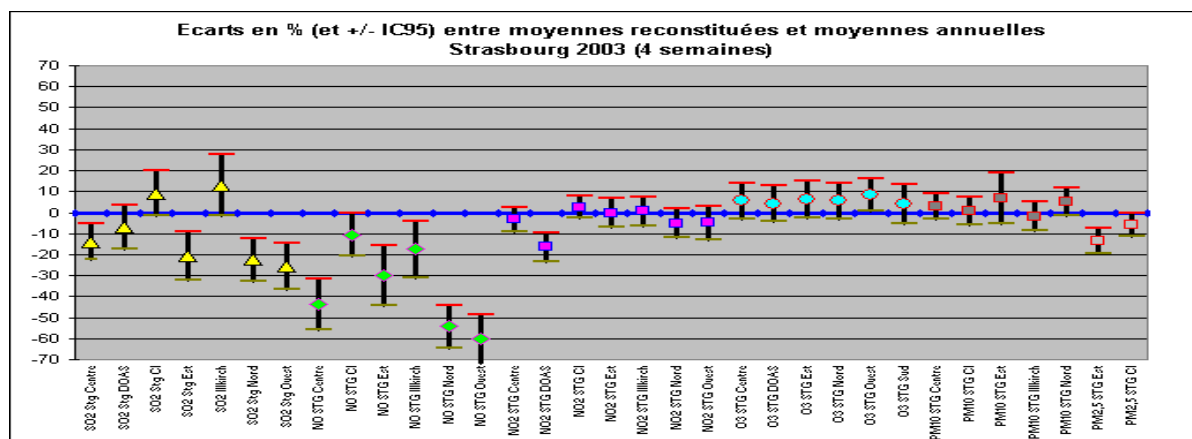


Figure 17: reconstitutions de moyennes à Strasbourg en écarts relatifs (en %)

Les reconstitutions des moyennes annuelles sont acceptables si leurs intervalles de confiance courent la valeur zéro (en trait gras sur la figure 17).

Note : les plus mauvais résultats obtenus correspondent aux 4 stations de mesure de fond de NO où les niveaux étaient faibles.

Tableau 5 : reconstitution des moyennes annuelles en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

	Nombre de jours de campagne requis d'après l'étude initiale	Nombre de jours réalisés et validés	Moyenne annuelle réelle	Moyenne reconstituée	Ecart relatif
			Ma	Mr	(Mr – Ma)
		Sur 28	en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	en %
SO2 Stg Centre	18	27	8,5	7,3	-14,1 %
SO2 Stg DOAS	13	22	11,4	10,6	-7,7 %
SO2 Stg CI	22	26	8,4	9,1	10,1 %
SO2 Stg Est	17	21	8,3	6,6	-20,2 %
SO2 Illkirch	23	27	7,0	7,9	12,2 %
SO2 Stg Nord	29	23	6,0	4,6	-17,8 %
SO2 Stg Ouest	65	25	11,1	8,3	-24,9 %
NO STG Centre	61	22	20,6	11,6	-36,6 %
NO STG CI	27	28	73,5	65,7	-9,3 %
NO STG Est	70	23	22,5	15,8	-23,9 %
NO STG Illkirch	41	26	40,8	33,7	-14,3 %
NO STG Nord	69	22	17,3	7,9	-48,8 %
NO STG Ouest	77	17	14,2	5,7	-55,5 %
NO2 STG Centre	5	27	43,7	42,3	-2,6 %
NO2 STG DOAS	7	22	43,4	36,3	-14,5 %
NO2 STG CI	5	28	64,2	65,9	2,3 %
NO2 STG Est	7	24	39,9	39,8	1,8 %
NO2 STG Illkirch	7	28	45,5	45,8	1,3 %
NO2 STG Nord	7	27	32,3	30,6	-3,9 %
NO2 STG Ouest	9	28	31,5	30,0	-4,5 %
O3 STG Centre	19	27	45,1	47,6	7,7 %
O3 STG DOAS	16	21	47,2	49,2	5,6 %
O3 STG Est	18	24	44,0	46,8	6,5 %
O3 STG Nord	16	27	48,1	50,8	7,4 %
O3 STG Ouest	15	28	51,3	55,6	10,9 %
O3 STG Sud	19	27	45,1	46,9	6,1 %
PM10 STG Centre	10	27	25,6	26,4	1,3 %
PM10 STG CI	11	27	29,1	29,3	-0,1 %
PM10 STG Est	16	24	27,0	28,8	10,0 %
PM10 STG Illkirch	12	26	24,9	24,4	-1,7 %
PM10 STG Nord	11	27	22,3	23,4	3,8 %
PM2,5 STG Est	14	23	16,8	14,5	-12,9 %
PM2,5 STG CI	12	28	20,0	18,9	-6,1 %

Pour les mesures de NO₂, O₃ et PM dans presque toutes les stations, le tableau 5 montre qu'une campagne totale de 28 jours est suffisante car elle dépasse les nombres de jours requis pour l'incertitude de 10% choisie pour les reconstitutions (zones grisées du tableau). Pour NO, seulement 1 station sur 6 est dans ce cas. Pour SO₂, seulement 2 sur 7, mais les niveaux rencontrés sont si faibles que les écarts relatifs ne sont pas significatifs.

La figure 18 présente les résultats de reconstitutions de nombre de dépassement de seuil.

Ces reconstitutions des nombres de dépassement du centile 90 sont acceptables si leurs intervalles de confiance recoupent la valeur 10% (en trait gras).

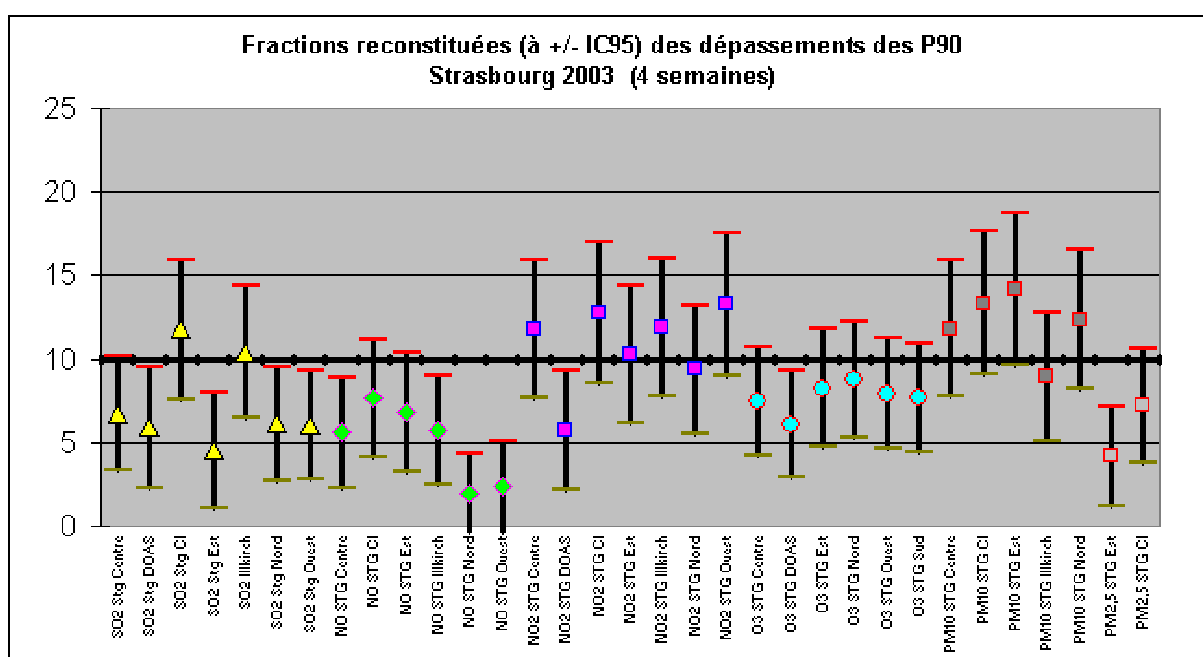


Figure 18: reconstitutions de nombres de dépassements en écarts relatifs (%)

On rappelle que ce choix des centiles 90 a été fait pour tester la méthode en étant certain d'approcher les 10% de dépassements. Ces résultats réalisés seraient certainement moins bons sur des dépassements de valeurs limites, peu nombreux pour les stations de proximité automobile, et même inexistantes pour les stations de fond.

