Surveillance du dioxyde de soufre dans la vallée du Rhône

décembre 2002

SUrveillance de la **P**ollution de l'**AI**r
à **R**oussillon et ses **E**nvirons
22, rue Avit Nicolas
BP 345
38150 SALAISE SUR SANNE

COmité pour le contrôle de la **P**ollution **A**tmosphérique
dans le **R**hône et la région **LY**onnaise
Rue des Frères Lumière
Parc d'affaires Roosevelt
69120 VAULX-EN-VELIN

Sommaire

INTRODUCTION **2**

1. BILAN DE LA QUALITE DE L'AIR ET DES EMISSIONS **3**

1.1 DOMAINE D'ETUDE ET ZONAGE 3
1.2 LE DIOXYDE DE SOUFRE (SO_2) 6
1.3 EMISSIONS : EVOLUTION ET PART DES PRINCIPAUX EMETTEURS 6
1.4 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE SO_2 8
1.4.1 Evolution annuelle depuis le début des années 1970 ..... *8*
1.4.2 Statistiques semestrielles par zone *9*
1.4.2.1 Moyennes et dépassements de seuil 9
1.4.2.2 Répartition des valeurs maximales au cours de la journée 11
1.4.2.3 Durée de dépassement du seuil d'information 13
1.4.1.4 Dépassement du seuil d'information durant plusieurs jours consécutifs 13
1.4.2 Corrélation des dépassements de seuil entre zones *14*
1.4.2.1 Seuil d'information et de recommandations 14
1.4.2.2 Seuil d'alerte 15

2. CORRELATION ENTRE EPISODES DE POLLUTION ET METEOROLOGIE **16**

2.1 OBSERVATIONS AU SOL 16
2.1.1 Homogénéité des conditions météorologiques au sol sur le domaine d'étude *17*
2.1.2 Corrélation avec la vitesse et la direction du vent *18*
2.1.3 Corrélation avec la température minimale *22*
2.1.4 Pour conclure *22*
2.2 DONNEES EN ALTITUDE 23
2.2.1 Traitement des données *23*
2.2.2 Représentativité du radiosondage de Lyon St-Exupéry *23*
2.2.3 Corrélation avec les inversions de température *27*
2.2.3.1 Hauteur de la base de la première inversion 27
2.2.3.2 Amplitude de la première inversion 28
2.2.3.3 Epaisseur de la première inversion 28
2.2.5 Corrélation avec une advection d'air chaud en altitude *30*
2.2.6 Rotation des vents en altitude *31*
2.2.7 Vitesse du vent en altitude *32*
2.2.8 Synthèse *32*

3. QUELQUES ELEMENTS POUR LA MISE EN PLACE D'UNE STRATEGIE DE SURVEILLANCE **34**

3.1 L'INFORMATION DU PUBLIC A CE JOUR 34
3.2 STRATEGIE DE SURVEILLANCE PAR EPISODE TYPE 35
3.2.1 Cas d'une retombée d'un panache industriel *35*
3.2.2 Le rabattement d'une masse d'air chargée en SO_2 accumulée en altitude *37*
3.2.2.1 Caractéristiques des épisodes associés à une inversion de rayonnement 38
3.2.2.2. Identification d'une journée type pour la zone VDR_COP 39

CONCLUSION **42**

BIBLIOGRAPHIE **44**

ANNEXES **45**

Introduction

La partie la plus septentrionale de la vallée du Rhône, gérée par deux associations de la qualité de l'air (COPARLY – du sud de Lyon à Vienne – et SUPAIRE – de Vienne à Roussillon –), est caractérisée par la présence de nombreuses industries (raffinage, production d'énergie, chimie, solvants…) et infrastructures routières (autoroute du soleil…), à l'origine de rejets de polluants atmosphériques. Ceux-ci vont ensuite se disperser plus ou moins efficacement, selon les conditions météorologiques. Dans les cas les plus défavorables, les polluants sont rabattus près du sol et engendrent des pointes de pollution ponctuelles pouvant dans certains cas dépasser les seuils réglementaires.

Il n'existe pas pour l'instant de procédure d'information commune à cette zone en cas de dépassement de seuils réglementaires : si un arrêté préfectoral a été récemment mis en place sur la zone comprise entre Vienne et Roussillon (domaine de compétence de SUPAIRE), seule une Procédure de Préservation de la Qualité de l'Air est activée sur l'agglomération lyonnaise, sur observation de niveaux élevés associée à une prévision météorologique défavorable à la dispersion. Les niveaux de SO_2 ayant nettement diminué ces dernières années, cette procédure n'a plus été activée depuis janvier 1997. Quant à l'arrêté interpréfectoral Rhône-Ain, il ne permet pas de déclenchement de procédure d'information du public lorsque les dépassements de seuil sont exclusivement observés dans la vallée de la chimie.

Cette étude a pour objectif de dresser un bilan de l'évolution des teneurs en dioxyde de soufre sur les dix dernières années dans la vallée du Rhône (du sud de Lyon à Roussillon entre Vienne et Valence). L'étendue géographique des épisodes de pollution marquée sera tout particulièrement approfondie. Une analyse détaillée des conditions météorologiques locales a été ensuite menée lors des dépassements du seuil horaire d'information de 300 $\mu g.m^{-3}$, afin d'identifier des épisodes types et lorsque cela est possible, une journée type favorable à ces pics. Enfin, quelques éléments sont proposés pour aider les décideurs à mettre en place une stratégie de surveillance, voire de réduction des émissions en cas de situation défavorable à la dispersion des polluants. Ces conclusions devraient également permettre d'aider à la mise en place des Plans de Protection de l'Atmosphère de l'Isère et du Rhône.

1. Bilan de la qualité de l'air et des émissions

L'objectif de cette partie est d'une part de présenter l'évolution des concentrations en SO_2 sur les dix dernières années, en lien avec les variations d'émissions, et d'autre part, d'étudier l'évolution puis la simultanéité des épisodes entre différentes zones déterminées subjectivement.

1.1 Domaine d'étude et zonage

Le domaine d'étude couvre l'ensemble des industries situées au sud de Lyon (du port Edouard Herriot - au sud de Lyon - à Roussillon - entre Vienne et Valence -). Il paraît intéressant d'associer en parallèle les données de l'ensemble de l'agglomération lyonnaise, afin de confronter les résultats à ceux des zones industrialisées. La zone globale englobe ainsi deux AASQA : COPARLY et SUPAIRE.

La présentation des statistiques peut se faire de plusieurs façons : le calcul par site présente l'inconvénient de ne pas faire ressortir clairement la tendance (problème des séries incomplètes…), alors qu'une statistique généralisée à l'ensemble des sites gomme les disparités spatiales. Une solution intermédiaire consiste à présenter les résultats selon différentes zones déterminées de façon subjective selon la localisation des principaux émetteurs et des sites de mesure.

Le tableau 1 recense les sites de mesure (et leur abréviation utilisée) et les différentes zones qui leur seront associées par la suite. La zone d'étude globale nommée VDR (**V**allée **D**u **R**hône) est découpée :

- en deux sous-domaines par réseau : VDR_COP pour la zone de compétence de COPARLY et VDR_SUP pour le domaine SUPAIRE.
- en cinq zones ainsi définies :
    - la zone de Feyzin correspond à l'ancien réseau ALPOLAIR, autour de la raffinerie.
    - la zone EDF correspond à l'ancien réseau EDF, autour de la centrale thermique de Loire sur Rhône.
    - la zone Vienne couvre l'agglomération viennoise et intègre un site de COPARLY et un site de SUPAIRE.
    - la zone des Roches est composée du site des Roches de Condrieu.
    - La zone de Roussillon comprend les sites de Roussillon et Salaise.

A titre de comparaison, une zone « Lyon » telle que définie par l'arrêté interpréfectoral (Lyon-Villeurbanne et communes limitrophes - petite couronne -) a été également définie.

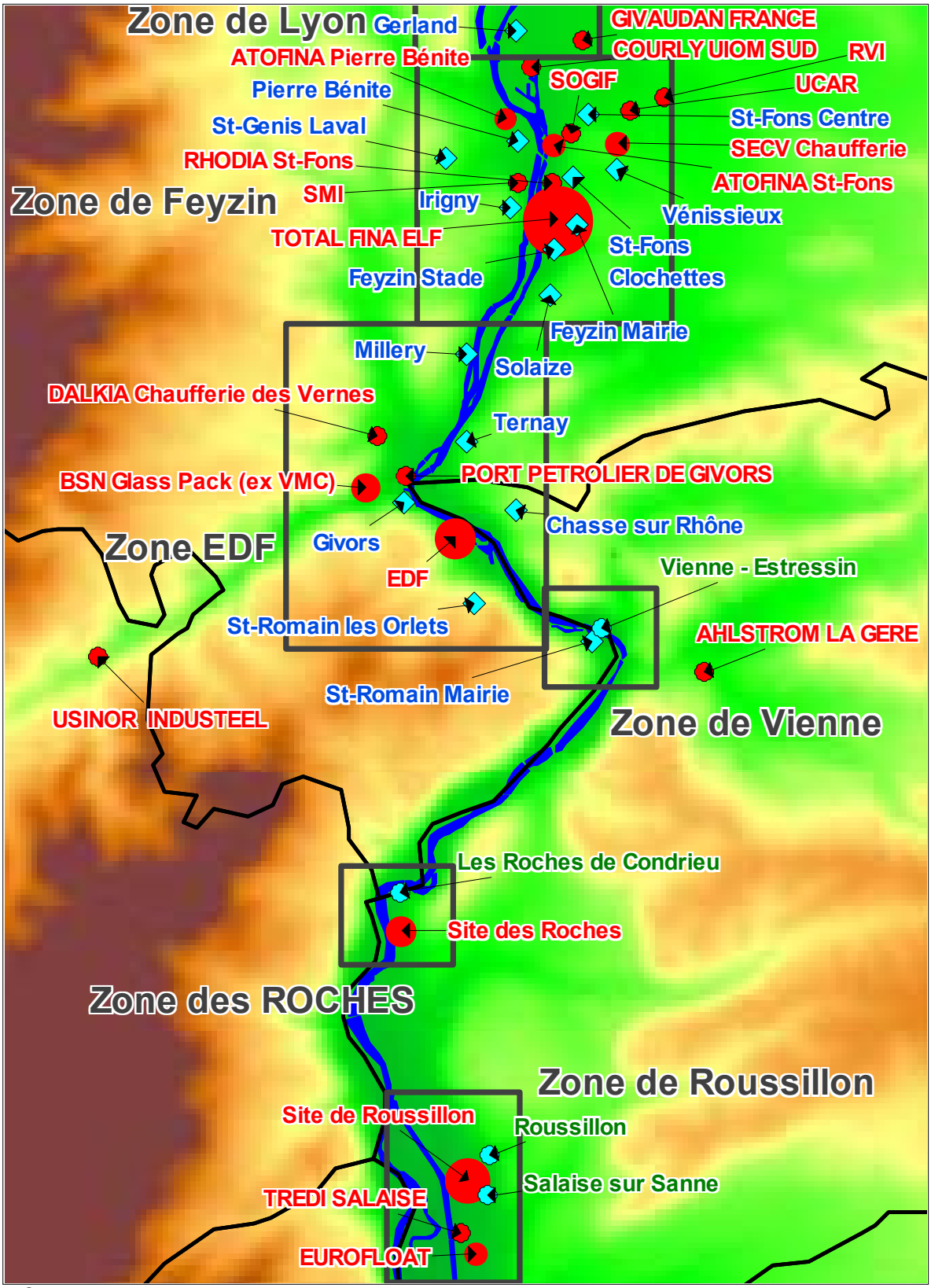
A noter que toutes les heures sont exprimées en UTC[1].

[1] UTC : Temps Universel Coordonné, unité de temps facilitant la comparaison d'observations (météorologiques par exemple) sur l'ensemble du globe. Pour obtenir l'heure locale d'hiver et d'été, rajouter respectivement 1h et 2h.

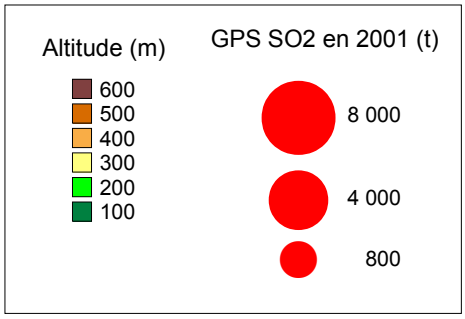
Domaine d'étude	Zone globale	Réseau	Zone	Sites faisant partie de la zone
		COPARLY	Lyon	Berthelot BER ; Bron BRO ; Caluire CAL ; Charpennes CHP ; Croix-Luizet CXL ; Croix-Rousse CXR ; Duchère DUC ; Etats Unis EU ; Garibaldi GAR ; Grandclément GCL ; Gerland GER ; La Mouche LMO ; Mermoz MER ; Montchat MON ; Point du Jour PDJ ; Puits Gaillot PG ; St-Just SJU ; Vaise VAI ; Villette VIL
VDR	VDR_COP		Feyzin	Feyzin Mairie FEM ; Feyzin Stade FES ; Irigny IRI ; Pierre Bénite PB ; St-Fons centre SFCE ; St-Fons Clochettes SFCL ; Solaize SOL ; St-Genis Laval STG ; St-Priest STP ; Vénissieux VEN
			EDF	Chasse Chatanay CHA ; Givors GIV ; Millery MIL ; St-Romain en Gal – les Orlets SRO ; Ternay TER
			Vienne	St-Romain en Gal – Mairie SRM Vienne Estressin VIE
	VDR_SUP	SUPAIRE	Roches	Roches de Condrieu RDC
			Roussillon	Roussillon ROU ; Salaise-sur-Sanne SSS

Tableau 1 : correspondance entre sites de mesure et zone
(en italique figurent les sites de SUPAIRE)

La carte 1 localise ces stations ainsi que les grandes sources ponctuelles de la Vallée du Rhône. L'implantation du réseau de mesures de la qualité de l'air est globalement en adéquation avec le positionnement des principaux émetteurs industriels, au regard des vents dominants de nord et de sud. Ce constat doit cependant être nuancé dans certains cas où de gros émetteurs ne disposent pas toujours de site de mesure exactement dans un axe dominant des vents, l'implantation des sites de mesure étant également justifiée par la localisation des zones les plus peuplées. La comparaison des résultats relatifs à la qualité de l'air entre zones doit donc être réalisée avec la plus grande prudence : disposant d'un seul capteur sous le vent de sud du site industriel des Roches, cette zone pourra présenter des niveaux moyens plus élevés que ceux de la zone de Roussillon qui ne dispose pas de capteur directement sous le vent des industries.



© Francièmes 2000 - DRIRE
© GéoSys Data



Carte 1 : localisation des sites de mesure et des principaux émetteurs de SO_2 (Grandes Sources Ponctuelles, données DRIRE 2001)

1.2 Le dioxyde de soufre (SO_2)

Sources

Le dioxyde de soufre (SO_2) est un polluant gazeux qui résulte essentiellement de la combustion de matières fossiles contenant du soufre (charbon et fiouls). Les différentes sources sont les industries (centrales thermiques, grosses installations de combustion industrielles, raffinage), les unités de chauffage individuel et collectif et les transports, dont la part diminue avec la suppression progressive du soufre dans les carburants.

Effets

Sur la santé, ce gaz irritant est associé à une altération de la fonction pulmonaire chez l'enfant. Les personnes asthmatiques y sont particulièrement sensibles. Comme tous les polluants, ses effets sont amplifiés par le tabagisme. Du point de vue environnemental, le SO_2 se transforme en acide sulfurique au contact de l'humidité de l'air et participe au phénomène des pluies acides. Il contribue également à la dégradation de nombreux monuments.

Réglementation

Objectif de qualité : 50 $\mu g.m^{-3}$ en moyenne annuelle
Valeur limite : 125 $\mu g.m^{-3}$ en moyenne journalière, à ne pas dépasser plus de trois jours par an.
Seuil d'alerte : 600 $\mu g.m^{-3}$ en moyenne horaire. Ce seuil sera prochainement abaissé à 500 $\mu g.m^{-3}$ en moyenne horaire pour un dépassement durant trois heures consécutives.
Seuil d'information et de recommandations pour les personnes sensibles : 300 $\mu g.m^{-3}$ en moyenne horaire.

1.3 Emissions : évolution et part des principaux émetteurs

Les émissions des grandes sources ponctuelles (GSP) sont inventoriées annuellement par la DRIRE. La répartition de ces émissions durant l'année 2001 (figure 1) montre la part prépondérante de la raffinerie (62%), suivie par le site de Roussillon (13%) puis la centrale thermique d'EDF (10%).

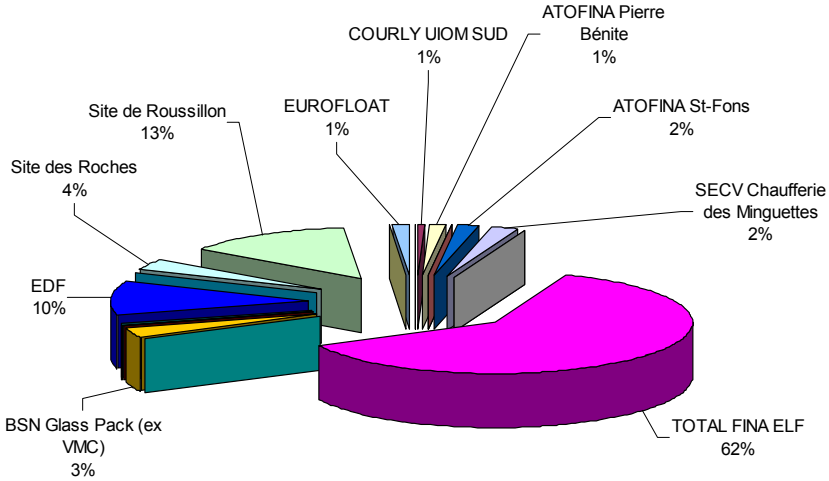


Figure 1
part des émetteurs de SO_2 en Vallée du Rhône en 2001 (source : DRIRE)

L'évolution de ces émissions par zone depuis 1993 (figures 2 à 5) montre globalement une nette diminution des rejets jusqu'en 1997-1999 selon les émetteurs, suivie d'une relative stabilité. La baisse des rejets de la raffinerie est cependant moins marquée (environ 10% en 9 ans). L'activité de la centrale thermique d'EDF est dépendante du besoin énergétique global (pour pallier l'arrêt momentané d'une centrale nucléaire par exemple), ce qui explique l'allure irrégulière de ses émissions.