6.1.2 Campagnes de 4 quinzaines

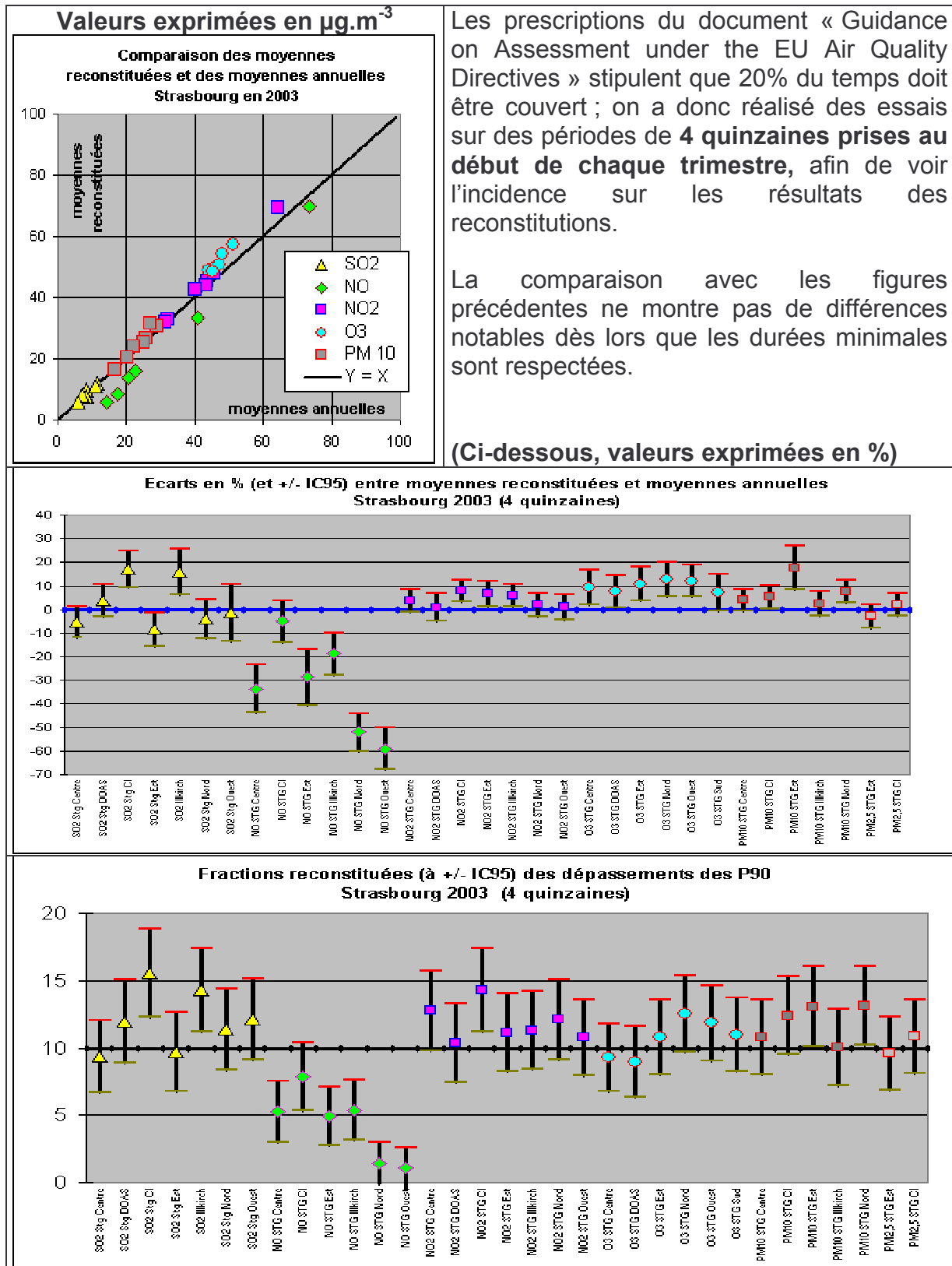
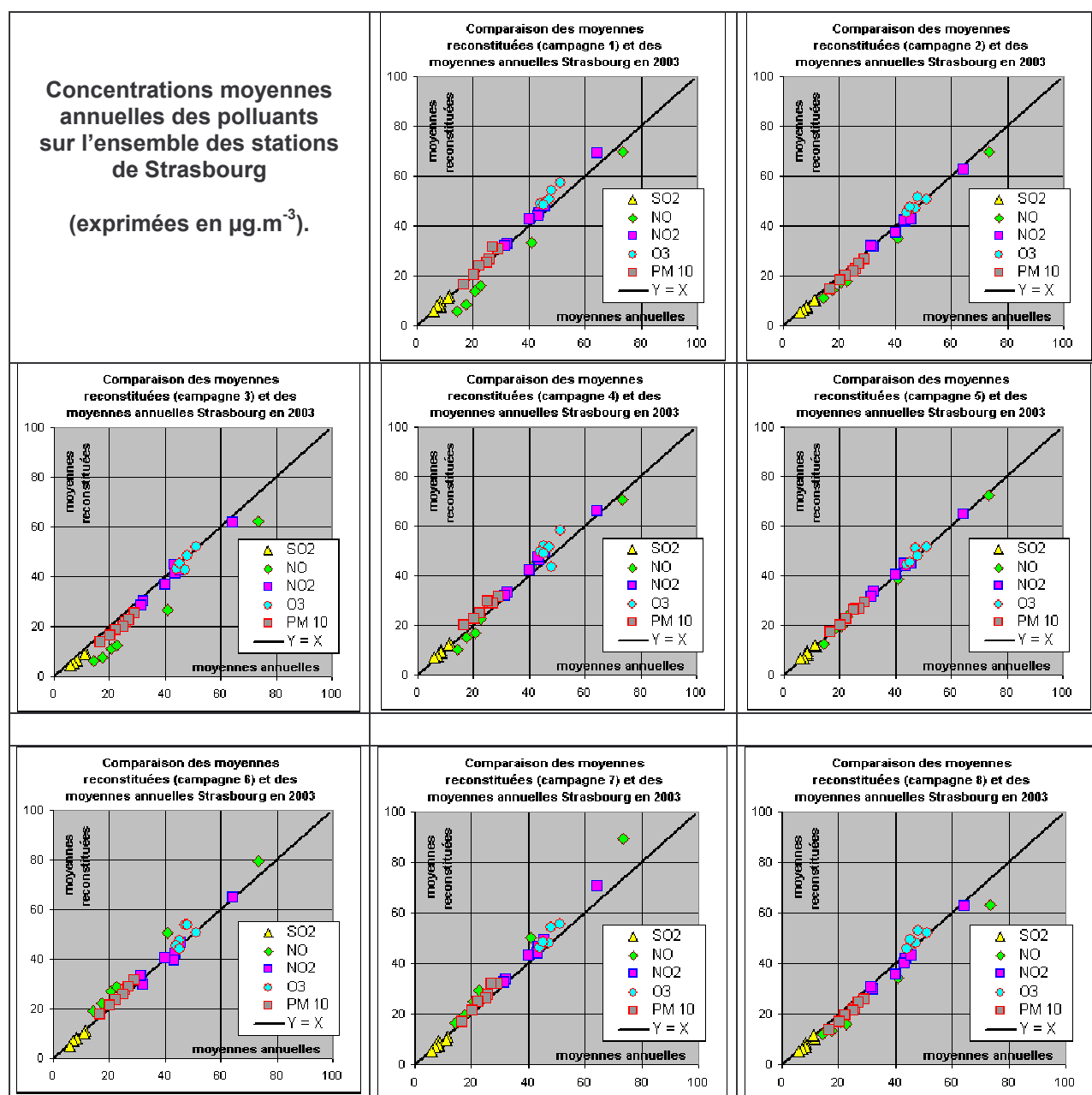


Figure 19: reconstitution avec des campagnes de 4 quinzaines

6.1.3 Campagnes de 4 quinzaines glissantes

Afin de déterminer l'incidence du choix des dates de campagnes, des simulations de campagnes de 4 quinzaines ont été refaites en décalant 7 fois les dates d'une quinzaine, ce qui conduit à 8 simulations représentées sur la figure 20.



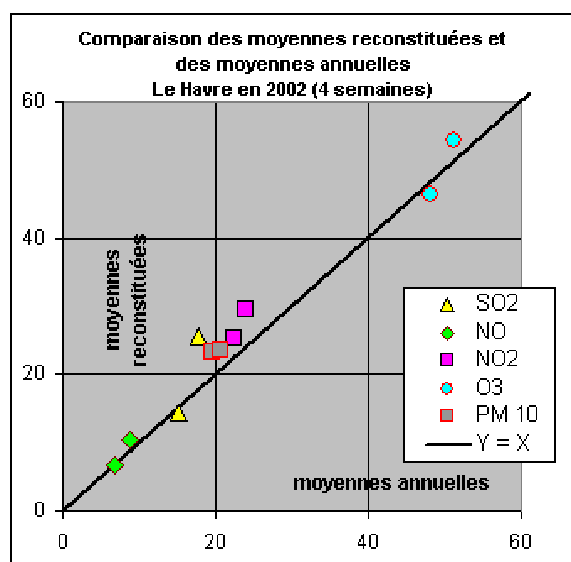
L'examen de ces graphiques montre que les simulations donnent de bons résultats quelle que soit la date des campagnes pour : SO_2 (toujours faible), NO_2 et PM ; pour O_3 , on constate une tendance à la surestimation des moyennes, et pour NO , les reconstitutions sont de qualité variable, bonnes ou surestimées ou sous estimées.

6.2 Le Havre

La même méthodologie a été appliquée aux données issues des deux stations « Herriot » et « Mare rouge » au Havre en 2002 et a donné les résultats synthétisés ci-après.

6.2.1 Campagnes de 4 semaines

Une simulation a été réalisée en prélevant dans la base de données les 4 premières semaines de mesure du début de chaque trimestre (soit donc 28 jours au total), avec des valeurs communes des paramètres pour tous les polluants, mais avec une variante pour la température pour les PM10. Les figures 21 et 22 présentent ces résultats.



On constate sur l'ensemble des 2 figures une surestimation de la reconstitution des moyennes de plus de :

- 20% pour SO₂ à Mare Rouge,
- 12% pour NO₂ à Herriot,
- 12 et 4 % pour PM10 aux 2 stations.

Celles de NO et de O₃ sont très acceptables pour les 2 stations, ainsi que SO₂ à Herriot. Celle de NO₂ à Mare rouge est à la limite d'acceptabilité.

Figure 21: reconstitutions de moyennes au Havre (en µg.m⁻³)

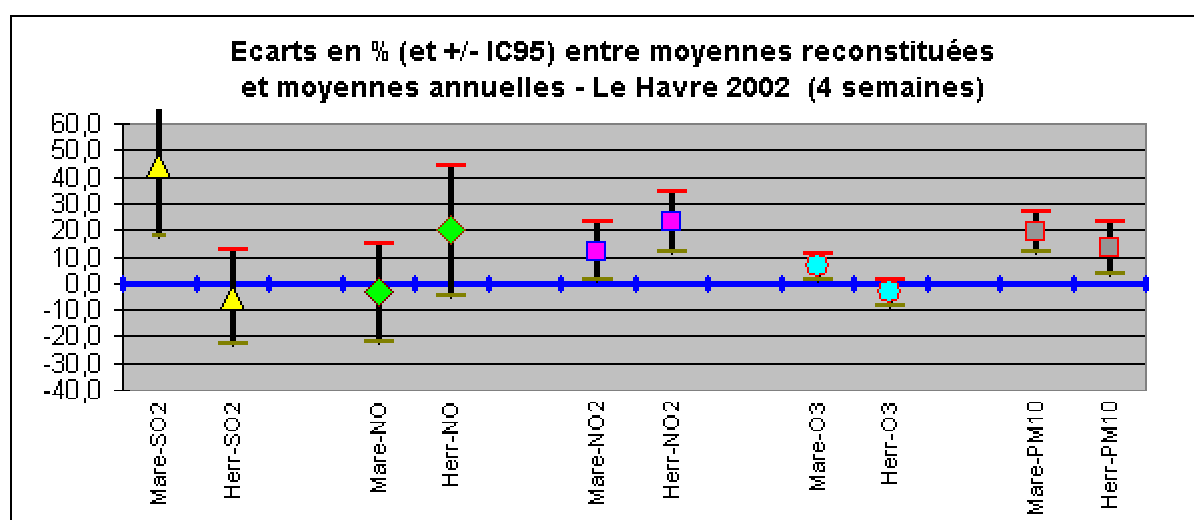


Figure 22: reconstitutions de moyennes au Havre en écarts relatifs (en %)

Les reconstitutions des moyennes annuelles sont acceptables si leurs intervalles de confiance courent la valeur zéro (en trait gras sur la figure 22).

Tableau 6: reconstitution des moyennes annuelles en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

	Nombre de jours de campagne <u>requis d'après l'étude initiale</u>	Nombre de jours <u>réalisés et validés</u>	Moyenne annuelle réelle <u>Ma</u>	Moyenne reconstituée <u>Mr</u>	Ecart relatif <u>(Mr – Ma)</u>
		Sur 28	en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	en %
SO ₂ Mare rouge	104	28	17,7	25,6	30,7
SO ₂ Herriot	84	23	15,2	14,4	-5,6
NO Mare rouge	67	18	6,8	6,6	-3,5
NO Herriot	64	22	8,8	10,5	16,7
NO ₂ Mare rouge	13	25	22,4	25,2	10,9
NO ₂ Herriot	14	28	24,0	29,5	18,7
O ₃ Mare rouge	6	27	51,1	54,3	5,9
O ₃ Herriot	6	27	48,1	46,5	-3,5
PM10 Mare rouge	9	28	19,5	23,3	16,3
PM10 Herriot	11	27	20,8	23,5	11,7

Les résultats insuffisants correspondent aux reconstitutions des stations SO₂-Mare, NO₂-Herriot et PM10-Mare, toutes surestimées, en grisé sur le tableau 6.

Pour l'incertitude de 10% choisie pour les reconstitutions, ce tableau montre qu'une campagne totale de 28 jours peut être est suffisante pour certaines stations, mais pas pour d'autres ; même le respect du nombre de jours requis peut conduire à des résultats insatisfaisants. Cela est le cas plus difficile de reconstitution des moyennes issues des stations de surveillance industrielle, dont les mesures sont moins liées aux paramètres météorologiques que les stations de fond ou de trafic.