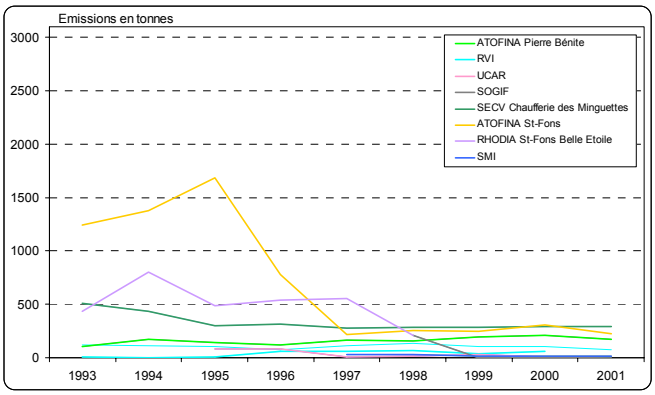


Figure 2 : évolution des émissions de la zone FEYZIN (hors raffinerie)

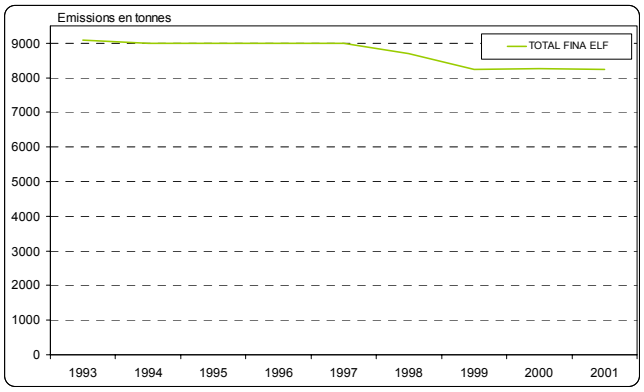


Figure 3 : évolution des émissions de la raffinerie de Feyzin

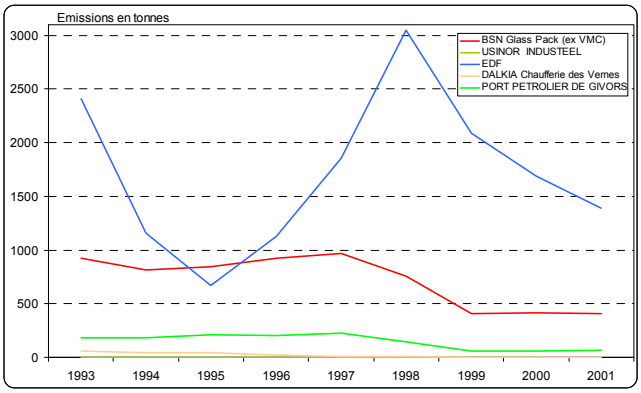


Figure 4 : évolution des émissions de la zone EDF

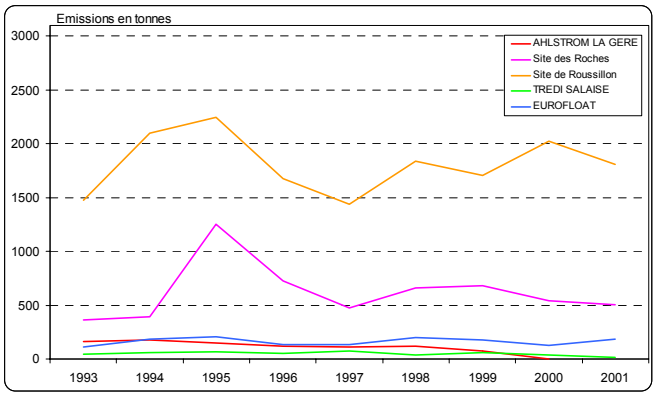


Figure 5 : évolution des émissions des zones de Vienne, des Roches et de Roussillon

Il faut cependant relativiser les émissions qui caractérisent la vallée du Rhône (du sud de Lyon à Roussillon), au regard d'autres régions industrielles françaises : la zone située à proximité de l'étang de Berre, ainsi que la région de Rouen - Le Havre sont caractérisées par un nombre de gros émetteurs (établissements rejetant plus de 5000 t/an de SO_2) sensiblement plus élevé, notamment en raison de la présence de plusieurs raffineries (figure 6). Ainsi, les émissions totales des gros émetteurs de ces deux régions sont huit fois plus élevées que celles de la zone d'étude. De même, le plus gros émetteur situé près du Havre émet près de trois fois plus de SO_2 que la raffinerie de Feyzin…

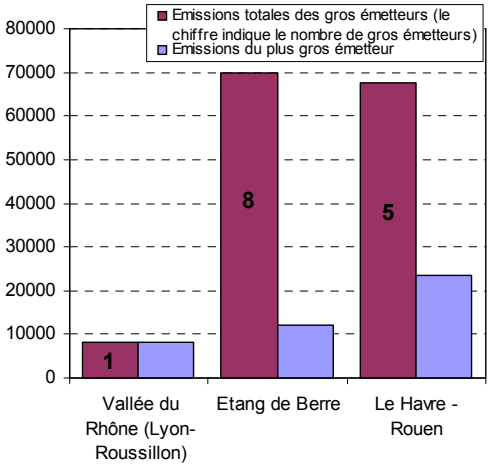


Figure 6 : émissions totales (t/an) des gros émetteurs de SO_2 pour trois régions industrialisées (source : DRIRE)

1.4 Evolution des concentrations de SO_2

1.4.1 Evolution annuelle depuis le début des années 1970

Une évolution des concentrations sur une très longue période est présentée en préambule afin de mieux situer la problématique actuelle. Jusqu'au milieu des années 90, ce sont les mesures d'acidité forte qui ont caractérisé la pollution soufrée (l'équivalence entre AF et SO_2 est généralement admise à 3 $\mu g.m^{-3}$ près). La figure 7 illustre clairement la diminution de ces concentrations sur la ville de Lyon (tous types de sites) qui dispose d'un historique le plus long et le plus complet. Les niveaux moyens sont en très nette diminution, avec une réduction moyenne d'un facteur 15 en 30 ans.

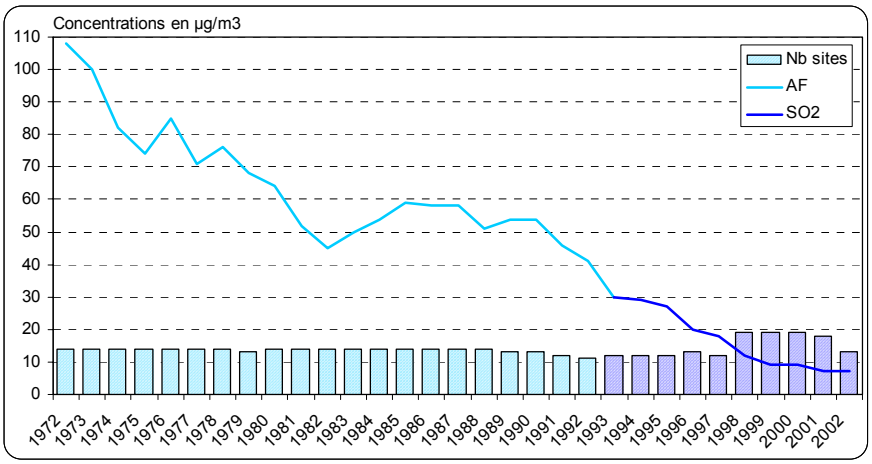


Figure 7 : évolution de la moyenne annuelle d'acidité forte (puis de SO_2) de 1972 à 2002

La très nette baisse des concentrations moyennes résulte essentiellement de la diminution de la consommation des fiouls et charbons fortement soufrés, de l'importance prise par l'énergie nucléaire et des mesures techniques et réglementaires :

- Au niveau national :
  - 1985 : instauration de la taxe parafiscale pour les industriels gros émetteurs de SO_2
  - 1996 : le gazole à très faible teneur en soufre (0,05%) devient obligatoire en France.

- Au niveau local (Rhône et nord-Isère) :

  - 26/02/1974 : dans le cadre de la loi du 2 août 1961, relative à la lutte contre la pollution atmosphérique et les odeurs, un arrêté ministériel crée une zone de protection spéciale[2] couvrant les communes de Lyon et Villeurbanne. En 1995, cette zone est étendue à l'ensemble du Grand Lyon, exceptée la raffinerie de Feyzin, soumise par ailleurs à d'autres arrêtés préfectoraux.

[2] La ZPS impose l'utilisation de combustibles contenant moins de 1% de soufre (certains fiouls lourds et charbons peuvent contenir jusqu'à 4% de soufre).

- 1984 : mise en place de la Procédure de Préservation de la Qualité de l'Air, dont l'objectif est d'éviter le dépassement du seuil journalier de 250 µg.m^{-3}. En cas de prévision à J+1 d'une situation météorologique défavorable à la dispersion des polluants associée à des concentrations observées en SO_2 significatives, la procédure contraint une douzaine d'émetteurs à réduire leurs émissions (par changement de combustible, report ou réduction d'activité).

Un bilan plus détaillé de la qualité de l'air sur la vallée du Rhône a été réalisé sur différentes périodes récentes :

- la période 1993 - septembre 2002 a été choisie afin de déterminer des tendances sur une longue période en s'affranchissant des conditions météorologiques particulières à certaines années. La disponibilité des données ne permet pas de remonter plus loin (notamment pour SUPAIRE).
- La période 1999 - septembre 2002 a été également retenue afin de caractériser la qualité de l'air sur une période durant laquelle les émissions sont à peu près homogènes.
- La période 1996-1998 pourra confirmer certaines conclusions établies sur la période 1999-2002.

Certaines statistiques sont présentées par semestre (octobre à mars pour le semestre hivernal et avril à septembre pour le semestre estival), pour tenir compte :

- de la variation des émissions lorsque celles-ci sont liées au chauffage
- des conditions de dispersion qui diffèrent parfois de façon significative entre ces deux périodes, en particulier pour ce qui concerne les inversions de température qui peuvent persister pendant plusieurs jours en hiver, alors qu'en été les nuits plus courtes associées à un rayonnement solaire plus important en journée limitent ces inversions.

1.4.2 Statistiques semestrielles par zone

1.4.2.1 Moyennes et dépassements de seuil

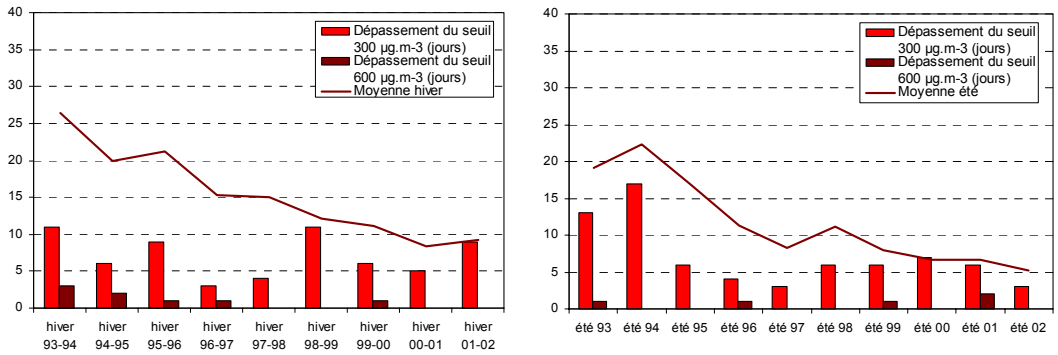
Les statistiques ont été calculées sur la période 1993-2002, à partir des zones définies précédemment, pour le semestre hivernal et estival :

- moyennes tous sites confondus
- nombre de jours avec au moins un site dépassant les seuils horaires de 300 et 600 µg.m^{-3}.

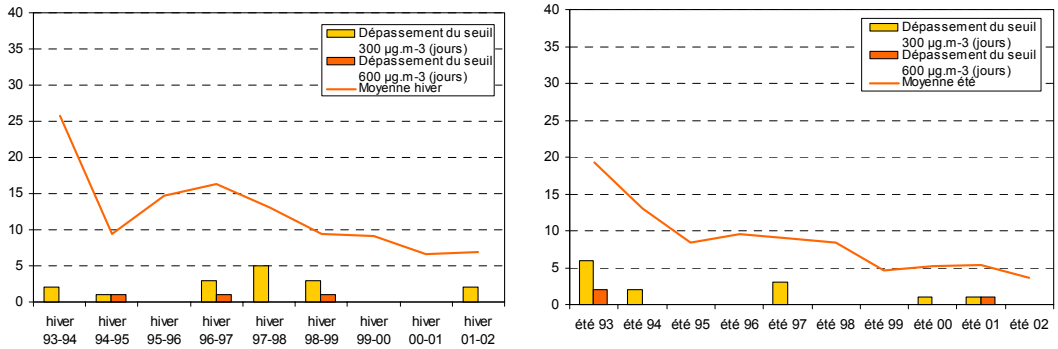
A noter que la valeur horaire maximale par site est déterminée :

- si au moins 75% des données sont valides,
- si moins de 75% des données sont valides, mais que le maximum est supérieur à 300 µg.m^{-3} (cas des Orlets le 13/09/2001 avec un maximum de 1158 µg.m^{-3}, qu'il aurait été gênant d'exclure des épisodes).

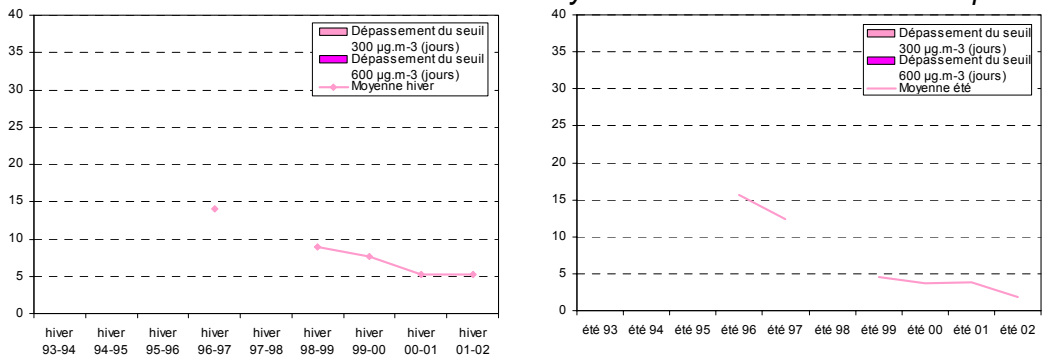
L'évolution des moyennes annuelles depuis 1993 (figures 8 à 13) montre une diminution des concentrations de l'ordre de 70 à 75% en dix ans pour les deux réseaux. La fréquence des pics ne suit pas la même tendance. Sur la zone de FEYZIN, la diminution des occurrences de pics est peu marquée, tandis qu'elle est plus sensible sur la zone LYON.



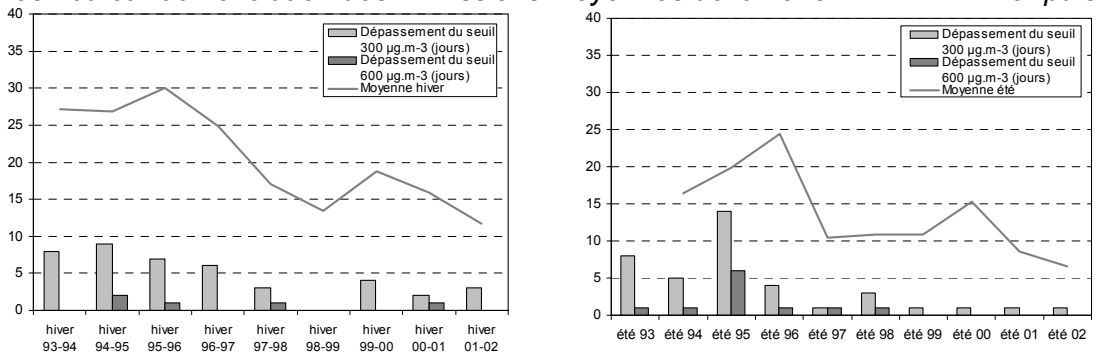
Figures 8a et 8b : évolution des immissions moyennes de la zone FEYZIN - hiver puis été



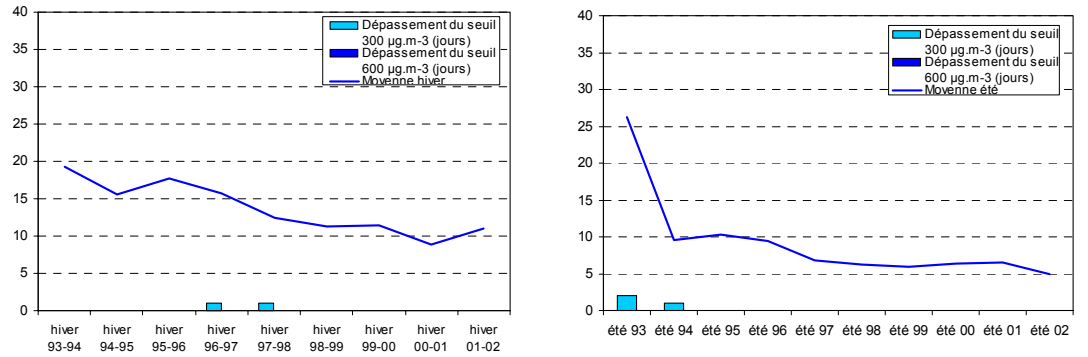
Figures 9a et 9b : évolution des immissions moyennes de la zone EDF - hiver puis été



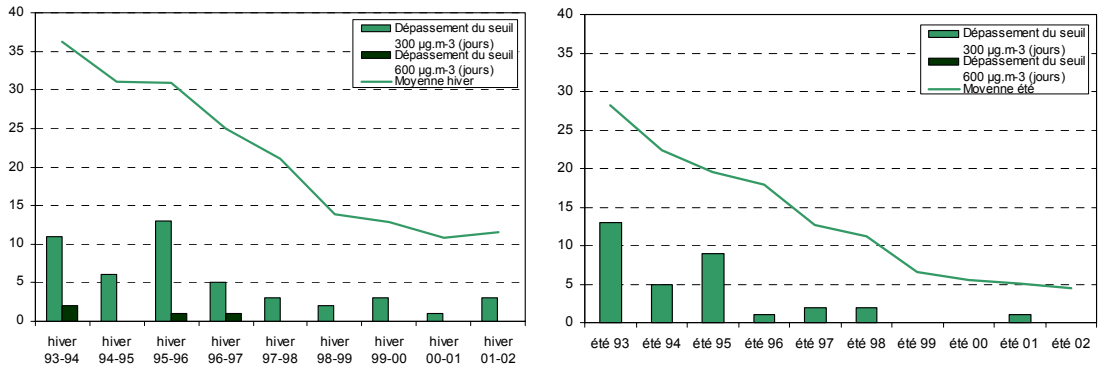
Figures 10a et 10b : évolution des immissions moyennes de la zone VIENNE - hiver puis été



Figures 11a et 11b : évolution des immissions moyennes de la zone ROCHES - hiver puis été



Figures 12a et 12b : évolution des immissions moyennes de la zone ROUSSILLON - hiver puis été



Figures 13a et 13b : évolution des immissions moyennes de la zone LYON - hiver puis été

En annexe 1 figurent pour chaque site le taux de fonctionnement, ainsi que des statistiques semestrielles et annuelles.