La figure 23 présente les résultats de reconstitutions de nombre de dépassement de seuil.

Ces reconstitutions des nombres de dépassement du centile 90 sont acceptables si leurs intervalles de confiance recourent la valeur 10% (en trait gras).

On rappelle que ce choix des centiles 90 a été fait pour tester la méthode en étant certain d'approcher les 10% de dépassements. Ces résultats réalisés seraient certainement moins bons sur des dépassements de valeurs limites, peu nombreux pour les stations de proximité automobile, et même inexistantes pour les stations de fond.

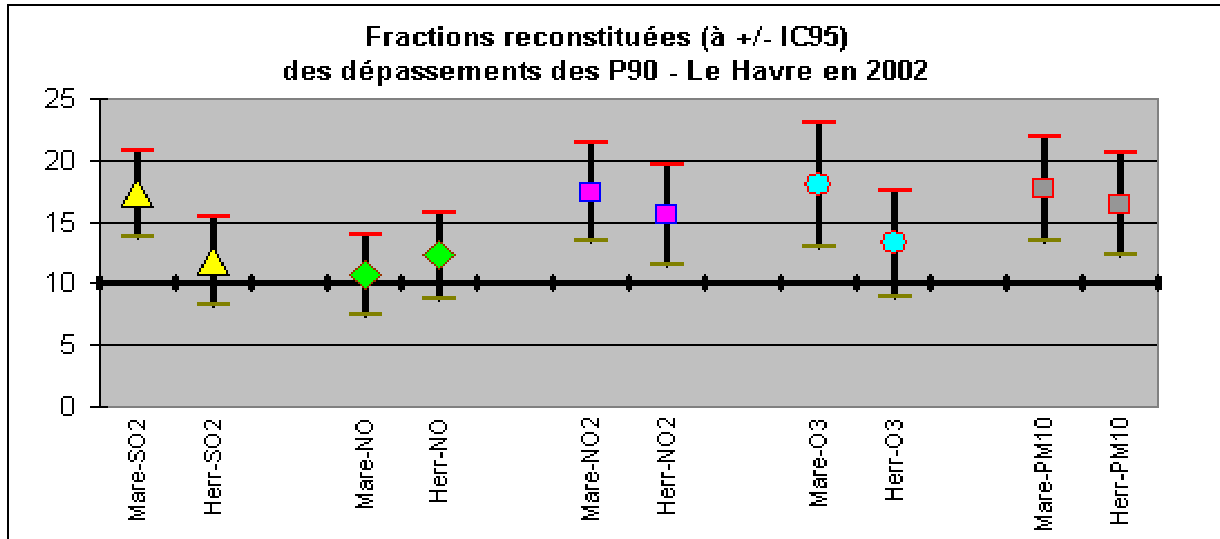


Figure 23: reconstitutions de nombres de dépassements en écarts relatifs (%)

On voit sur la figure 23 que les reconstitutions de nombres de dépassement du centile 90 ne sont bonnes que pour SO₂-Herriot, les 2 stations NO et O₃-Herriot.

Il est nécessaire de rappeler que les strates ont été déterminées pour les reconstitutions de moyennes et non pas pour les dépassements de seuils.

Cela montre que la stratification ne peut pas être la même dans les deux cas. La stratégie d'utilisation de moyens mobiles doit donc être définie au préalable pour reconstituer soit les moyennes ou les dépassements de seuils prédéfinis.

6.2.2 Campagnes de 4 quinzaines

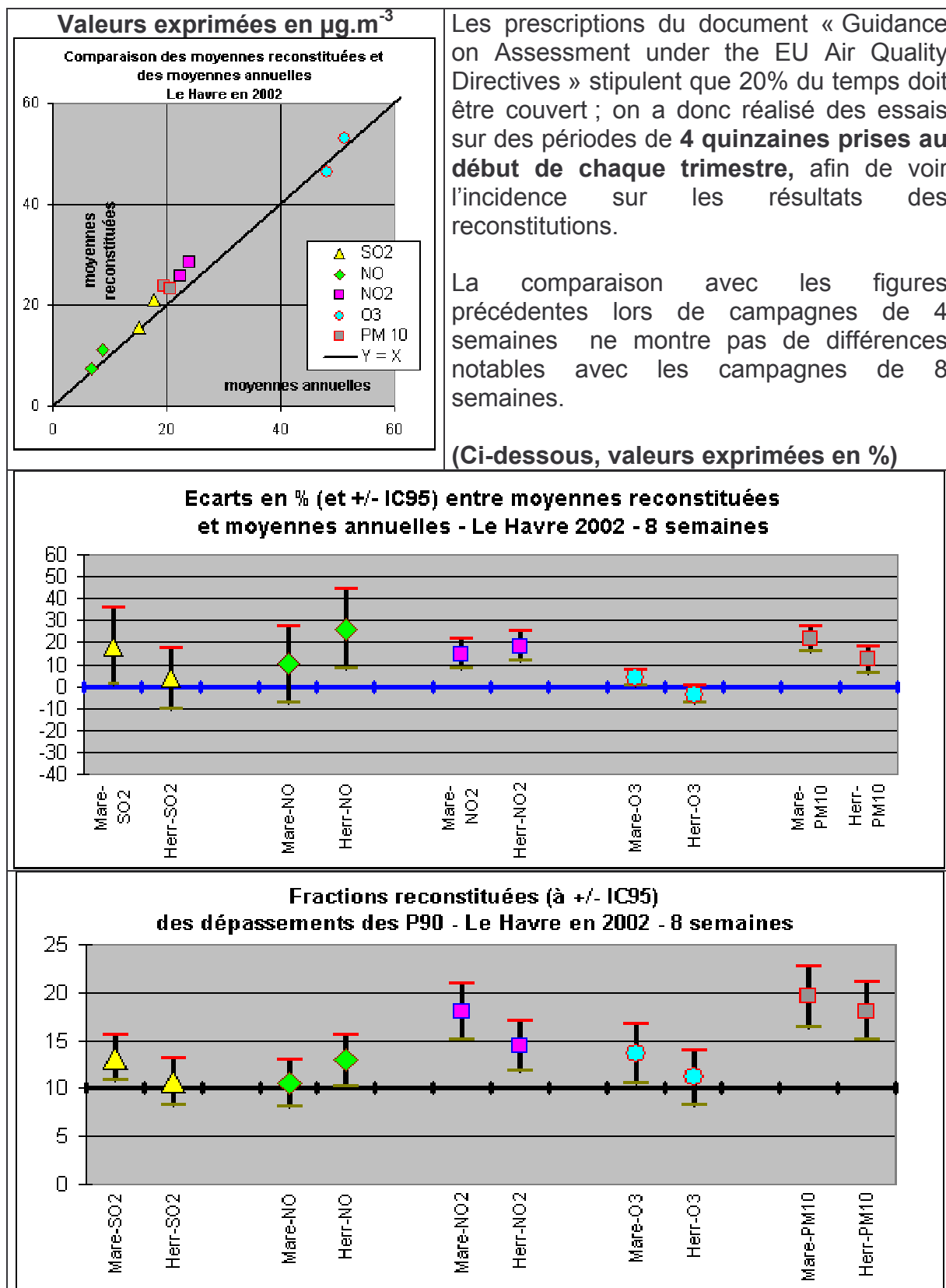


Figure 24: reconstitution avec des campagnes de 4 quinzaines

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La pré-étude sur les liens entre la météorologie et les données de pollution atmosphériques présente déjà en elle-même un intérêt qui s'étend au-delà des campagnes mobiles de mesure. Elle peut constituer après quelques développements une étude à part entière sur les données d'une ville, d'une zone ou d'une région.