1.4.2.2 Répartition des valeurs maximales au cours de la journée

La question qui se pose ici est de savoir si les valeurs maximales de SO_2 se produisent à certaines heures plutôt qu'à d'autres. Dans un premier temps, on considère par zone l'heure à laquelle se produit la valeur maximale (figure 14).

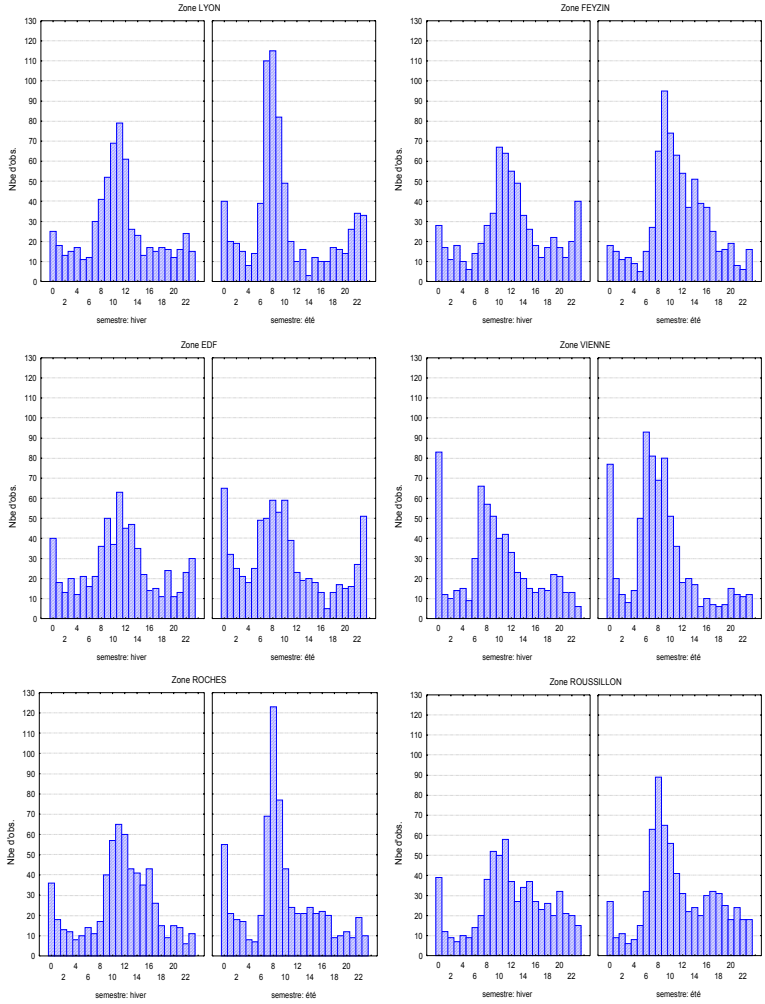


Figure 14 : fréquence par zone des pics de pollution en fonction de l'heure à laquelle la valeur maximale est observée (période 1999-2002)

Il apparaît une majorité de valeurs maximales durant la matinée : ce constat a une explication météorologique qui sera détaillée dans la seconde partie de l'étude. Cette caractéristique se retrouve pour les journées pour lesquelles la valeur de 300 µg.m^{-3} a été observée durant la période 1996-2002 (figure 15). Cette distribution n'est pas caractéristique d'une pollution d'origine automobile pour laquelle il est généralement observé un pic le matin et un autre pic le soir.

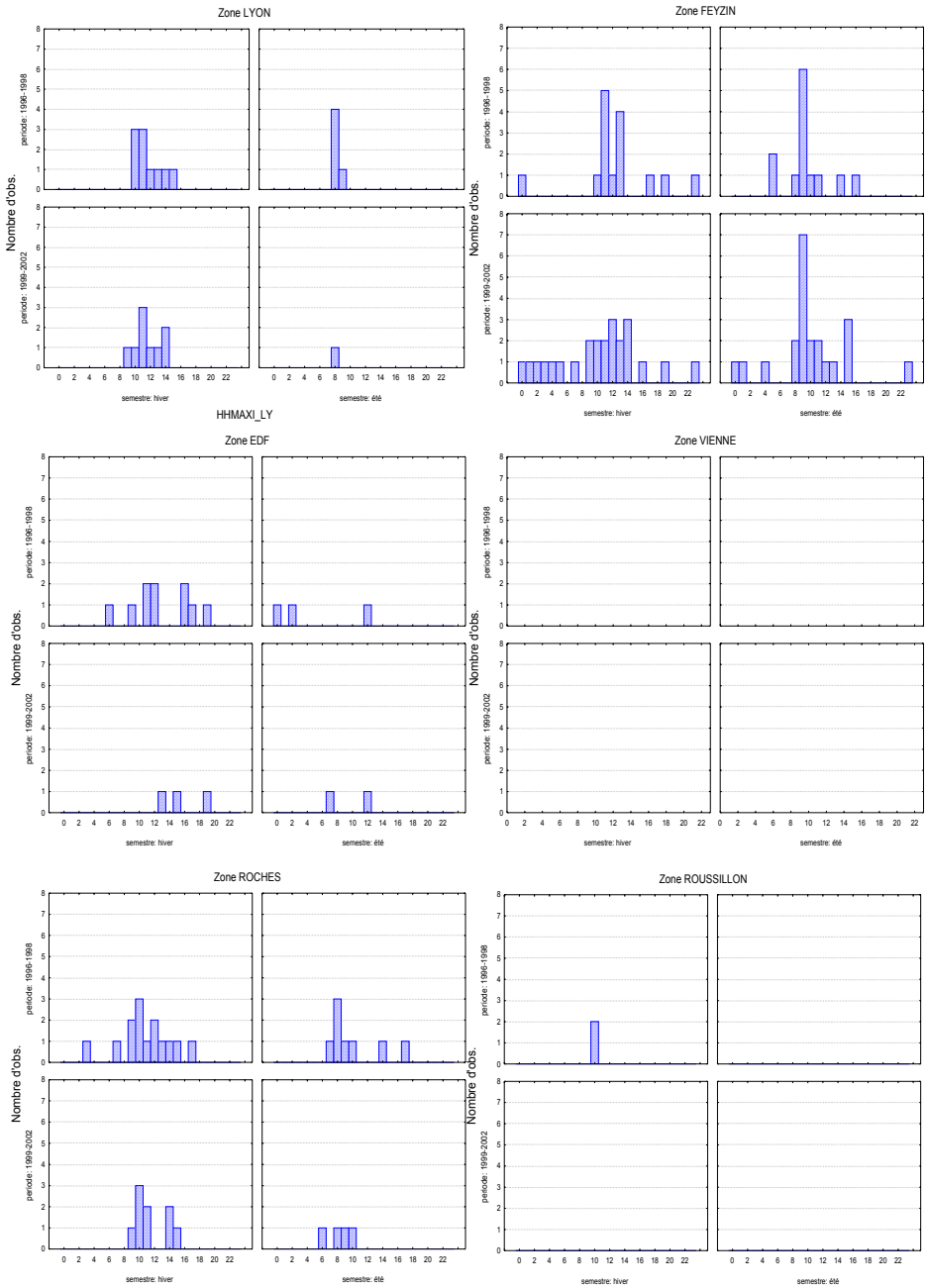
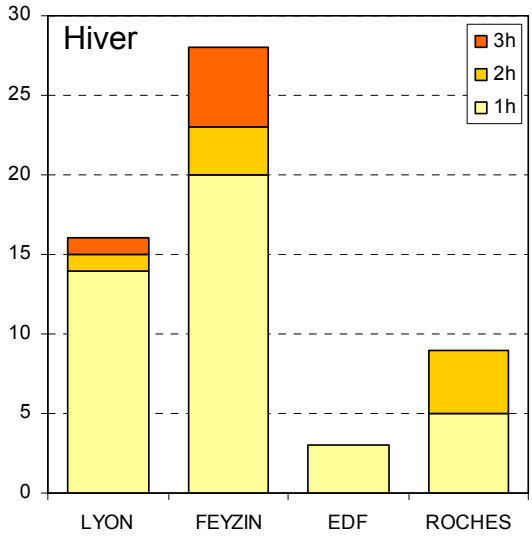
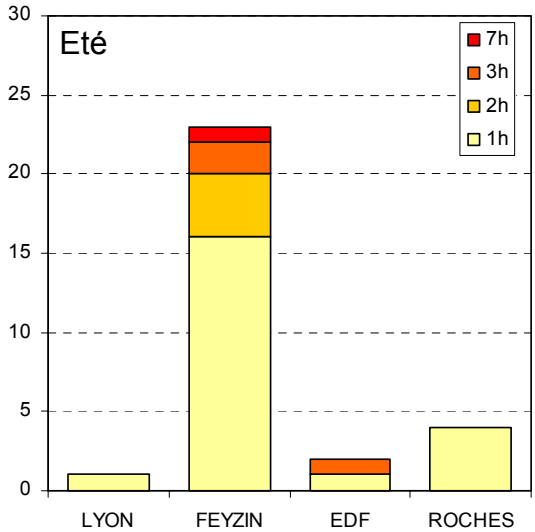


Figure 15 : fréquence par zone des dépassements du seuil de 300 µg.m^{-3} en fonction de l'heure à laquelle cette valeur est observée (période 1996-2002)

1.4.2.3 Durée de dépassement du seuil d'information

Les figures 16a et 16b présentent la durée, exprimée en heures, du dépassement du seuil de 300 µg.m^{-3}. Les épisodes ponctuels (1 heure) sont prédominants (près de ¾ des cas). La zone de FEYZIN possède quant à elle la majorité des dépassements supérieurs à 1h. Ceux-ci n'excèdent pas 3h, exceptée une journée sur la zone FEYZIN, le 09/04/1999 : le capteur de Feyzin Stade a dépassé les 300 µg.m^{-3} durant 7 heures non consécutives, en lien avec une retombée de panache par vent de nord.





Figures 16a et 16b : fréquence des dépassements du seuil 300, selon leur durée (période 1999-2002) - hiver puis été.

1.4.1.4 Dépassement du seuil d'information durant plusieurs jours consécutifs

Les dépassements du seuil d'information sur au moins deux jours consécutifs sont de plus en plus rares, comme l'indiquent les tableaux 2a et 2b, et ne concernent que la zone de FEYZIN, ainsi que LYON dans une moindre mesure. Sur la période 1999-2002, ils sont un peu plus fréquents en été (3 cas) qu'en hiver (1 seul cas).

	FEYZIN	EDF	VIENNE	ROCHES	ROUSSILLON	LYON
hiver 93-94	2	0	0	0	0	1
hiver 94-95	1	0	0	2	0	0
hiver 95-96	2	0	0	3	0	3
hiver 96-97	1	0	0	0	0	1
hiver 97-98	0	2	0	0	0	1
hiver 98-99	1	1	0	0	0	0
hiver 99-00	0	0	0	0	0	0
hiver 00-01	0	0	0	0	0	0
hiver 01-02	1	0	0	0	0	1

	FEYZIN	EDF	VIENNE	ROCHES	ROUSSILLON	LYON
été 93	2	1	0	1	0	2
été 94	3	0	0	1	0	0
été 95	0	0	0	3	0	1
été 96	0	0	0	0	0	0
été 97	0	0	0	0	0	0
été 98	1	0	0	0	0	0
été 99	0	0	0	0	0	0
été 00	1	0	0	0	0	0
été 01	2	0	0	0	0	0
été 02	0	0	0	0	0	0

Tableaux 2a et 2b : fréquence des dépassements du seuil 300 µg.m^{-3} durant au moins deux jours consécutifs

1.4.2 Corrélation des dépassements de seuil entre zones

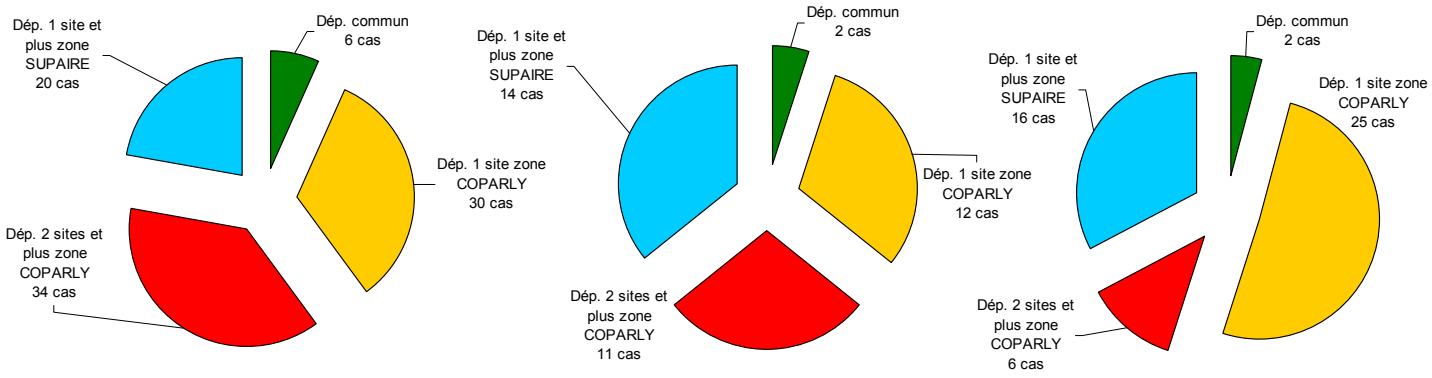
L'objectif de cette partie est de déterminer s'il existe une relation spatiale entre les zones, lors des dépassements du seuil d'information, en particulier entre le réseau de COPARLY et celui de SUPAIRE.

1.4.2.1 Seuil d'information et de recommandations

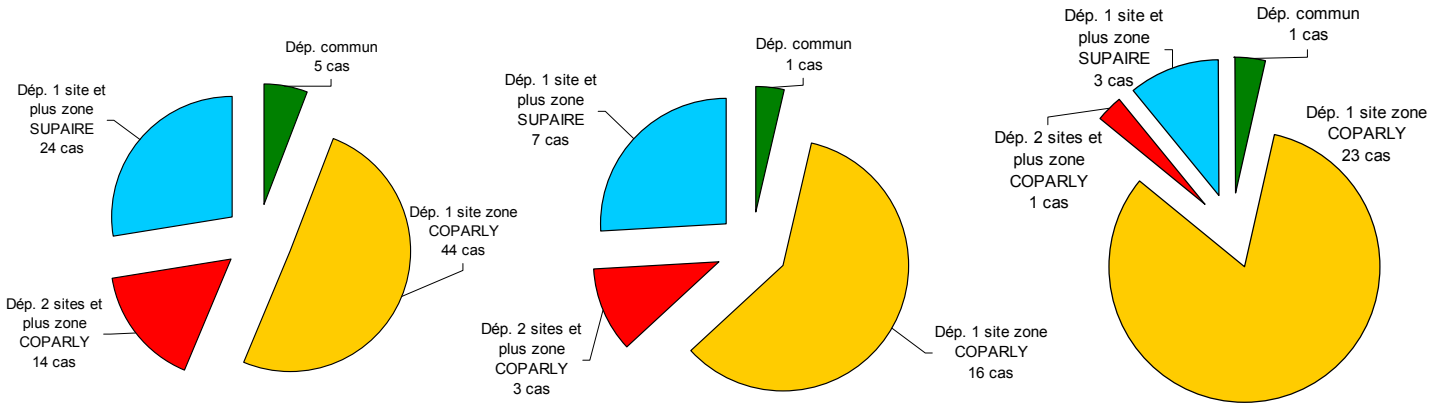
Les épisodes communs aux zones COPARLY et SUPAIRE sont peu nombreux (figures 17 et 18) :

- 10 événements communs sur la période hivernale 1993-2002, dont 4 sur la période 1996-1998 pour 84 événements localisés durant les hivers 1996-2002 :
  - 2 jours durant les hivers 1996-1998 (19/01/1996 et 14/01/1997)
  - 2 jours durant les hivers 1999-2002 (08/01/2000 et 20/01/2002)
- 7 événements communs sur la période estivale 1993-2002, dont 2 événements communs pour 53 événements localisés durant les étés 1996-2002 :
  - 1 jour durant les étés 1996-1998 (13/07/1997)
  - 1 jour durant les étés 1999-2002 (13/09/2001)

L'évolution observée entre les périodes 1993-1995 et 1999-2002 montre que les épisodes sont de plus en plus localisés (diminution du nombre d'épisodes communs d'une part, ainsi que des épisodes caractérisés par un dépassement sur deux sites).



Figures 17a 17b et 17c : répartition des épisodes entre les zones COPARLY (LYON FEYZIN EDF) et SUPAIRE (ROCHES et ROUSSILLON) – comparaison entre les hivers 1993-95, 1996-98 et 1999-2002



Figures 18a 18b et 18c : répartition des épisodes entre les zones COPARLY (LYON FEYZIN EDF) et SUPAIRE (ROCHES et ROUSSILLON) – comparaison entre les étés 1993-95, 1996-98 et 1999-2002

En annexe 2 sont présentées les relations entre zones.

1.4.2.2 Seuil d'alerte

Seuil actuel de 600 µg.m^{-3}

Le tableau 3 synthétise la simultanéité des dépassements du seuil de 600 µg.m^{-3} sur les zones COPARLY et SUPAIRE. Il montre qu'aucun dépassement commun n'a été observé sur la période 1996-2002. Ces épisodes sont localisés et pour certains d'entre eux liés à des rejets accidentels. Le seul épisode touchant trois zones (LYON, FEYZIN et EDF) correspond au 14/01/1997 où cinq sites ont dépassé ce seuil.

Année	COPARLY	SUPAIRE	COMMUN
1996	1	2	0
1997	1	1	0
1998	1	2	0
1999	2	0	0
2000	0	1	0
2001	3	0	0
2002	0	1	0

Tableau 3 : Nombre annuel de jours avec au moins un dépassement du seuil 600 µg.m^{-3} sur les zones COPARLY (LYON FEYZIN EDF) et SUPAIRE (ROCHES ROUSSILLON)

Seuil de 500 µg.m^{-3} sur trois heures

Sur la période janvier 1996- septembre 2002, deux cas ont été observés :

- le 14/01/1997 :
  - à St-Fons Clochettes de 10h à 12h
  - à Vénissieux de 2h à 6h et de 10h à 14h
- le 13/09/2001 à St-Romain les Orlets de 8h à 10h locales

Le premier cas est lié à la persistance de conditions météorologiques très défavorables à la dispersion des polluants pendant plusieurs jours, tandis que le second pourrait davantage s'expliquer par un rejet accidentel…

A noter qu'hors période d'étude, un nouveau cas s'est produit aux Roches de Condrieu le 16/10/2002 de 8h à 10h et de 20h à 22h (identifié comme un rejet accidentel).

2. Corrélation entre épisodes de pollution et météorologie

L'objectif de cette partie est de mieux comprendre les phénomènes qui conduisent à des dépassements du seuil d'information (actuellement de 300 µg.m^{-3} moyenné sur une heure), en définissant les paramètres météorologiques les mieux corrélés.
Etant donné le faible lien entre les pics des différentes zones, les critères météorologiques ont été comparés aux pics observés sur les zones COPARLY (zone VDR_COP incluant les zones FEYZIN et EDF) et SUPAIRE (zone VDR_SUP incluant les zones ROCHES et ROUSSILLON).
Afin de travailler sur une période homogène en terme d'émissions, la période d'étude se limite aux années 1999-2002. A noter que la zone VIENNE n'est pas directement prise en compte, puisqu'aucun dépassement du seuil n'a été observé durant cette période. La distinction des semestres « hiver » et « été » est maintenue pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment.

Pour l'ensemble des épisodes pollués, deux types de paramètres météorologiques vont être étudiés : les observations au sol et les observations en altitude. Le comportement des paramètres météorologiques va être étudié pour les journées caractérisées par un dépassement du seuil horaire de 300 µg.m^{-3}, mais aussi pour les journées intermédiaires caractérisées par des maxima compris entre 200 et 300 µg.m^{-3}. Les meilleurs paramètres sont déterminés sur la zone VDR_COP, plus riche en capteurs de pollution, puis testés sur la zone VDR_SUP.

2.1 Observations au sol

Les observations au sol offrent l'avantage d'être connues en plusieurs points du domaine à fréquence élevée (pas de temps horaire) : il s'agit de stations météorologiques issues du réseau de Météo-France ou du réseau de COPARLY et SUPAIRE. A chaque zone citée précédemment ont été associés les sites météorologiques suivants :

- zone VDR_COP : le site de **Solaize (SOL)** a été retenu car il est de loin le plus central à la zone, équipé de capteurs de température et de vent (hauteur de la mesure à 10m). D'autres sites proches n'ont pas été retenus pour la raison suivante :
    - Caluire : série non continue car fréquents foudroiements en été (station arrêtée pendant six mois de l'année jusqu'en 2001)
    - Lafayette : vent fortement influencé par les bâtiments proches
    - Bron : site trop éloigné du domaine d'étude (notamment pour le vent)
- zone VDR_SUP : deux sites ont été choisis :
    - le site de **Roussillon (ROU)** pour la température, car la série est la plus complète sur la période étudiée
    - le site des **Roches de Condrieu (RDC)** pour le vent car les pics de pollution sont principalement observés dans ce secteur.

Le site EDF de **Loire sur Rhône (LSR)** a aussi été retenu pour sa mesure de vent à 50m, dans le cas où celui-ci apporterait une information complémentaire à une mesure au sol (Solaize ou les Roches).

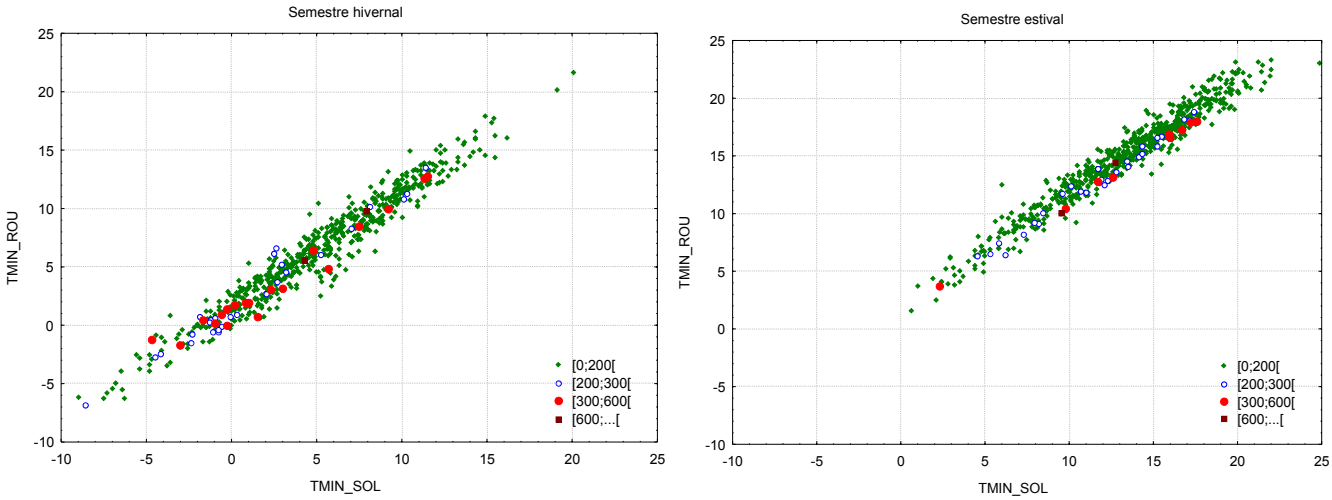
Ces mesures vont permettre de quantifier la dispersion horizontale des polluants près du sol (vitesse du vent), le sens de déplacement des masses d'air (direction), et l'impact de la température de l'air sur le brassage, voire sur les émissions.

Afin de déterminer si des conditions météorologiques différentes peuvent expliquer la non simultanéité des pics de pollution entre les zones VDR_COP et VDR_SUP, une comparaison des températures minimales et de la vitesse du vent va apporter des éléments de réponse.

2.1.1 Homogénéité des conditions météorologiques au sol sur le domaine d'étude

Température minimale journalière

Elle est représentative du moment où la stabilité des basses couches est généralement maximale. Elle est calculée selon les critères météorologiques internationaux, c'est-à-dire entre 18h UTC la veille et 18h UTC le jour. La comparaison de la température minimale journalière observée à Solaize et Roussillon (figures 19a et 19b) montre une excellente corrélation entre les séries, toutes saisons confondues, y compris lors des journées caractérisées par des niveaux de pollution élevés.



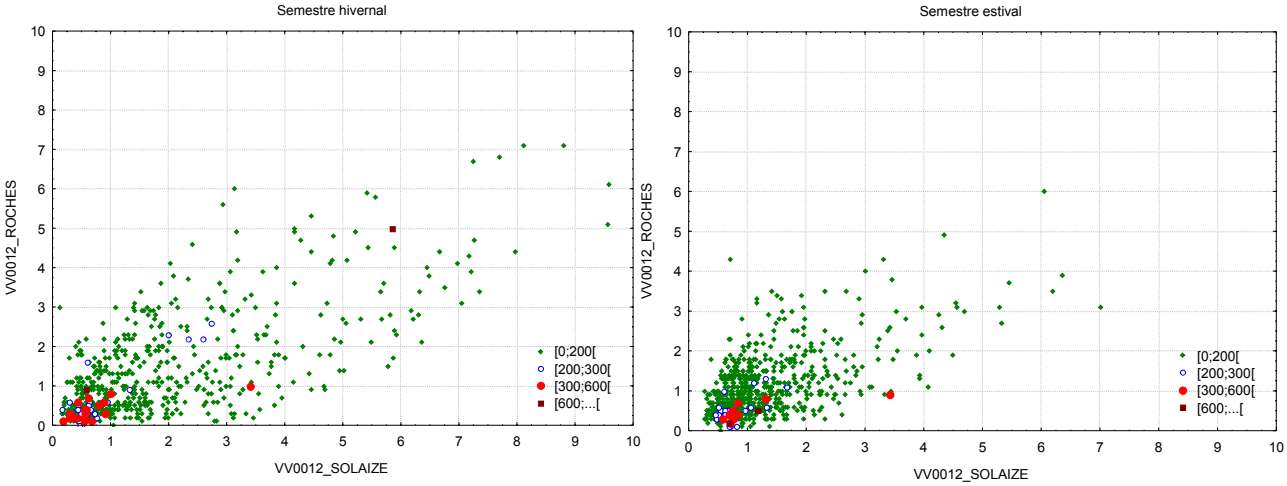
Figures 19a et 19b : comparaison de la température minimale observée à Solaize et Roussillon - hiver puis été

Journées hivers 1999-2002	0,97
Journées étés 1999-2002	0,98
Journées où MAX_VDR ≥ 200 µg.m^{-3}	0,99

Tableau 4 : coefficient de corrélation entre la température minimale observée à Solaize et Roussillon

Vent à 10m

La corrélation entre la vitesse du vent à Solaize et Roches de Condrieu (figures 20a et 20b) est beaucoup moins flagrante : elle est cependant meilleure en hiver qu'en été, ainsi que lors des dépassements des 200 µg.m^{-3} horaire, où r² atteint 0,84. Les mesures de vent sont donc représentatives d'une étendue géographique limitée, ce qui s'explique par la topographie complexe de la vallée du Rhône.



Figures 20a et 20b : comparaison de la vitesse du vent à 10m observée à Solaize et aux Roches de Condrieu - hiver puis été

Journées hivers 1999-2002	0,71
Journées étés 1999-2002	0,61
Journées où MAX_VDR ≥ 200 µg.m^{-3}	0,84

Tableau 5 : coefficient de corrélation entre la vitesse du vent à 10m observée à Solaize et aux Roches de Condrieu

Au regard de ces deux paramètres, on peut conclure :

- que la température minimale est relativement homogène sur la zone d'étude
- que le vent est davantage influencé par la topographie complexe de la vallée du Rhône et que des différences significatives peuvent être observées. En revanche, les vitesses associées à des vents faibles sont relativement homogènes entre les deux sites, plus particulièrement lors des dépassements de seuil.
- Que la non simultanéité des épisodes observés sur VDR_COP et VDR_SUP n'est pas liée à des conditions météorologiques au sol différentes.

2.1.2 Corrélation avec la vitesse et la direction du vent

Comme cela a été montré plus haut, les pics de pollution ont essentiellement lieu durant la matinée. On va donc s'intéresser au vent mesuré essentiellement avant le pic, le vent après le pic ne présentant aucun intérêt pour expliquer la hausse des niveaux. Il est préférable de quantifier le vent sur plusieurs heures, ce qui traduira davantage des conditions moyennes de dispersion horizontale. Cela est d'autant plus vrai pour la direction qui, prise isolément à une heure donnée, peut ne rien

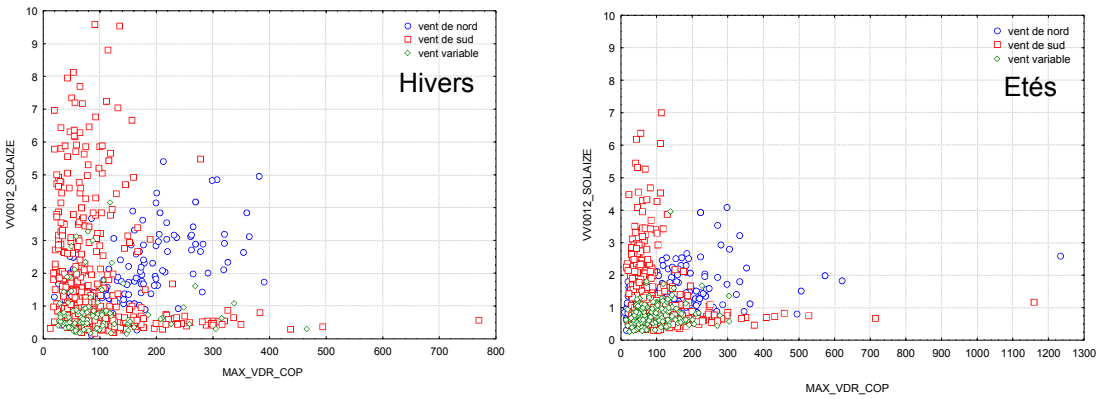
signifier (girouette bloquée sur une direction aléatoire par vent calme par exemple). Les directions de vent faible prises individuellement n'étant pas toujours exploitables, un traitement sur une période significative permet de tirer une information davantage corrélée avec le déplacement supposé des masses d'air à l'échelle locale. Dans un premier temps, le créneau retenu 00h-12h UTC englobe la majorité des dépassements de seuil.

La direction globale du vent est quant à elle déterminée selon la fréquence des trois classes de direction observées sur le même créneau :
- classe *nord* : direction du vent comprise entre 300° (NO) et 60° (NE)
- classe *sud* : direction du vent comprise entre 120° (SE) et 240° (SO)
- classe *vrb* : autres directions, principalement observées par vent calme

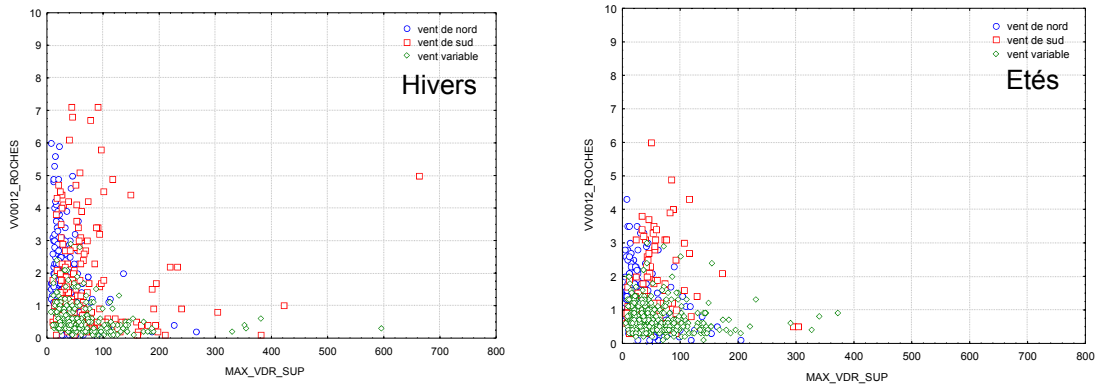
Pour un créneau donné avec au moins 75% des valeurs disponibles, la classe de direction globale est ainsi attribuée :

- à *nord* ou *sud* si l'une des deux fréquences est strictement supérieure à 50% (vents dominants en vallée du Rhône).
- à *variable* dans les autres cas.

Les figures 21 et 22 confrontent le maximum horaire journalier de chaque zone à la moyenne de la vitesse du vent entre 00 et 12h UTC et la direction.



Figures 21a et 21b : comparaison entre les concentrations maximales horaires et le vent moyenné entre 00h et 12h sur la zone VDR_COP - hivers puis étés 1999-2002



Figures 22a et 22b : comparaison entre les concentrations maximales horaires et le vent moyenné entre 00h et 12h sur la zone VDR_SUP - hivers puis étés 1999-2002

Excepté par vent de nord sur la zone VDR_COP, les concentrations élevées se rencontrent quasi systématiquement par vent faible, inférieur à 1 m.s^{-1}. En revanche,

les nombreuses journées caractérisées par un vent de nord soutenu sur la zone VDR_COP et des concentrations de polluants élevées semblent correspondre à des retombées directes de panache sur un capteur situé sous le vent d'une industrie. C'est le capteur de Feyzin Stade situé au sud de la raffinerie qui, par vent de nord établi, enregistre des valeurs sensiblement plus élevées que les autres capteurs (figure 23).