Il ressort des pré-études réalisées sur des données de plusieurs années consécutives à Lille, Marseille, Toulon et Toulouse, que les roses des vents et les roses de pollution sont assez reproductibles d'une année à l'autre, rendant ainsi peu utile de les refaire. Elles sont néanmoins très utiles lorsque l'on ne connaît pas exactement les limites des classes de vitesse de vent et de température. Il apparaît utile également de connaître les étendues géographiques où ces limites de classe prévalent.

L'application de la norme ISO 9359 aux données des villes mentionnées ci-dessus ainsi que au Havre et à Strasbourg, apporte des éléments de réponse sur la mise en œuvre de campagnes de mesures ponctuelles et sur le traitement possible des données qui en sont issues.

Afin de s'assurer de la robustesse statistique de la méthode, l'étude a été appliquée à d'autres simulations de campagnes, de durées différentes et à d'autres moments de l'année. La qualité des reconstitutions réalisées dépend néanmoins des niveaux de pollution mesurée lors des campagnes, soit trop faibles ou trop élevés, qui conduisent respectivement à des sous ou sur-estimations.

En effet, la qualité des résultats, quelle que soit la méthode utilisée, est limitée par la durée réduite des campagnes qui peut ne pas refléter totalement les événements se déroulant sur une année entière, comme surtout des pointes élevées de pollution pouvant être ratées, surtout en proximité industrielle et automobile. L'incidence est plus importante sur les reconstitutions de nombres de dépassement de seuil que sur celles des moyennes.

Les annexes A et B de ce rapport ainsi que le classeur EXCEL disponible auprès du LCSQA-EMD permettront aux AASQA qui le désirent d'appliquer la méthode décrite dans ce rapport à leurs propres données.

La norme ISO peut aussi être appliquée lorsqu'on ne dispose pas de données antérieures de pollution mais seulement d'observations météorologiques. Les travaux futurs s'orienteront vers ce cas de figure.

Cette méthodologie sera comparée avec la méthode des plans de sondage élaborée par l'INERIS et Atmo-Poitou-Charentes, afin de déterminer leurs différences et surtout leurs complémentarités pour améliorer in fine la stratégie de mesure à l'aide de moyens mobiles..

ANNEXE A – FORMULAIRE

FORMULAIRE DE L'ETUDE PREALABLE		
$i = 1 \text{ à } k$	Numéro de chaque strate	1
N	Nombre total de mesures	1
N_i	Nb de mesures dans la strate i	2
M_i	Nb de dépassements d'un seuil prédéfini dans la strate i	3
$w_i = \frac{N_i}{N}$ avec $\sum_{i=1}^k w_i = 1$	Fraction des données dans la strate i	4
$\bar{X}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} X_{ij}$	Moyenne arithmétique des N_i valeurs dans chaque strate i	5
$s_i^2(X_{ij}) = \frac{1}{(N_i - 1)} \sum_{j=1}^{N_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2$	Variance des N_i valeurs dans chaque strate i	6
$\bar{X} = \sum_1^k w_i \cdot X_{ij}$	Moyenne globale	7
$s^2(\bar{X}) = \left(\sum_{i=1}^k w_i \cdot s_i(x_{ij}) \right)^2$	Variance de la moyenne globale	8
$t = t_{v;1-\alpha}$	Coefficient de Student-Fisher unilatéral	9
$IC95(\bar{X}) = \frac{t \cdot s(\bar{X})}{\sqrt{N}} = \Delta(N)$	Intervalle de confiance à 95% de la moyenne globale	10
$\Delta(n) \geq \Delta(N)$	Marge d'erreur choisie pour une campagne courte à effectuer	11
$f_i = \frac{M_i}{M}$	Fraction de données supérieures à un seuil prédéfini dans la strate i	12
$n = \left(\frac{2t_{v;1-\alpha}}{\Delta(n)} \right)^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^k w_i s_i \right)^2$	Nombre théorique total (n) de mesures à réaliser lors d'une campagne courte pour Δ donné	13
$n_{i(x)} = n \frac{w_i s_i}{\sum_{i=1}^k w_i s_i}$	Nombre théorique de mesures à réaliser par strate pour la reconstitution d'une moyenne sur une plus longue durée pour Δ donné	14
$n_{i(f)} = n \frac{w_i \sqrt{f_i(1-f_i)}}{\sum_{i=1}^k w_i \sqrt{f_i(1-f_i)}}$	Nombre théorique de mesures à réaliser par strate i pour la reconstitution d'un nombre de dépassements de seuil sur une plus longue durée pour Δ donné	15

FORMULAIRE DE LA CAMPAGNE DE MESURE		
k, w_i	Données issues de l'étude préalable	16
$n, n_{i(x)}, n_{i(f)}$	Nombres de mesure réellement réalisées lors d'une campagne et reventilées dans chaque strate i	17
$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}$	Moyenne arithmétique des mesures dans chaque strate i	18
$s_i^2(x_{ij}) = \frac{1}{(n_i - 1)} \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$	Variance des mesures dans chaque strate i	19
$\bar{x} = \sum_{i=1}^k w_i \cdot \bar{x}_i$	Moyenne arithmétique pondérée des mesures dans chaque strate, valeur dite reconstituée	20
$s^2(\bar{x}) = \sum_{i=1}^k \frac{w_i^2 \cdot s_i^2(x_{ij})}{n_i}$	Variance de la moyenne pondérée	21
$IC95 = \pm t_{v;1-\alpha} \cdot s(\bar{x})$	Intervalle de confiance de la moyenne pondérée	22
$f_i = \frac{m_i}{n_i}$	Fraction de données supérieures à un seuil prédéfini dans la strate i obtenue lors de la campagne	23
$f = \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i$	Fraction pondérée reconstituée sur le long terme des données supérieures à un seuil prédéfini	24
$s_i^2(f_i) = f_i \cdot (1 - f_i)$	Variance de la fraction f_i par strate	25
$s^2(f) = \sum_{i=1}^k \frac{w_i^2 \cdot s_i^2(f_i)}{n_i}$	Variance de la fraction pondérée	26
$u = u_{1-\alpha}$	Valeur de la loi normale réduite	27
$IC95 = \pm s(f) \cdot u_{1-\alpha} + \frac{1}{2n}$	Intervalle de confiance de la fraction pondérée	28

ANNEXE B – METHODE DE CALCUL

Le classeur EXCEL est constitué des feuilles de calcul suivantes assorties de leurs modes d'emploi.

B1 – Feuille « stratification » (extraits partiels)

B1.1 – affectation, à chaque paramètre du N° de classe (1 ou 2 selon son degré d'influence), pour chaque séquence de mesure (ici exemple appliqué à SO₂)

Cette feuille contient la base tri-horaire des paramètres pris en compte, direction du vent DV, vitesse du vent VV, température T, séquence 3heures dans la journée (1 à 8) et jour de la semaine (1 à 7). En fonction des choix de classe (1 ou 2) de chaque paramètre, le tableau B-1 relatif à SO₂ dans cet exemple se remplit automatiquement des valeurs 1 ou 2.