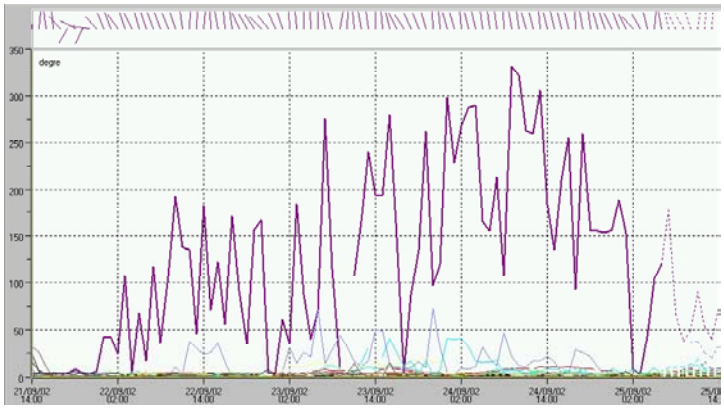
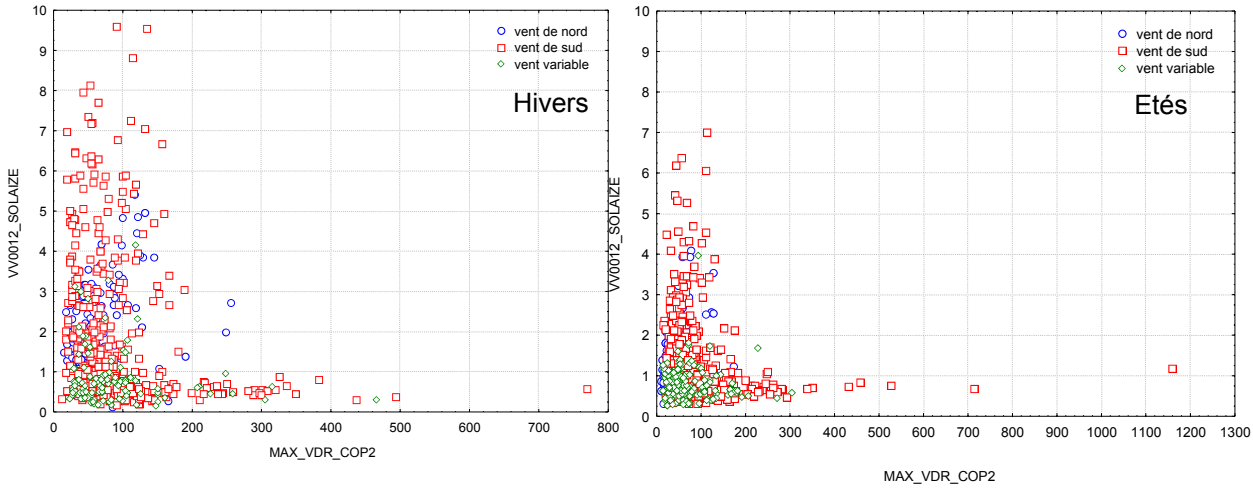


Figure 23 : évolution des concentrations horaires de SO_2 par site par vent de nord établi. La courbe présentant les niveaux les plus élevés est celle de Feyzin Stade.

En ôtant ce site du groupe VDR_COP (figures 24a et 24b), l'ensemble des journées avec dépassement du seuil réglementaire répond maintenant parfaitement au critère de vent inférieur à 1 $m.s^{-1}$. La direction nord n'est plus représentée, mais cela est en partie lié à la configuration du réseau de mesure, où bon nombre de sites sont sous le vent de sud des émetteurs. Les vents de direction variable ne sont pas prépondérants lorsque des concentrations élevées en SO_2 sont observées.



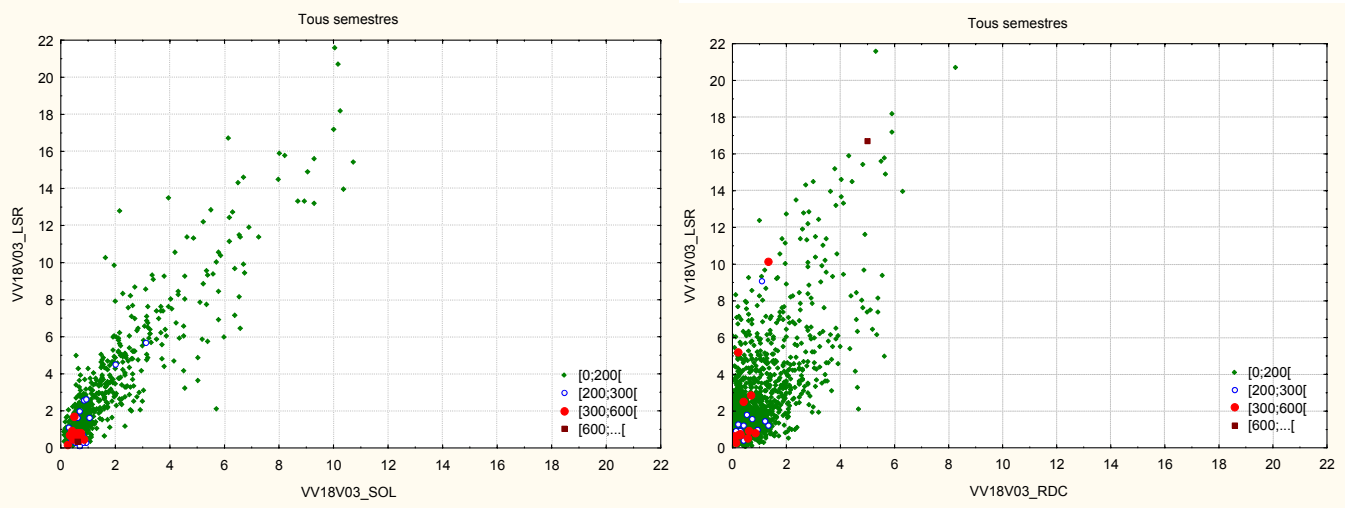
Figures 24a et 24b : comparaison entre les concentrations maximales horaires de la zone VDR_COP (sauf Feyzin Stade) et le vent moyenné entre 00h et 12h - hivers puis étés 1999-2002

Par la suite, les résultats présentés pour la zone VDR_COP ne tiendront plus compte des données du capteur de Feyzin Stade. La zone ainsi définie sera dénommée VDR_COP2.

D'autres créneaux ont été testés pour la vitesse du vent, ils sont caractérisés par :

- une heure de début de période comprise entre 18h UTC la veille et 06h le matin
- une heure de fin de période comprise entre 00h UTC et 12h.

La période optimale correspond à une vitesse de vent moyennée entre 18h la veille et 06h UTC (figures 25a et 25b). Le créneau 18h la veille et 03h UTC donne également de bons résultats et offre l'avantage de pouvoir anticiper des mesures de réduction des émissions soufrées. En combinant pour ce créneau la vitesse du vent à 10m (Solaize) avec un vent en altitude (Loire sur Rhône, dont la mesure est effectuée à une hauteur de 50m), on obtient une meilleure discrimination entre dépassements et non dépassements de seuil sur la zone VDR_COP2 : un grand nombre de situations à vent faible à Solaize (inférieur à 1 $m.s^{-1}$) associées à des vents plus marqués à Loire sur Rhône (supérieurs à 1 $m.s^{-1}$) ne donnent en effet lieu à aucun dépassement de seuil 300 $\mu g.m^{-3}$. Concernant les dépassements sur la zone VDR_SUP, le vent de Loire sur Rhône est moins discriminant, car probablement non suffisamment représentatif du vent à 50m dans ce secteur.



Figures 25a et 25b : combinaison des vents moyennés entre 18h la veille et 03h UTC à Loire sur Rhône :

- *et Solaize par classe de maximum de SO_2 observée sur la zone VDR_COP2*
- *et Roches par classe de maximum de SO_2 observée sur la zone VDR_SUP*

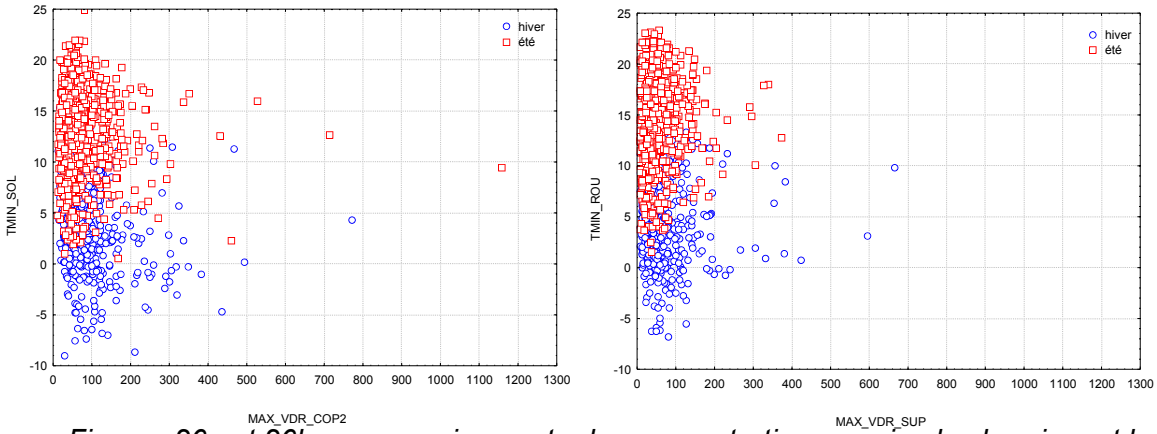
Si la journée type est ainsi définie pour la zone VDR_COP2, 147 journées « à risque » sont identifiées en hiver, pour 13 dépassements de seuil seulement (tableau 6). En été, seulement 6 journées pour 159 situations défavorables sont associées à un pic.

	Hivers 1999-2002		Etés 1999-2002	
	VV18V03_SOL<1 VV18V03_LSR<1	Autres cas	VV18V03_SOL<1 VV18V03_LSR<1	Autres cas
[0 ;200[	119	461	141	526
[200 ;300[	15	8	12	12
[300 ;600[	12	1	4	1
[600 ;…	1	0	2	0
TOTAL	147	470	159	539

Tableau 6 : contingence entre combinaison de vents faibles à Solaize et Loire sur Rhône et classe de maximum observé sur la zone VDR_COP2

2.1.3 Corrélation avec la température minimale

La température minimale est un bon indicateur de stabilité de début de matinée, puisqu'elle se produit généralement peu après le lever du soleil : une température minimale basse signifie souvent que le sol s'est refroidi durant la nuit et que la couverture nuageuse a été peu importante : de l'air froid s'accumule près du sol, rendant la dispersion des polluants limitée. Ce paramètre est également assez bien corrélé avec les émissions de SO_2 liées au chauffage (chaufferies…).
Qu'en est-il des concentrations observées ? Les figures 26a et 26b montrent une faible corrélation entre la température minimale et les concentrations maximales de SO_2, quels que soient la zone et le semestre considérés. Les émissions liées au chauffage ne semblent donc pas jouer de rôle significatif dans l'apparition des pics de pollution.



Figures 26a et 26b : comparaison entre les concentrations maximales horaires et la température minimale - zones VDR_COP2 puis VDR_SUP

2.1.4 Pour conclure

D'autres mesures au sol auraient pu être testées, mais :

- elles ne traduiraient pas davantage le caractère de stabilité d'une situation météorologique (pression, humidité)
- d'autres mesures ne sont pas directement disponibles sur les sites retenus et leur représentativité spatiale est aléatoire : c'est le cas des observations du site Météo-France de Lyon-Bron (occurrence de brouillard, visibilité, plafond nuageux…)

Il faut néanmoins souligner la bonne corrélation entre le vent au sol et les concentrations maximales, les épisodes d'hiver et d'été réagissant de façon homogène vis-à-vis de ce paramètre. Le seuil de 1 $m.s^{-1}$ traduit des conditions maximales de brassage au-delà desquelles les masses d'air chargées en SO_2 accumulées en altitude puis rabattues près du sol ne sont plus suffisamment denses pour induire des dépassements de seuil. La température ne constitue pas un facteur explicatif, tandis que le lien avec la direction du vent est fortement conditionné par la configuration du réseau, les vents variables n'étant pas caractéristiques de la majorité des épisodes pollués.

2.2 Données en altitude

Les données météorologiques d'altitude sont connues grâce à deux radiosondages effectués quotidiennement sur l'aéroport de Lyon St-Exupéry (altitude 235m), à 00h et 12h UTC, grâce à un ballon gonflé à l'hydrogène et équipé d'une radiosonde embarquée permettant de délivrer les paramètres température, humidité et pression. Le suivi de ce ballon est assuré par un radar terrestre, qui permet aussi de connaître les caractéristiques du vent en altitude (la vitesse du ballon étant supposée constante tout au long de son ascension). Il est ainsi possible de caractériser les conditions de stabilité verticale de l'atmosphère. Il faut toutefois se méfier de la structure des très basses couches (premières centaines de mètres) qui peut différer entre l'aéroport et la vallée du Rhône (effets du relief, effet d'îlot de chaleur de l'agglomération lyonnaise sur le nord du domaine d'étude). C'est pourquoi il faut d'abord s'assurer que le radiosondage est globalement représentatif des conditions de stabilité sur le domaine d'étude.

2.2.1 Traitement des données

Les données sont fournies par Météo-France (pression, température, humidité, direction et vitesse du vent) aux niveaux caractéristiques, c'est-à-dire lorsque les caractéristiques de l'atmosphère varient de façon significative : les données sont donc fournies à des niveaux indépendants à chaque sondage. Afin de mener à bien des comparaisons entre radiosondages, les paramètres température, pression et vitesse du vent ont été recalculés à des niveaux standards, identiques à ceux des sorties de modèles numériques météorologiques (pour une comparaison ultérieure avec des prévisions), allant de 50m à 1500m au-dessus du sol. A noter que le choix des niveaux arbitraires, à la place des niveaux caractéristiques, tend à sous-estimer l'ampleur de certaines inversions dont la base ou le sommet se situe entre deux niveaux standards. Une estimation de la direction du vent à 250m, 500m et 1000m a été également réalisée par la plus proche valeur connue pour ce paramètre.

2.2.2 Représentativité du radiosondage de Lyon St-Exupéry

Il est difficile d'estimer la représentativité du radiosondage de Lyon St-Exupéry sur le domaine d'étude, étant donné que les rares données disponibles en altitude sont issues de stations de mesure au sol situées en montagne, influencées par leur environnement (topographie). Les données qui leur sont associées ne sont donc pas strictement comparables à celles du radiosondage en atmosphère libre. Faute de mieux, une comparaison entre ces deux types de mesure va être réalisée en tenant compte de cette difficulté.
Les capteurs retenus sont les suivants :

- « dans » la vallée du Rhône lorsque les capteurs sont situés à plusieurs dizaines de mètres au-dessus du sol, pour limiter les effets directs du sol sur les mesures. Le site COPARLY de Loire sur Rhône, qui dispose d'une mesure de vent à 50m au-dessus du sol, va être comparé à l'estimation du vent provenant du radiosondage à 50m.
- « au-dessus » de la vallée du Rhône, à une altitude sol supérieure à 200m (l'altitude moyenne de la vallée du Rhône étant d'environ 150m, cela correspond à une altitude supérieure à 350m), dans un périmètre

inférieur à 30 km. Deux sites Météo-France mesurant la température et le vent répondent à ce critère :

- Bessey (altitude 425m) situé à 10 km à l'ouest de Roussillon (comparaison avec le niveau sol 200m du radiosondage). Le vent étant mesuré à 2m, donc trop influencé par le sol, seule la température sera comparée.
- Le Crêt de l'Oeillon (altitude 1370m) situé dans le massif du Pilat, à 15 km à l'ouest de Roussillon (comparaison avec le niveau sol 1250m du radiosondage).

Au niveau du sol, les données de la station de Lyon St-Exupéry vont être comparées à celles de Solaize.

<u>Représentativité de la température issue du radiosondage de Lyon St-Exupéry</u>

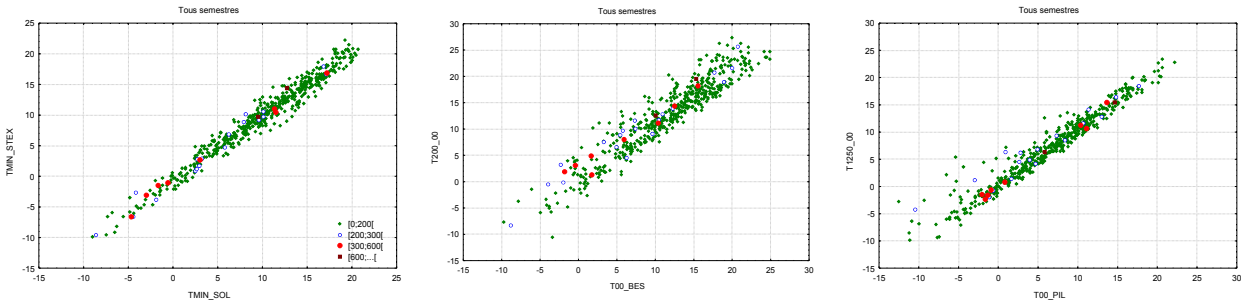
Le tableau 7 synthétise les coefficients de corrélation entre les données de température du radiosondage pour les hauteurs 200m et 1250m et les mesures des deux stations de Météo-France, pour chaque semestre et chaque réseau (00h et 12h UTC). A noter que seules les données postérieures au 27/02/2001 ont été prises en compte. Les corrélations sont dans l'ensemble très bonnes, y compris pour les journées caractérisées par des niveaux de pollution élevés.

Source : Météo-France

Site	Heure	Altitude sol du sondage	Journées hivers 2001-02	Journées étés 2001-02	Journées où MAX_VDR ≥ 200 µg.m^{-3}
Solaize	T mini	station	0,98	0,97	0,99
Bessey	00h UTC	200m	0,92	0,90	0,97
Bessey	12h UTC		0,97	0,97	0,99
Crêt Oeillon	00h UTC	1250m	0,93	0,98	0,96
Crêt Oeillon	12h UTC		0,93	0,97	0,98

Tableau 7 : coefficient de corrélation entre la température du radiosondage et chacun des deux sites de mesure.

Les figures 27a à 27c illustrent la bonne relation existant la température à 00h UTC du radiosondage et celle des deux sites de mesure au sol, toutes saisons confondues. Il en va de même pour la température au sol de Solaize et de St-Exupéry.



Source : Météo-France

Figures 27a 27b et 27c : comparaison entre la température :

- *Minimale de Solaize et Lyon-St-Exupéry*
- *A 00h de Bessey et du radiosondage (niveau 200m)*
- *A 00h du crêt de l'Oeillon et le radiosondage (niveau 1250m)*

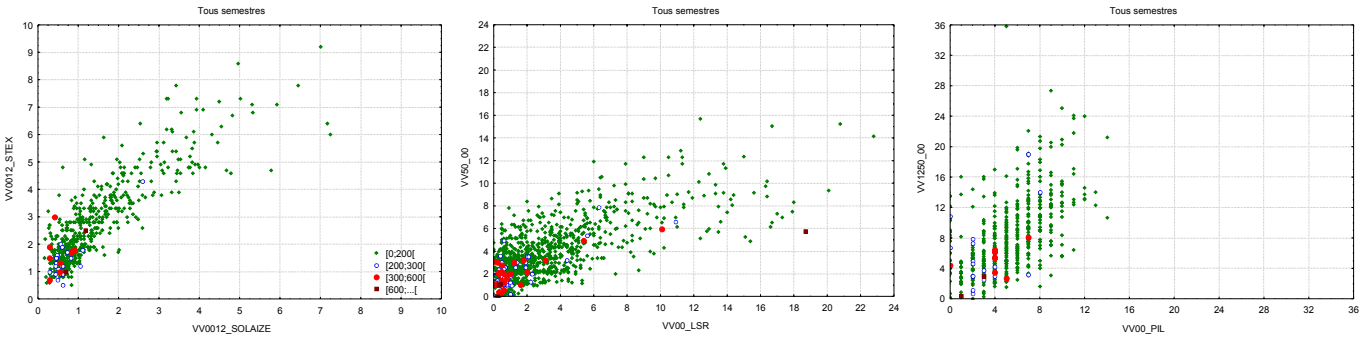
La température du radiosondage est donc globalement représentative de celle observée sur la zone d'étude, la corrélation augmentant au fur et à mesure que l'on s'éloigne du sol, ainsi qu'en été.

Représentativité de la vitesse du vent issue du radiosondage

Pour la vitesse du vent (figures 28a à 28c), les coefficients de corrélation sont beaucoup moins bons. Pour le site situé dans le massif du Pilat, les écarts observés peuvent s'expliquer par le fait qu'une mesure en atmosphère libre est comparée à une mesure au sol influencée par son environnement (topographie – relief et occupation du sol). Pour Loire sur Rhône, les résultats montrent des différences parfois significatives, en particulier sur les vents faibles : les vents observés à l'aéroport sont assez souvent plus élevés que ceux observés à Loire sur Rhône. Cela s'explique assez facilement par la configuration géographique des deux sites :

- Loire sur Rhône est situé entre deux système de collines d'une hauteur comprise entre 200m à l'est et 500m à l'ouest
- L'aéroport est situé sur une zone dépourvue de toute colline significative.

Le radiosondage tend à surestimer les vents observés dans les très basses couches sur le domaine d'étude. Les données de vent du Pilat sont plus faibles que celles du radiosondage, mais elles sont globalement comparables lors des épisodes.



Source : Météo-France

Figures 28a 28b et 28c : comparaison entre la vitesse du vent :

- *Moyennée de 00h à 12h à Solaize et Lyon-St-Exupéry*
- *A 00h de Loire sur Rhône et du radiosondage (niveau 50m)*
- *A 00h du crêt de l'Oeillon et du radiosondage (niveau 1250m)*

Source : Météo-France

Site	Heure	Niveau RS équivalent	Journées hivers 2001-02	Journées étés 2001-02	Journées où MAX_VDR ≥ 200 µg.m^{-3}
Solaize	00h-12h	sol	0,86	0,87	0,70
Loire sur R.	00h UTC	50m	0,70	0,65	0,43
Loire sur R.	12h UTC		0,83	0,83	0,74
Crêt Oeillon	00h UTC	1250m	0,55	0,58	0,42
Crêt Oeillon	12h UTC		0,58	0,50	0,58

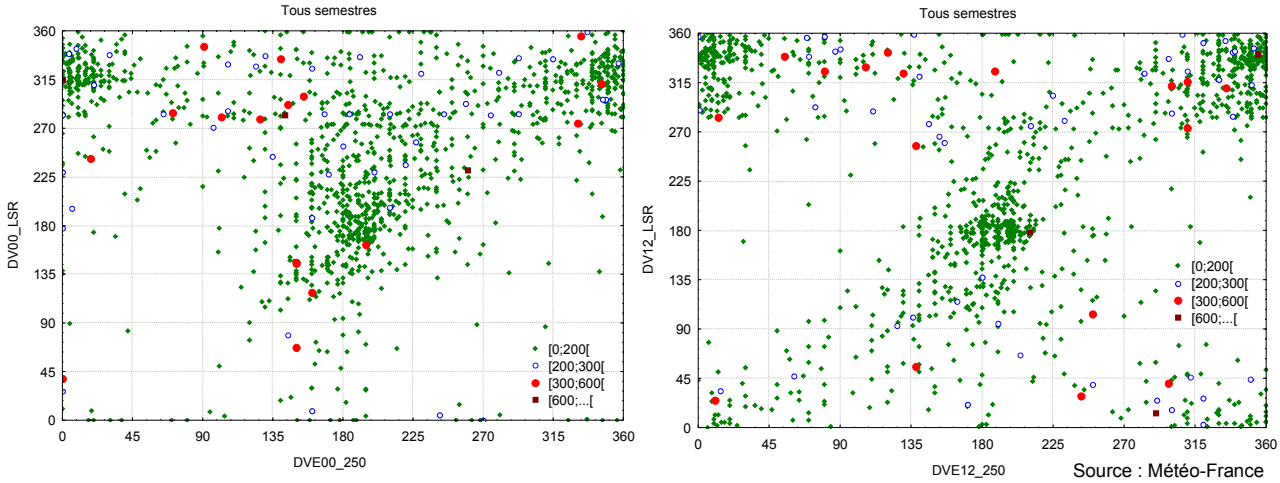
Tableau 8 : coefficient de corrélation entre la vitesse du vent du radiosondage et de chacun des deux sites de mesure.

A noter que les vents inférieurs à 1 m.s^{-1} sont sensiblement plus nombreux à Solaize qu'à l'aéroport, situé dans une zone dégagée de tout relief significatif. Ce constat doit être nuancé du fait :

- que les vents horaires de Météo-France sont des moyennes 10 minutes arrondies au m.s^{-1}, tandis que le vent des sites COPARLY et SUPAIRE sont des moyennes horaires non arrondies.
- que les vitesses de vent Météo-France sont arithmétiques, alors que celles des sites COPARLY et SUPAIRE sont vectorielles (donc légèrement inférieures ou égales aux vitesses arithmétiques).

<u>Représentativité de la direction du vent issue du radiosondage</u>

Elle se limite à la comparaison entre la direction du vent à Loire sur Rhône (mesure à 50m) et celle du radiosondage la plus proche du niveau 250m (figures 29a et 29b), les directions de vent au sol en vallée du Rhône étant fortement conditionnées par le relief.



Figures 29a et 29b : comparaison des directions de vent entre Loire sur Rhône et le radiosondage de St-Exupéry – valeurs à 00h puis 12h

Les journées où la corrélation entre les directions de vent est bonne correspondent à la diagonale d'une part, mais aussi aux quatre coins du graphique correspondant à des vents de NO à NE. Si les directions semblent un peu mieux corrélées à 12h qu'à 00h, elles demeurent cependant assez hétérogènes si l'on considère les journées associées à des concentrations en SO_2 élevées. Cela confirme la non représentativité des vents du radiosondage dans les très basses couches.

Au regard de ces paramètres, on peut conclure :

- que les données de température du radiosondage sont extrapolables à la zone d'étude. L'effet d'îlot de chaleur de l'agglomération lyonnaise ne semble pas affecter de façon significative les valeurs relevées à Solaize, par comparaison à celles de Roussillon et de St-Exupéry.
- que la zone d'étude est globalement moins ventilée que l'aéroport dans les très basses couches (sur les 200 premiers mètres). Il est difficile de conclure sur la représentativité du vent à 1250m au regard des comparaisons avec le site du Crêt de l'Oeillon. On peut néanmoins

considérer qu'au-dessus de 1000m le vent du radiosondage est globalement représentatif des conditions observées au-dessus de la vallée du Rhône car :

- les effets du sol sur le vent deviennent négligeables à cette altitude.
- aucun relief de plus de 500m d'altitude ne sépare l'aéroport du domaine d'étude (la présence du massif du Pilat à l'ouest du domaine peut constituer un effet d'abri dans certains cas).
- le point le plus méridional du domaine d'étude est situé à moins de cinquante kilomètres du lieu de radiosondage.

2.2.3 Corrélation avec les inversions de température

La présence d'une inversion de température résulte de deux phénomènes distincts :

- la nuit par ciel clair et vent faible, le sol se refroidit et refroidit par conduction les très basses couches de l'atmosphère, sur quelques centaines de mètres). Les polluants émis sont alors piégés dans cette couche d'inversion ;
- l'arrivée d'air chaud en altitude génère une inversion dite de subsidence. Cette inversion peut persister plusieurs jours avant de s'abaisser parfois jusqu'au sol.

Pour chaque profil vertical de température ont été déterminées plusieurs caractéristiques associées à la première inversion du radiosondage.

2.2.3.1 Hauteur de la base de la première inversion

Exprimée en mètres au-dessus du sol, elle est codée en six classes (tableaux 9 et 10). Les inversions au sol sont majoritairement observées lors des dépassements de seuil, mais a contrario un grand nombre d'inversions au sol ne donnent pas lieu au dépassement du seuil 200 µg.m^{-3}.

Source : Météo-France

	Hivers 1999-2002				Etés1999-2002			
	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600
sol	264	20	9	1	339	20	6	2
<250	17	0	1	0	24	2	0	0
[250 ; 500 [	36	1	0	0	28	0	0	0
[500 ; 1500 [	83	2	1	0	40	0	0	0
≥1500	153	0	1	0	155	0	0	0
aucune	23	0	0	0	90	0	0	0
TOTAL	576	23	12	1	676	22	6	2

Tableau 9 : fréquence des journées en fonction de la hauteur de la base de la première inversion de température et des maxima observés sur la zone VDR_COP2.

Source : Météo-France

	Hivers 1999-2002				Etés1999-2002			
	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600
sol	284	4	6	0	351	5	1	0
<250	18	0	0	0	26	0	0	0
[250 ; 500 [	36	1	0	0	25	1	1	0
[500 ; 1500 [	86	0	0	0	39	0	0	0
≥1500	152	1	0	1	145	0	1	0
aucune	23	0	0	0	89	0	1	0
TOTAL	599	6	6	1	675	6	4	0

Tableau 10 : fréquence des journées en fonction de la hauteur de la base de la première inversion de température et des maxima observés sur la zone VDR_SUP

2.2.3.2 Amplitude de la première inversion

Exprimée en °C/100m, elle est codée en quatre catégories (tableaux 11 et 12). Les inversions de forte amplitude n'expliquent pas vraiment les dépassements de seuil, les plus fortes concentrations (au-dessus de 600 µg.m^{-3}) étant associées à une amplitude d'inversion inférieure à 2°C/100m.

Source : Météo-France

	Hivers 1999-2002				Etés1999-2002			
	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600
< 1	335	13	3	1	418	11	1	1
[1 ; 2 [	154	7	6	0	114	10	5	1
[2 ; 4 [	58	3	2	0	29	1	0	0
≥4	2	0	1	0	4	0	0	0
NC	27	0	0	0	111	0	0	0
TOTAL	576	23	12	1	676	22	6	2

Tableau 11 : fréquence des journées en fonction de l'amplitude de la première inversion de température et des maxima observés sur la zone VDR_COP2

Source : Météo-France

	Hivers 1999-2002				Etés1999-2002			
	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600
< 1	346	4	2	0	406	5	2	0
[1 ; 2 [	162	2	2	1	126	1	0	0
[2 ; 4 [	61	0	2	0	29	0	1	0
≥4	3	0	0	0	4	0	0	0
NC	27	0	0	0	110	0	1	0
TOTAL	599	6	6	1	675	6	4	0

Tableau 12 : fréquence des journées en fonction de l'amplitude de la première inversion de température et des maxima observés sur la zone VDR_SUP

2.2.3.3 Epaisseur de la première inversion

Exprimée en mètres, elle est codée en quatre catégories (tableaux 13 et 14) Les inversions entre 100 et 500m d'épaisseur caractérisent le plus grand nombre de dépassements, mais ce sont aussi les plus nombreuses d'un point de vue climatologique.

Source : Météo-France

	Hivers 1999-2002				Etés1999-2002			
	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600
<100	31	1	2	0	30	1	0	0
[100 ;250[	280	10	5	0	256	14	4	1
[250 ;500[	129	5	4	0	189	7	2	1
≥ 500m	109	7	1	1	86	0	0	0
NC	27	0	0	0	115	0	0	0
TOTAL	576	23	12	1	676	22	6	2

Tableau 13 : fréquence des journées en fonction de l'épaisseur de la première inversion de température et des maxima observés sur la zone VDR_COP2

Source : Météo-France

	Hivers 1999-2002				Etés1999-2002			
	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600
<100	33	0	0	1	29	1	1	0
[100 ;250[	288	3	4	0	262	3	1	0
[250 ;500[	135	2	1	0	190	1	1	0
≥ 500m	116	1	1	0	80	1	0	0
NC	27	0	0	0	114	0	1	0
TOTAL	599	6	6	1	675	6	4	0

Tableau 14 : fréquence des journées en fonction de l'épaisseur de la première inversion de température et des maxima observés sur la zone VDR_SUP

Ces résultats, moyennement satisfaisants, peuvent être liés au fait que les épisodes de pollution se produisent généralement lors de la persistance de conditions météorologiques stables, ce qui explique que la présence d'une inversion de température le matin même ne suffit pas toujours à donner une idée précise des taux de pollution. Il est cependant difficile de déterminer de façon automatique des durées de persistance d'inversion, car :

- leurs caractéristiques varient dans le temps (hauteur et température de la base) : par exemple, comment interpréter la disparition entre deux radiosondages d'une inversion en altitude au profit d'une inversion près du sol ? S'il s'agit de la même inversion (l'air chaud d'altitude gagne le sol), il y a accumulation des polluants, dans le cas contraire, les polluants ont pu s'évacuer vers le haut…
- on ne dispose que de deux radiosondages par jour, ce qui n'exclut pas qu'entre deux radiosondages caractérisés par une inversion de température, il n'y ait pas une rupture d'inversion.

De nombreux algorithmes de calcul de hauteur de mélange[3] existent, mais ils sont pour la plupart sensibles au moindre changement de paramètre (la hauteur de mélange peut ainsi passer de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres, ce qui en terme de dispersion change complètement la donne !).

Des durées de persistance d'inversions (exprimées en jour) inférieures à une hauteur donnée n'apportent pas d'information primordiale : les tableaux 15a et 15b illustrent le cas de la persistance (en nombre de jours) d'au moins une inversion dont la base est inférieure à 1000m. En hiver, le pourcentage de journées avec dépassement de

[3] Hauteur au-dessus du sol jusqu'à laquelle les polluants peuvent se disperser.

seuil augmente avec le nombre de jours de persistance de l'inversion, alors qu'en été il s'agit plutôt d'inversions ne persistant pas.

Source : Météo-France

Hivers	0j	1j	2j	3j	4j	5j	>5j
[0 ;200[	188	216	60	35	21	11	11
[200 ;300[	2	14	7	2	0	0	3
[300 ;600[	1	7	4	2	2	1	0
≥600	1	0	0	1	0	0	0
TOTAL	192	237	71	40	23	12	14

Etés	0j	1j	2j	3j	4j	5j	>5j
[0 ;200[	164	332	44	11	3	2	1
[200 ;300[	0	26	2	0	0	0	0
[300 ;600[	1	6	0	1	0	0	0
≥600	0	1	1	0	0	0	0
TOTAL	165	365	47	12	3	2	1

Tableaux 15a et 15b : contingence entre persistance d'inversion de température dont la base est inférieure à 1000 mètres et classe de maximum observé sur la zone VDR - hiver puis été.

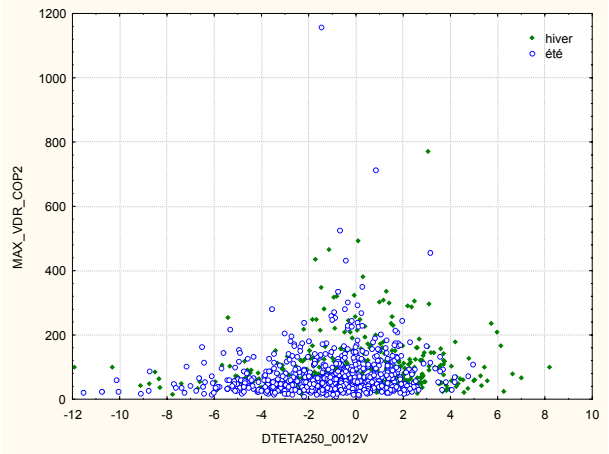
La présence d'air chaud d'altitude gagnant peu à peu le sol est souvent à l'origine des pics de pollution, par rabattement au sol des masses d'air chargées en SO_2 accumulées sous cette inversion. La quantification de cette advection d'air chaud peut être un bon indicateur d'élévation des niveaux de SO_2.