Tableau B-1

Date	DV-3h	VV-3h	T-3h	heures	N°jours	classe VV pour SO ₂	classe T pour SO ₂	classe heure pour SO ₂	classe Jour pour SO ₂
01/01/03 03:00	76	1,32	1,6	1	3	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
01/01/03 06:00	115	0,32	1,9	2	3	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
01/01/03 09:00	278	1,04	2,66	3	3	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>
01/01/03 12:00	279	1,86	5,46	4	3	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>
01/01/03 15:00	278	2,51	9,13	5	3	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
01/01/03 18:00	273	3,36	9,16	6	3	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
01/01/03 21:00	274	4,04	9,96	7	3	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>
02/01/03 00:00	270	2,93	12,06	8	3	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
02/01/03 03:00	259	2,64	12,93	1	4	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
02/01/03 06:00	261	2,41	13,3	2	4	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>2</u>

B1.2 – Affectation d'un N° de strate (1 à 3) à chaque séquence et pour chaque polluant

Tableau B-2

Date	classe VV pour SO ₂	classe T pour SO ₂	classe heure pour SO ₂	classe Jour pour SO ₂	strate SO ₂	strate NO	strate NO ₂	strate O ₃	strate PM
01/01/03 03:00	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>1</u>	<u>3</u>
01/01/03 06:00	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>1</u>	<u>3</u>
01/01/03 09:00	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>1</u>	<u>3</u>
01/01/03 12:00	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
01/01/03 15:00	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>1</u>
01/01/03 18:00	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>2</u>	<u>1</u>
01/01/03 21:00	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
02/01/03 00:00	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
02/01/03 03:00	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
02/01/03 06:00	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>

A partir du tableau B-1, chaque cellule des colonnes « **strate SO₂ à strate PM** » du tableau B-2 se remplit automatiquement du numéro de la strate selon le nombre de paramètres en classe 2.

B1.3 – Nombres de données par strate pour les 5 polluants

A partir du tableau B-2, le tableau B-3 dénombre les séquences tri-horaires pour strate et pour chaque polluant. Ces valeurs sont indispensables pour les reconstitutions de moyennes et de nombres de dépassements de seuils prédéfinis ; ils sont automatiquement transmis sur les feuilles d'exploitation des campagnes.

Tableau B-3

N° de la strate	nb données strate SO ₂	nb données strate NO	nb données strate NO ₂	nb données strate O ₃	nb données strate PM
1	742	729	729	1931	466
2	1146	1192	1192	687	1222
3	1032	999	999	302	1232

B2 – Feuille « Calculs » (extrait partiel)

Tableau B-4

STRATES		Séquences utilisées	SEUILS (P90)	15,6	56,3	65	99,6	48	29
strate PM		Cp01	DATES	SO ₂ Stg Est	NO STG Est	NO ₂ STG Est	O ₃ STG Est	PM10 STG Est	PM _{2,5} STG Est
3		1	01/01/03 03:00	5	3,3	22	18,6	29	26,6
3		1	01/01/03 06:00	5,3	6,3	32,3	7	19,6	19
3		1	01/01/03 09:00	7,3	4,3	24,6	8,3	21,6	20,3
1			01/01/03 12:00						
1			01/01/03 15:00						
1			01/01/03 18:00						
2			01/01/03 21:00						
2		1	02/01/03 00:00	2,5	1	8,6	60,5	5,6	5
1		1	02/01/03 03:00	3	0	6,3	64,3	3,6	2,6
1		1	02/01/03 06:00	4	0,6	9,6	60	2	1,3
2		1	02/01/03 09:00	4,3	3,3	19,6	43	3,6	3
1		1	02/01/03 12:00	5	5,3	21,6	39,6	4,3	2,6

Cette feuille de calcul des moyennes et des nombres de dépassement de seuil nécessite les copiés-collés manuels vers le tableau B-4 :

colonne 1 : l'une des colonnes issues du tableau B-2 (ici : **strate PM**) ;

colonne 2 : le marquage des séquences à prendre en compte dans l'étude, soit toute l'année, ou comme les séquences issues de la campagne nommée ici **Cp01** ;

colonne 3 et suivantes : la base de données, soit annuelle pour une pré-étude, ou celles issues des campagnes; dans tous les cas, les données invalidées ou inexistantes doivent se traduire par des cellules soit vides ou marquées d'un « 0 ».

B3 – Bilan des calculs automatiques

B3.1 – Etude réalisée sur une base annuelle de données

Tableau B-5

SO2 Stg Est	NO STG Est	NO2 STG Est	O3 STG Est	PM10 STG Est	PM2,5 STG Est
COPIE MANUELLE DES CALCULS ANNUELS DU TABLEAU DE GAUCHE					
MOYENNES DES DONNEES PAR STRATE					
5,2	5,8	26,9	29,8	21,1	10,7
7,3	13,4	37,5	60,7	24,2	14,8
11,5	44,8	52,1	95,8	31,8	21,0
ECARTS TYPES DES DONNEES PAR STRATE					
3,4	7,5	13,6	26,3	20,2	6,2
4,9	23,1	17,9	40,7	16,7	8,8
8,2	59,4	20,6	42,0	21,9	13,1
NOMBRES DE DONNEES PAR STRATE					
711	674	710	1908	453	453
1114	1118	1164	680	1209	1203
1007	968	975	300	1217	1216
NOMBRES DE DEPASSEMENTS PAR STRATE					
6	2	14	27	27	3
59	41	72	122	87	64
216	231	194	139	173	213

B3.2 – Etude réalisée sur la base de données des campagnes

Tableau B-6

SO2 Stg Est	NO STG Est	NO2 STG Est	O3 STG Est	PM10 STG Est	PM2,5 STG Est
COPIE MANUELLE DES CALCULS CAMPAGNE DU TABLEAU DE GAUCHE					
MOYENNES DES DONNEES PAR STRATE					
5,3	5,7	27,4	27,6	17,8	11,8
7,6	11,9	36,7	67,0	25,1	16,2
12,7	48,9	53,8	97,7	31,8	20,9
ECARTS TYPES DES DONNEES PAR STRATE					
2,9	7,2	11,5	26,1	8,4	6,0
6,0	20,2	17,1	42,2	16,8	10,6
10,7	60,9	22,2	35,3	18,6	12,6
NOMBRES DE DONNEES PAR STRATE					
121	112	121	297	70	70
161	154	163	97	182	184
165	163	163	52	193	193
NOMBRES DE DEPASSEMENTS PAR STRATE					
0	1	1	4	0	0
11	3	9	22	15	15
41	44	33	28	24	27

Les résultats des tableaux B3.1 ou B3.2 sont copiés automatiquement sur les tableaux B4.1 et B4.2 .