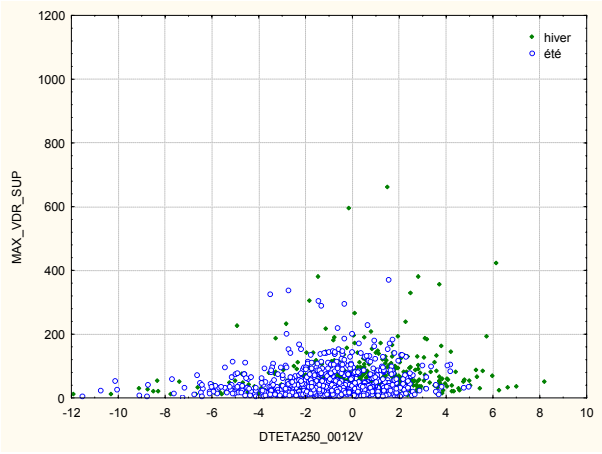
2.2.5 Corrélation avec une advection d'air chaud en altitude

Il s'agit de mettre en évidence le réchauffement des basses couches de l'atmosphère, indépendamment du réchauffement diurne, suite à un changement de masse d'air qui s'opère en altitude dans un premier temps avant de gagner le sol par la suite.
La mise en évidence d'un réchauffement en altitude est réalisée au moyen de la température potentielle TETA[4]. Ce paramètre permet de s'affranchir de l'altitude à laquelle cette température est considérée. Pour une simplicité de calcul, ce paramètre a été préféré à la température pseudo-adiabatique potentielle[5] que les météorologues utilisent habituellement pour caractériser les masses d'air. Ce paramètre est ainsi calculé pour différents niveaux dits standards (compatibles avec les sorties de modèles numériques météorologiques) allant de 50m à 1500m au-dessus du sol.
Divers écarts de température potentielle (DTETA) sont testés entre le matin 00h UTC et la veille 12h UTC pour un niveau ou une moyenne sur différents niveaux. Les figures 30a et 30b présentent les concentrations maximales de SO_2 sur les zones VDR_COP2 et VDR_SUP en fonction de l'écart de température potentielle à 250m entre le matin 00h et la veille 12h UTC. Les dépassements de seuil sont pour la plupart d'entre eux caractérisés par des écarts de température potentielle positif, synonymes d'un réchauffement de la masse d'air par le haut. Ce paramètre est cependant guère discriminant, car les plus forts écarts ne sont pas caractérisés par des dépassements de seuil.

[4] Température prise par une particule d'air sec amenée adiabatiquement, c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'extérieur, au niveau de pression 1000 hPa
[5] Température prise par une particule saturée amenée au niveau de pression 1000hPa en suivant une transformation pseudo-adiabatique tout en restant saturée

Source : Météo-France





Figures 30a et 30b : comparaison entre le maximum de SO_2 et la variation de TETA à 250m entre 00h et 12h la veille - zones VDR_COP2 puis VDR_SUP

2.2.6 Rotation des vents en altitude

La direction du vent en altitude a été préférée à celle du vent au sol, car moins liée à la topographie d'un site de mesure au sol : par exemple sur le site de Solaize, une bascule de vent au sol du sud vers le nord est fréquemment observée en matinée (surtout l'été), vraisemblablement liée à une inversion des vents thermiques qui s'établissent entre les zones urbaines denses (qui jouent le rôle d'îlot de chaleur) et des zones périurbaines. Cette bascule n'est pas extrapolable à l'ensemble du domaine d'étude.

La première étape consiste à déterminer la direction du vent pour quelques niveaux standards, à partir des données du radiosondage connues au niveau caractéristique le plus proche. La bascule de vent est définie entre 00h et 12h UTC, créneau horaire où la majorité des pics se produisent, comme une rotation de plus de X degrés de la direction d'un radiosondage à l'autre. Les tableaux 16 et 17 confrontent les dépassements de seuil associés à une bascule définie pour X=90° (par exemple pour un vent de 360° (nord) à 00h passant de 91° (ESE) à 269° (OSO)).

Source : Météo-France	Hivers 1999-2002		Etés 1999-2002	
	Pas de bascule	Bascule	Pas de bascule	Bascule
[0 ;200[	457	107	474	167
[200 ;300[	17	6	12	9
[300 ;600[	8	2	3	3
≥600	0	1	2	0
TOTAL	482	116	491	179

Tableau 16 : contingence entre bascule du vent à 250m entre 00h et 12h à Lyon St-Exupéry et classe de maximum observé sur les zones VDR_COP2

Source : Météo-France	Hivers 1999-2002		Etés 1999-2002	
	Pas de bascule	Bascule	Pas de bascule	Bascule
[0 ;200[	472	115	468	171
[200 ;300[	5	1	2	4
[300 ;600[	4	0	3	1
≥600	1	0	0	0
TOTAL	482	116	473	176

Tableau 17 : contingence entre bascule du vent à 250m entre 00h et 12h à Lyon St-Exupéry et classe de maximum observé sur les zones VDR_SUP

La majorité des dépassements de seuil n'est pas liée à une bascule de vent, bien que ces bascules ne représentent climatologiquement que 20% des cas. Si l'on considère les dépassements du seuil 200 µg.m^{-3} en été, près de la moitié des pics est caractérisée par une bascule, alors que cette situation météorologique se produit un peu plus d'une fois sur quatre. Il faut cependant souligner qu'il est difficile d'estimer une bascule de vent à partir de données en altitude disponibles deux fois par jour seulement.

2.2.7 Vitesse du vent en altitude

Le vent du radiosondage n'étant pas représentatif des conditions rencontrées dans la vallée du Rhône dans les très basses couches, seuls les niveaux supérieurs à 500m sont testés. La figure 31 confronte la vitesse du vent à Loire sur Rhône et à 500m au-dessus de St-Exupéry en fonction des maxima horaires sur tout le domaine d'étude (VDR). Ce paramètre est nettement moins explicatif que le vent de Loire sur Rhône. Considérée à une hauteur au-dessus des très basses couches, le vent n'apporte pas d'information utile à la compréhension de l'élévation des niveaux de SO_2.

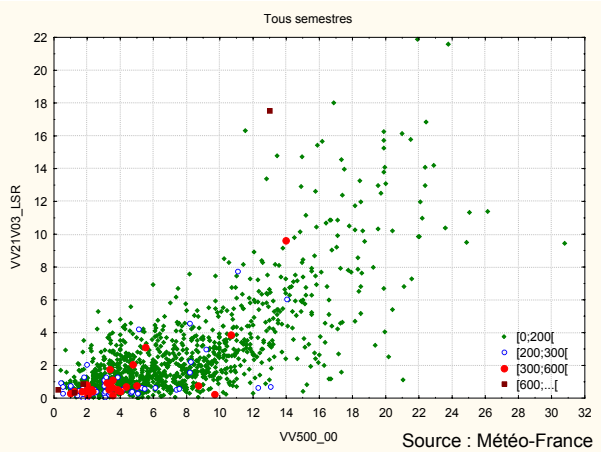


Figure 31 : comparaison entre le vent à 500m à 00h et le vent moyenné à Loire sur Rhône entre 18h la veille et 3h déduit du radiosondage et le maximum horaire de SO_2 pour la zone VDR

2.2.8 Synthèse

L'analyse univariée a permis de hiérarchiser les critères météorologiques favorables aux pics de pollution :

- la vitesse du vent : c'est de loin le paramètre le plus explicatif. La combinaison d'un vent au sol et d'un vent en altitude n'est absolument pas redondant, mais permet de mieux cibler les situations à risque. La représentativité de ce paramètre est spatialement très limitée.
- La présence d'une inversion de température au sol est dans la plupart des cas favorable aux pics. L'amplitude et l'épaisseur de cette inversion ne constituent pas des facteurs explicatifs.
- La bascule du vent amplifie généralement les pointes observées. Elle est cependant difficile à estimer, puisque l'on ne dispose que de la mesure de la direction du vent du radiosondage deux fois par jour, les

directions mesurées au sol étant trop tributaires des effets du relief (y compris la mesure de Loire sur Rhône à 50m de hauteur).

- L'advection d'air chaud d'altitude joue un rôle certain dans le rabattement près du sol des masses d'air chargées en SO_2 en altitude, mais cela n'apparaît pas aussi clairement au travers des variables testées.

L'étude du vent a permis de distinguer deux types de pointes de SO_2 :

- la retombée d'un panache industriel ;
- le rabattement au sol des masses d'air chargées en SO_2 en altitude, soit lors d'une rupture d'inversion, soit lorsque de l'air chaud en altitude gagne le sol.

La corrélation avec les données de stabilité verticale (inversion de température, vent en altitude, bascules) est quelque peu décevante. Ce constat peut s'expliquer par le fait que le radiosondage n'est pas réalisé dans la vallée du Rhône, ce qui pose un problème pour la représentativité du vent, mais aussi par le fait que ces données ne sont disponibles que deux fois par jour (il manque notamment un radiosondage en fin de nuit, au moment où les basses couches de l'atmosphère sont en moyenne les plus stables).

La dernière partie de ce rapport propose quelques pistes de réflexion sur la surveillance et la prévisibilité de ces types d'épisodes.

3. Quelques éléments pour la mise en place d'une stratégie de surveillance

3.1 L'information du public à ce jour

Deux procédures d'information du public existent actuellement sur le Rhône et le nord-Isère.

Rhône

Depuis le 12/06/1996 : procédure d'information et d'alerte pour le SO_2 sur le Rhône, par arrêté préfectoral puis interpréfectoral. Le critère de déclenchement est le dépassement du seuil horaire de 300 µg.m^{-3} sur au moins deux sites à moins de trois heures d'intervalle. Depuis juillet 1999, l'étendue géographique du dispositif se limite à l'agglomération lyonnaise, avec au moins un dépassement sur un site des communes Lyon/Villeurbanne et petite couronne.

Depuis début 1999, quatre journées ont été caractérisées par un dépassement du seuil de 300 µg.m^{-3} sur au moins deux sites de la zone VDR_COP (donc sans information du public), à moins de trois heures d'intervalle :

- Le 08/10/1999 :
  - 407 µg.m^{-3} à 13h locales à Solaize
  - 595 µg.m^{-3} à 13h locales à Feyzin Mairie
  - 770 µg.m^{-3} à 12h locales à Feyzin Stade
- le 10/08/2000 :
  - 300 µg.m^{-3} à 11h locales à St-Genis Laval
  - 527 µg.m^{-3} à 10h locales à St-Fons Centre
- le 16/11/2000 :
  - 493 µg.m^{-3} à 12h locales à Feyzin Mairie
  - 494 µg.m^{-3} à 14h locales à Feyzin Stade
- le 20/01/2002 :
  - 303 µg.m^{-3} à 15h locales à St-Fons Clochettes
  - 305 µg.m^{-3} à 15h locales à Pierre Bénite

Les pointes ponctuelles ne touchant qu'un seul site sont inventoriées dans le tableau 18.

	1999	2000	2001	2002*
[300 ;600[	12	11	12	8
≥600	1	0	3	0
TOTAL	13	11	15	8

** du 01/01 au 30/09*

Tableau 18 : nombre annuel de jours caractérisés par un dépassement de seuil réglementaire sur un seul site de la zone VDR_COP.

Nord-Isère

Une procédure d'information et d'alerte a été mise en place en juillet 2002 sur le domaine de Vienne-Roussillon. Le critère de déclenchement pour le SO_2 est le dépassement du seuil horaire de 300 µg.m^{-3} sur au moins deux sites, dont un site urbain (Roussillon ou Vienne), à moins de trois heures d'intervalle.

Aucun épisode ainsi défini n'a été recensé sur cette zone depuis le début 1999. Le tableau 19 présente le nombre annuel de journées caractérisées par un épisode ponctuel ne touchant qu'un seul site.

	1999	2000	2001	2002*
[300 ;600[	3	4	1	4
≥600	0	1	0	0
TOTAL	3	5	1	4

** du 01/01 au 30/09*

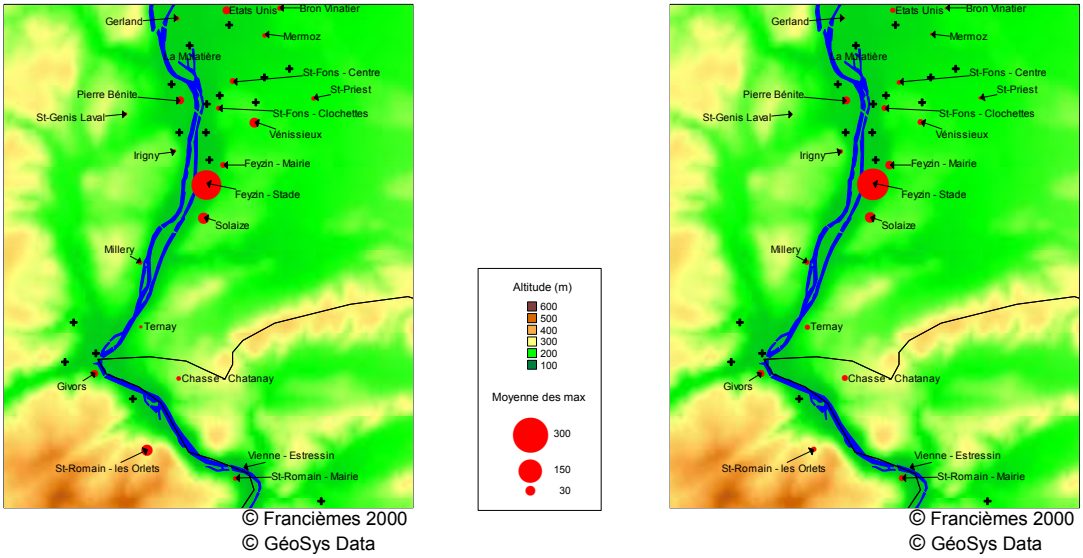
Tableau 19 : nombre annuel de jours caractérisés par un dépassement de seuil réglementaire sur un seul site de la zone VDR_SUP.

3.2 Stratégie de surveillance par épisode type

L'analyse météorologique permet de dégager deux types d'épisodes pollués : la retombée d'un panache industriel et le rabattement d'une masse d'air chargée en SO_2 accumulée en altitude.

3.2.1 Cas d'une retombée d'un panache industriel

Ce phénomène, qui se produit par rabattement d'un panache industriel vers le sol par vent établi, est relativement aléatoire car il concerne une zone géographique limitée, de l'ordre de quelques kilomètres autour du site émetteur. Ce phénomène a été essentiellement mis en évidence sur le capteur de Feyzin Stade, au sud de la raffinerie de Feyzin qui est le plus gros émetteurs de SO_2 de la zone d'étude. La carte 2 représente la moyenne par site des maxima horaires observés durant les journées pour lesquelles l'unique capteur de Feyzin Stade a dépassé le seuil horaire de 200 µg.m^{-3}. Ces situations correspondant généralement à un vent de nord établi, les capteurs situés au sud de la raffinerie (donc sous le vent), excepté celui de Feyzin Stade, sont caractérisés par des valeurs nettement moins élevées, aucun site ne relevant de dépassement de seuil simultanément (tableau 20).



Carte 2 : moyenne par site des maxima horaires observés durant les journées pour lesquelles le capteur de Feyzin Stade a dépassé seul les 200 µg.m^{-3} sur la période 1999-2002 (hivers puis été)

Sites	Hivers 1999-2002		Etés 1999-2002	
	Moy des maxi	Max des maxi	Moy des maxi	Max des maxi
Irigny	7	28	9	168
Feyzin Stade	272	390	297	1232
Feyzin Mairie	19	55	29	126
Solaize	54	120	44	132
Millery	11	99	12	124

Tableau 20 : moyenne et maximum des maxima horaires observés par retombée du panache de la raffinerie de Feyzin occasionnant le dépassement du seuil de 300 µg.m^{-3}

A noter que ce genre de retombée n'est pas systématiquement détecté dans le cas où l'analyseur n'est pas exactement sous le vent de la cheminée de l'émetteur, ou si le vent s'écarte légèrement de sa direction dominante. En ce qui concerne la surveillance de la raffinerie, le réseau de mesure pourrait être complété par une mesure en proximité nord de l'industriel, afin de détecter les éventuelles retombées de panache par vent de sud. Son emplacement exact pourrait être optimisé à partir de la rose des vents de Solaize pour déterminer la direction précise des vents de sud dominants dans cette zone.

Ce type d'épisode a également été observé sur le site des Roches de Condrieu, mais reste minoritaire. Le 23/11/2000 à 11h locales, la concentration horaire de SO_2 la plus élevée sur la période 1999-2002 a été observée par un fort vent de sud à sud-est.

Des retombées de panache de la centrale de Loire sur Rhône sont parfois observés, comme cela a été vraisemblablement le cas le 13/09/2001 (maximum horaire à St-Romain les Orlets de 1158 µg.m^{-3} à 9h locales). Cet épisode a d'ailleurs concerné deux sites de SUPAIRE (258 µg.m^{-3} à Vienne Estressin à la même heure et 304 µg.m^{-3} aux Roches à 10h). Bien que les vents au sol soient globalement orientés sud, le vent en altitude a pu être orienté nord au regard des données du radiosondage.

Ce type d'épisode n'est évidemment pas prévisible, puisqu'il dépend essentiellement des émissions industrielles. A noter que pour la zone VDR_COP2, les dépassements liés aux retombées de panache sur le capteur de Feyzin Stade représentent près de 45% de l'ensemble des dépassements en hiver et 60% en été (tableau 21).

	Hivers 1999-2002	Etés 1999-2002
Journées avec dépassement localisé sur Feyzin Stade et second maximum inférieur à 200 µg.m^{-3}	12	14
Autres journées avec dépassements	15	10

Tableau 21 : part des dépassements du seuil de 300 µg.m^{-3} liés à une retombée de panache

3.2.2 Le rabattement d'une masse d'air chargée en SO_2 accumulée en altitude

Lorsque les basses couches de l'atmosphère sont associées à une inversion de température, les polluants émis (SO_2) se bloquent au niveau de la base de cette inversion, ou quelques dizaines de mètres au-dessus des cheminées lorsqu'il s'agit d'une inversion au sol. Deux cas peuvent alors conduire à un rabattement de la masse d'air chargée en SO_2 :

- lorsque l'inversion se situe au sol, le réchauffement des basses couches durant la journée par évolution diurne (rayonnement solaire) finit par atteindre la hauteur à laquelle les polluants sont bloqués : le brassage atmosphérique (instabilité) induit du sol jusqu'à la base de l'inversion va alors rabattre ces polluants près du sol (figure 32).
- Lorsque l'inversion se situe en altitude, en présence d'une masse d'air chaud, la masse d'air chargée en SO_2 peut alors être rabattue au sol si cet air chaud atteint le sol.