B4 – Pré-étude annuelle

B4.1 – Reconstitution de moyennes

Tableau B-7

STRASBOURG 2003		SO2 Stg Est	NO STG Est	NO2 STG Est	O3 STG Est	PM10 STG Est	PM2,5 STG Est
MOYENNES ANNUELLES ET INCERTITUDES							
Moyenne annuelle	en µg/m3	8,3	22,5	39,9	44,0	27,0	16,8
Ecart-type annuel	en µg/m3	6,6	41,7	20,4	38,8	20,0	11,2
Intervalle de confiance en µg/m3	+/-	0,20	1,31	0,63	1,19	0,61	0,34
Intervalle de confiance en +/-%	Médiane = 2,0	2,4	5,8	1,6	2,7	2,3	2,0
AUTRES STATISTIQUES UTILES							
nombre de données validées (> 0)		2832	2760	2849	2888	2879	2872
Taux de fonctionnement en %		96	94	97	98	98	98
minimum		0,3	0,3	4,3	1,6	0,3	0,3
médiane		6,6	8,0	36,6	34,3	22,3	14,6
P75		10,6	22,1	50,6	65,0	33,0	21,3
P90		15,6	56,3	65,0	99,6	48,0	29,0
P95		20,8	96,6	75,3	124,5	61,0	37,3
maximum		65,0	484,0	183,3	219,0	312,6	92,6
CALCUL DES MOYENNES PAR STRATE							
Moyennes	m1	5,2	5,8	26,9	29,8	21,1	10,7
des données	m2	7,3	13,4	37,5	60,7	24,2	14,8
par strate	m3	11,5	44,8	52,1	95,8	31,8	21,0
ECARTS-TYPE REDUITS PAR STRATES							
Ecart-types des données par strate	S(X)1	3,4	7,5	13,6	26,3	20,2	6,2
	S(X)2	4,9	23,1	17,9	40,7	16,7	8,8
	S(X)3	8,2	59,4	20,6	42,0	21,9	13,1
Ecart-Type pondéré		5,7	32,0	17,7	31,3	19,4	10,2
NOMBRES DE MESURES PAR STRATE							
nombres de mesures ventilées par strate sur l'ensemble de l'année	N1	711	674	710	1908	453	453
	N2	1114	1118	1164	680	1209	1203
	N3	1007	968	975	300	1217	1216
FRACTIONS DES MESURES PAR STRATE							
fractions des mesures par strate sur l'ensemble de l'année	w1	0,25	0,24	0,25	0,66	0,16	0,16
	w2	0,39	0,41	0,41	0,24	0,42	0,42
	w3	0,36	0,35	0,34	0,10	0,42	0,42
INTERVALLES DE CONFIANCE PONDERES DES MOYENNES ANNUELLES							
IC95 en µg/m3		0,19	1,20	0,55	0,98	0,60	0,32
IC95 en %	médiane = 2,0	2,3	5,3	1,4	2,2	2,2	1,9
NOMBRES DE MESURES A FAIRE PAR STRATE POUR UNE INCERTITUDE DONNEE							
Incertitude +/- 10% (en µg/m3 sauf CO)		0,83	2,25	3,99	4,40	2,70	1,68
nombre total de mesures à faire	médiane = 134	130	547	54	138	141	100
nombres de mesures à faire pour calcul des moyennes	n(x)1	20	32	11	77	24	10
	n(x)2	45	161	23	43	51	37
	n(x)3	67	356	22	20	68	55
Si on choisit une campagne de 4 semaines (224 triH) avec les mêmes écarts-type pondérés :							
on aurait : IC95 en µg/m3 = +/-	224	0,66	4,21	1,97	3,52	2,15	1,15
IC95 en % = +/-	médiane = 7,0	8,0	18,7	4,9	8,0	8,0	6,9

Le tableau B4.1 calcule après une pré-étude sur une base annuelle, les nombres de mesures qu'il conviendrait de réaliser par strate et pour chaque polluant lors de campagnes pour une reconstitution de moyennes annuelles assorties d'une incertitude choisie par l'opérateur (ici +/- 10%).

B4.2 – Reconstitution de nombres de dépassements des centiles 90

Tableau B-8

STRASBOURG 2003		SO2 Stg Est	NO STG Est	NO2 STG Est	O3 STG Est	PM10 STG Est	PM2,5 STG Est
AUTRE OBJECTIF DE L'ETUDE :							
NOMBRES DE DEPASSEMENTS DE SEUILS PAR STRATE							
P90 choisis comme exemple en µg/m3 (sauf CO) =		15,6	56,3	65	99,6	48	29
nb de dépassements constatés par classe sur l'ensemble	strate 1	6	2	14	27	27	3
	strate 2	59	41	72	122	87	64
	strate 3	216	231	194	139	173	213
nombre total annuel		281	274	280	288	287	280
INTERVALLES DE CONFIANCE PONDERES DES DEPASSEMENTS DE SEUILS							
IC95 des % de dépassements		0,884	0,879	0,888	0,808	0,912	0,886
IC95 des nombres de dépassements		25	24	25	23	26	25
NOMBRES DE MESURES A FAIRE PAR STRATE POUR UNE INCERTITUDE DONNEE							
RAPPEL des nombres totaux à faire		130	547	54	138	141	100
nombres de mesures à faire pour calcul des dépassements	n(f1)	12	31	7	49	18	5
	n(f2)	45	175	20	57	53	36
	n(f3)	74	343	28	33	71	61
Ces nombres sont différents de ceux prédits pour le calcul des moyennes							

Le tableau B4.2 calcule après une pré-étude sur une base annuelle, les nombres de mesures qu'il conviendrait de réaliser par strate et pour chaque polluant lors de campagnes pour une reconstitution de nombres de dépassement de seuil assortis d'une incertitude choisie par l'opérateur (ici +/- 10%).

B5 – Exploitation des campagnes

B5.1 – Reconstitution de moyennes

Le tableau B9 calcule après les campagnes annuelle, par strate, les moyennes de chaque polluant et leurs écarts types, puis reconstitue leurs moyennes annuelles assorties de leurs incertitudes réelles.

Le tableau B10 calcule après les campagnes annuelle, par strate, les nombres de dépassement de seuils de chaque polluant et leurs écarts types, puis reconstitue ces mêmes nombres sur l'année complète assortis de leurs incertitudes réelles.

Les incertitudes ne sont pas de 10% comme souhaité au départ, car les écarts types obtenus dépendent des mesures réalisées lors des campagnes effectuées, et non plus de celles utilisées dans la pré-étude.

Tableau B-9

STRASBOURG 2003		SO2 Stg Est	NO STG Est	NO2 STG Est	O3 STG Est	PM10 STG Est	PM2,5 STG Est
AUTRES STATISTIQUES UTILES							
nombre de données météo sur l'année		2920	2920	2920	2920	2920	2920
NOMBRES DE MESURES PAR STRATE							
nombres de données météo ventilées par strate sur l'ensemble de l'année	N1	742	729	729	1931	466	466
	N2	1146	1192	1192	687	1222	1222
	N3	1032	999	999	302	1232	1232
CAMPAGNES							
Moyennes des x par strate moyennes brutes de la campagne	m'1	5,3	5,7	27,4	27,6	17,8	11,8
	m'2	7,6	11,9	36,7	67,0	25,1	16,2
	m'3	12,7	48,9	53,8	97,7	31,8	20,9
		8,9	24,4	40,4	44,3	26,9	17,5
moyennes annuelles reconstituées		8,8	23,1	40,2	44,1	26,8	17,5
ECARTS-TYPE REDUITS PAR STRATES							
Ecart-types S(x)	S(x)1	2,9	7,2	11,5	26,1	8,4	6,0
	S(x)2	6,0	20,2	17,1	42,2	16,8	10,6
	S(x)3	10,7	60,9	22,2	35,3	18,6	12,6
NOMBRES DE MESURES PAR STRATE							
nb de mesures validées pendant la campagne ventilées par strate	n1	121	112	121	297	70	70
	n2	161	154	163	97	182	184
	n3	165	163	163	52	193	193
nb de valeurs >0 (max 448)	moyenne = 443	447	429	447	446	445	447
INTERVALLES DE CONFIANCE DES MOYENNES ANNUELLES RECONSTITUEES							
IC95 en µg/m3	moyenne = 1,58	0,58	2,91	1,40	2,48	1,29	0,85
IC95 en %	moyenne = 6,3	6,6	12,6	3,5	5,6	4,8	4,9
INTERVALLES DE CONFIANCE DES MOYENNES BRUTES DE LA CAMPAGNE							
Ecarts type bruts		6,1	26,0	25,5	36,9	29,5	9,1
IC95 en µg/m3	moyenne = 1,74	0,47	2,07	1,98	2,88	2,30	0,71
IC95 en %	moyenne = 6,3	5,4	8,5	4,9	6,5	8,6	4,0

B5.2 – Reconstitution de nombres de dépassements des centiles 90

Tableau B-10

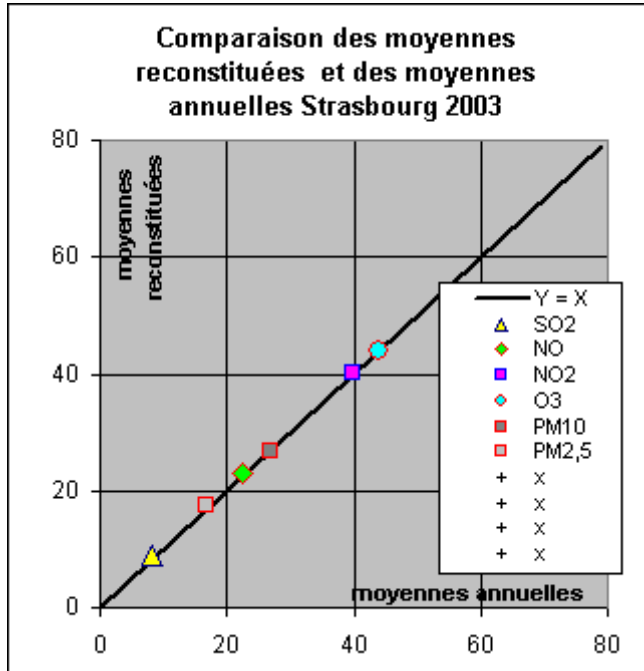
STRASBOURG 2003		SO2 Stg Est	NO STG Est	NO2 STG Est	O3 STG Est	PM10 STG Est	PM2,5 STG Est
AUTRE OBJECTIF DE L'ETUDE :							
NOMBRES DE DEPASSEMENTS DE SEUILS PAR STRATE							
P90 choisit comme exemple en µg/m3 (sauf CO) =		15,6	56,3	65	99,6	48	29
nb de dépassements observés par strate pendant la campagne	n1	0	1	1	4	0	0
	n2	11	3	9	22	15	15
	n3	41	44	33	28	24	27
nombres totaux	n	52	48	43	54	39	42
nb reconstitués de dépassements annuels							
Intervalle de confiance	+/-	71	65	66	66	66	68

B6 – Résultats graphiques

B6.1 - Reconstitution de moyennes (valeurs numériques en $\mu\text{g.m}^{-3}$)

Le classeur Excel trace automatiquement les graphiques de présentation des résultats.

GRAPHIQUE B-1



Ci-contre, les moyennes annuelles reconstituées :

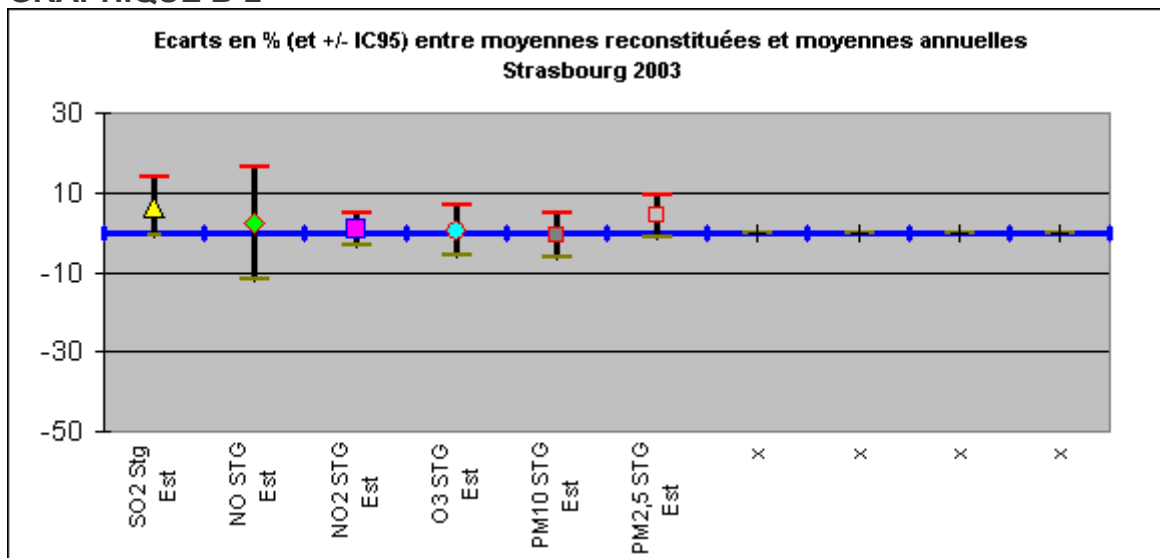
- en fonction des moyennes réelles connues s'il y a eu une pré-étude.,
- ou en fonction d'une station fixe assez proche du lieu des campagnes.

Le classeur est prévu pour 10 polluants dont 6 sont effectifs dans cet exemple.

B6.2 - Reconstitution de moyennes (écarts relatifs)

Le graphique ci-dessous présente les mêmes résultats mais en écarts relatifs (%).

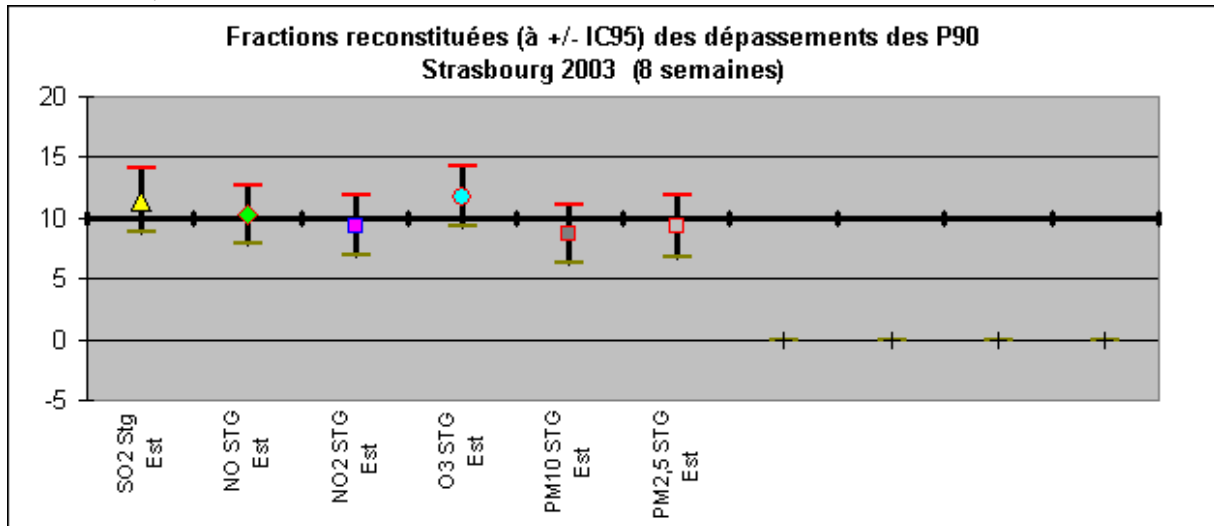
GRAPHIQUE B-2



B6.3 – Reconstitution de nombres de dépassements des centiles 90

Le graphique ci-dessous présente les reconstitutions des nombres de dépassement du centile 90 connus s'il y a eu une pré-étude, ou comparés avec une station fixe assez proche.

GRAPHIQUE B-3





Ecole d'Ingénieurs
Centre de Recherche

Mines de Douai

941, rue Charles Bourseul - BP 838 - 59508 DOUAI Cedex
Tél. 03 27 71 22 22 - Fax 03 27 71 25 25
mél : mines@ensm-douai.fr - <http://www.ensm-douai.fr>

Imprimé à l'Ecole des Mines de Douai - 59500 DOUAI