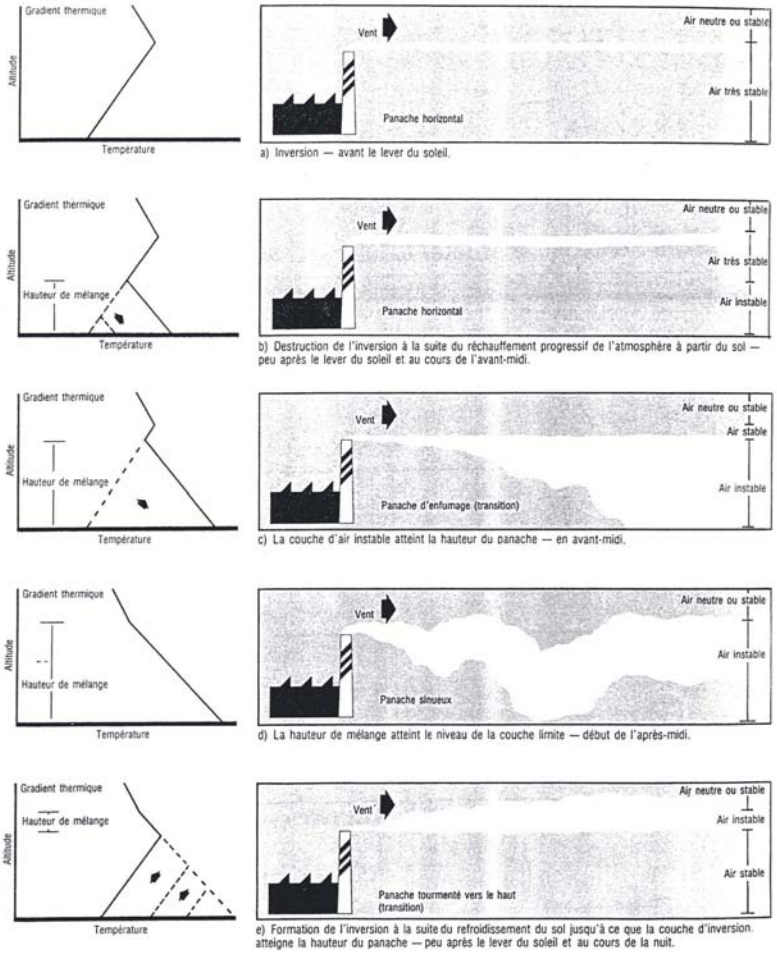
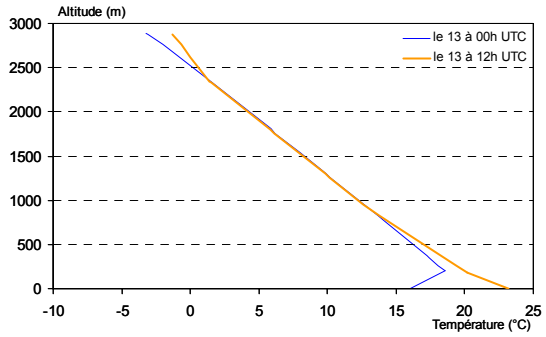
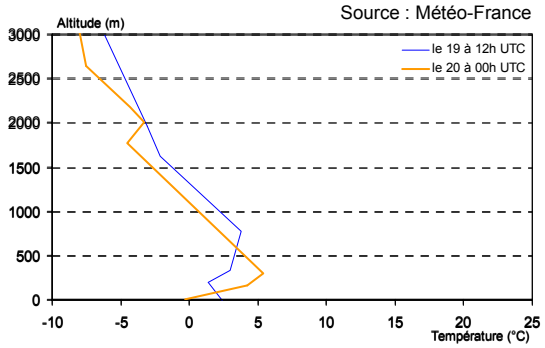


Figure 32 : influence du cycle quotidien du gradient thermique sur le comportement d'un panache industriel par vent faible et ciel clair.
Source : « Le cycle de la pollution atmosphérique »

Les figures 33a et 33b illustrent un cas concret pour chacune des situations évoquées. S'il arrive que ces deux phénomènes se combinent dans certains cas, l'élévation significative des niveaux est systématiquement conditionnée par la vitesse du vent au niveau du de la masse d'air polluée, qui doit être suffisamment faible pour éviter une trop grande dispersion horizontale des polluants.





Figures 33a et 33b : évolution du profil vertical de température au-dessus de St-Exupéry :

- *lors d'une inversion de rayonnement (13/06/1999)*
- *lors d'une advection d'air chaud d'altitude (19 et 20/01/2002)*

3.2.2.1 Caractéristiques des épisodes associés à une inversion de rayonnement

Heure associée aux concentrations maximales

Si les dépassements associés à une advection d'air chaud d'altitude se produisent à des heures dépendant de la chronologie de l'arrivée de l'air chaud, les pics liés à la rupture de la couche d'inversion au niveau de la masse d'air chargée en SO_2 se produisent à des heures relativement constantes, dépendant de la période de l'année (figure 34) : en effet, les inversions hivernales se détruisent beaucoup plus lentement, car elles sont souvent plus marquées (nuits plus longues). A contrario, en été, les inversions se détruisent plus rapidement, grâce au rayonnement solaire beaucoup plus énergétique qu'en hiver. Les heures pour lesquelles les maxima horaires de SO_2 sont le plus fréquemment observés dépendent davantage du moment de la rupture d'inversion que des pointes de trafic automobile. L'impact de la circulation automobile sur ces valeurs extrêmes semble donc limitée.

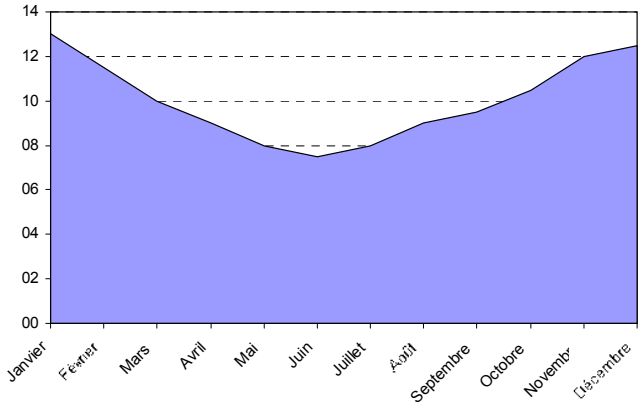


Figure 34 : heure moyenne à laquelle les maxima horaires de SO_2 sont les plus fréquemment observés

Hauteur d'accumulation de la masse d'air chargée en SO_2

Au regard de l'évolution des inversions au sol entre 00h et 12h, il semble que la masse d'air chargée en SO_2 se bloque entre 100 et 200 m : le cas du 26/02/1999 indique que l'inversion au sol s'est détruite sur les 180 premiers mètres à 12h, avec des maxima horaires sur la zone VDR_COP observés à 11h UTC. Il serait intéressant de disposer de mesures à cette hauteur afin de mieux quantifier les concentrations de SO_2 en altitude. Le sommet de la tour de la Part-Dieu (150 m

environ) paraît l'endroit idéal pour une campagne de mesure, de par sa hauteur et sa position géographique, relativement proche de la vallée du Rhône (par vent de sud).

3.2.2.2. Identification d'une journée type pour la zone VDR_COP

L'identification d'une journée type sur la zone VDR_SUP ne paraît pas pertinente :

- les dépassements de seuil ne touchent qu'un seul capteur (les Roches de Condrieu) et ne sont pas très nombreux.
- l'absence de vent en altitude dans cette zone ne permet pas de cibler suffisamment ces journées à risque.

En revanche sur la zone VDR_COP, un plus grand nombre de sites et d'épisodes associé à une corrélation relativement bonne avec le vent au sol et dans les très basses couches peut permettre la détermination d'une journée type. Il s'agit de donner une idée approximative de la part des dépassements observés sur le nombre total de situations à risque.

En croisant les meilleures variables météorologiques, il se dégage la journée type suivante :

- Vitesse du vent à Solaize à 10m entre 18h UTC la veille et 3h UTC inférieure à 1 $m.s^{-1}$
- Vitesse du vent à Loire sur Rhône à 50m entre 18h UTC la veille et 3h UTC inférieure à 1 $m.s^{-1}$.
- Inversion de température au radiosondage de 00h UTC, dont la base est inférieure à 250m.

La fréquence mensuelle moyenne de ces situations est résumée dans le tableau 22. A noter que le site de Feyzin Stade est de nouveau pris en compte pour qualifier les dépassements de seuil durant ces journées à risque (VDR_COP). Près de 8% seulement des journées types sont associées à un dépassement du seuil de 300 $\mu g.m^{-3}$, le mois de janvier enregistrant le meilleur taux de dépassement (17,5%).

mois	[0;200[	[200;300[	[300;600[	≥ 600
Janvier	7	1,25	1,75	0
Février	4,75	0,5	0,5	0
Mars	3,25	0,5	0	0
Avril	4,25	0,5	0,25	0
Mai	5	0	0,25	0
Juin	5	0,25	0,25	0
Juillet	5,75	0,75	0	0,25
Août	8	0	0,5	0
Septembre	5,75	1,5	0,5	0,25
Octobre	8,33	0,67	0,67	0,33
Novembre	4,33	1,33	0,33	0
Décembre	6,67	0	0,33	0
Année	**67,5**	**7,2**	**5,33**	**0,8**

Tableau 22 : fréquence mensuelle moyenne du nombre de journées à risque et des dépassements associés à la zone VDR_COP établie pour la période 1999-2002.

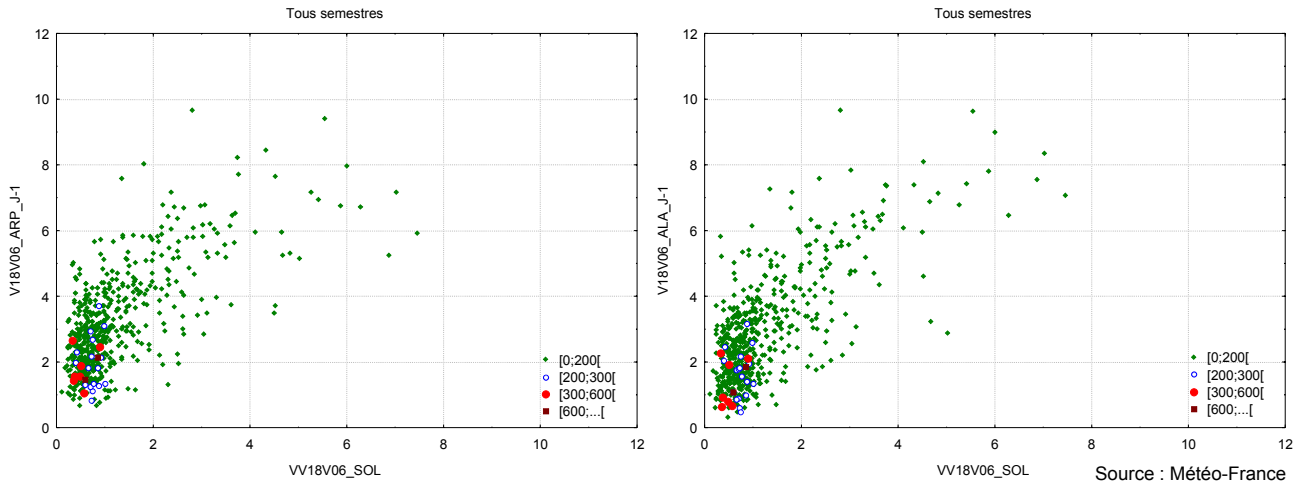
La répartition des journées à risque et des dépassements réellement observés en fonction du jour de la semaine (tableau 23) fait apparaître une forte proportion des dépassements du seuil horaire de 300 µg.m^{-3} les jours de week-end (11 journées) par rapport aux jours de semaine (12 journées), alors que les situations à risque ne sont pas plus nombreuses pour ces journées là. L'hétérogénéité des émissions est vraisemblablement à l'origine de ce constat.

	[0 ;200[	[200 ;300[	[300 ;600[	≥600	Total
Lundi	45	1	2	0	48
Mardi	37	6	1	0	44
Mercredi	37	2	1	0	40
Jeudi	36	6	3	1	46
Vendredi	41	4	3	1	49
Samedi	26	4	6	0	36
Dimanche	31	4	4	1	40

Tableau 23 : répartition des journées à risque et des dépassements associés à la zone VDR_COP en fonction du jour de la semaine.

Prévisibilité des vents faibles.

Si la détermination de la journée type peut être connue dès 3h UTC le matin, à partir des observations de Solaize, Loire sur Rhône et du radiosondage de St-Exupéry, il serait intéressant d'avoir connaissance de ce risque dès la veille. Si la prévision d'occurrence d'inversion au sol est envisageable par la consultation d'un prévisionniste de Météo-France (les données de modèle sont peu fiables pour la prévision de gradient vertical de température), la prévision du vent fournie par les modèles numériques de Météo-France ARPEGE et ALADIN est perfectible : les prévisions de vent effectuées à partir du modèle de la veille pour le créneau 18h-03h ne donnent pas de résultat satisfaisant, comme l'indiquent les nuages de points des figures 35a et 35b. En l'état actuel des choses, il est inenvisageable de procéder à une détermination de journées types à partir de prévisions météorologiques, trop peu fiables à ce jour.



Figures 35a et 35b : comparaison entre le vent observé à Solaize et les prévisions de modèle entre 18h et 06h du 27/02/2001 au 30/09/2002 – modèle ARPEGE puis ALADIN

D'autres résultats sur ces journées à risque sont présentés en annexe 3. Il s'agit :

- des conditions de stabilité associées aux épisodes caractérisés par un dépassement sur plus d'un site,
- de l'application des conditions de stabilité horizontale aux épisodes observés sur Lyon entre 1999 et 2002,
- de l'application des conditions de stabilité horizontale aux épisodes observés sur la zone COP_VDR entre 1996 et 1998,
- de la distinction des dépassements de seuil des zones FEY (sauf Feyzin Stade) et EDF, au regard des conditions de stabilité horizontale.

Conclusion

La problématique des pointes de pollution en vallée du Rhône ne peut pas être traitée uniformément sur l'ensemble du domaine d'étude. Si les moyennes annuelles ont fortement diminué partout, l'occurrence des pics de pollution n'a pas suivi la même évolution sur tous les sites.

Bien que les pics de pollution observés sur les zones de compétence de SUPAIRE et COPARLY sont rarement communs, ils répondent cependant pour la majorité d'entre eux aux mêmes critères météorologiques de stabilité (vitesse du vent inférieure à $1 m.s^{-1}$ et inversion de température). La non simultanéité de la plupart des épisodes de pollution confirme le fait que le transport à longue distance est très rarement observé. Pour exemple, l'absence d'émetteurs associée à la complexité du relief autour de Vienne (vallée en forme de coude) peut expliquer la quasi absence de pics marqués sur cette agglomération.

Les pointes de SO_2 résultent de deux phénomènes distincts, observés tout au long de l'année, même si la période hivernale est plus propice à ces épisodes : d'une part les retombées de panache par vent établi génèrent des dépassements de seuils réglementaires dans un rayon limité à quelques kilomètres autour d'un émetteur, principalement la raffinerie de Feyzin. Ces épisodes imprévisibles, liés aux émissions d'un industriel, sont associés à une direction du vent telle que le capteur est exactement sous le vent de l'émetteur. D'autre part, par vent faible, les masses d'air chargées en SO_2 accumulées en altitude lors d'une inversion de température sont rabattues au sol au moment de la destruction de cette inversion à la hauteur à laquelle les polluants se sont accumulés. Cette rupture se produit généralement en cours de matinée en été et en début d'après-midi en hiver. Il est difficile de déterminer une journée type associée à la fois à un grand nombre de dépassements et à un nombre limité de non dépassements. Cela peut s'expliquer en partie par l'hétérogénéité des émissions d'une journée à l'autre et par la non détection de certains pics par les capteurs (en particulier par vent faible d'est ou d'ouest).

Cette étude a mis en évidence le manque de données relatives à la vallée du Rhône pour mieux expliquer et anticiper les dépassements de seuil :

- Mesures météorologiques : l'importance du vent dans les très basses couches nécessite une extension de cette mesure (dont la représentativité géographique est limitée) par l'implantation d'un profileur par exemple. Il manque également des données de profil de température à fréquence plus élevée que celle des radiosondages (le radiosondage de 00h ne suffit pas à caractériser la stabilité des basses couches durant la matinée). L'annexe 4 présente deux types de profileurs adaptés à la problématique de la qualité de l'air.
- Mesures de pollution : la retombée de panache de la raffinerie de Feyzin par vent de sud est mal appréciée, ce phénomène étant géographiquement limité. L'implantation d'une station de mesure pourrait pallier ce manque d'information. Il serait également intéressant de connaître la concentration des masses d'air polluées en altitude durant la nuit (par exemple au sommet de la tour de la Part-Dieu, à une altitude sol de 150m) afin de déterminer un lien éventuel avec les pics observés le matin.

- Fiabilité des prévisions météorologiques : les sorties de modèle météorologiques classiques ARPEGE et ALADIN ne sont pas suffisamment précises pour les vents faibles. Une collaboration avec Météo-France pourrait être envisagée pour mettre en place une méthodologie visant à améliorer ces prévisions.

Bibliographie

Ludovic Séon : Prévision des situations favorables à de forts taux de dioxyde de soufre sur l'agglomération lyonnaise par l'établissement d'un indice météorologique de dispersion prenant en compte certains paramètres physico-chimiques. Rapport de stage de fin d'études, 1998

P. Chevrand : Etude des conditions météorologiques en région lyonnaise pendant les épisodes fortement pollués des hivers 84/85 à 88/89 – recherche des variables météorologiques explicatives, mars 1990

P. Chevrand : L'hiver 89/90 a-t-il été marqué par un anticyclone à caractère exceptionnel ? mars 1990

J-Y Le Vourc'h, C. Fons, M. Le Sturm : météorologie générale et maritime, 2001.

Annexes

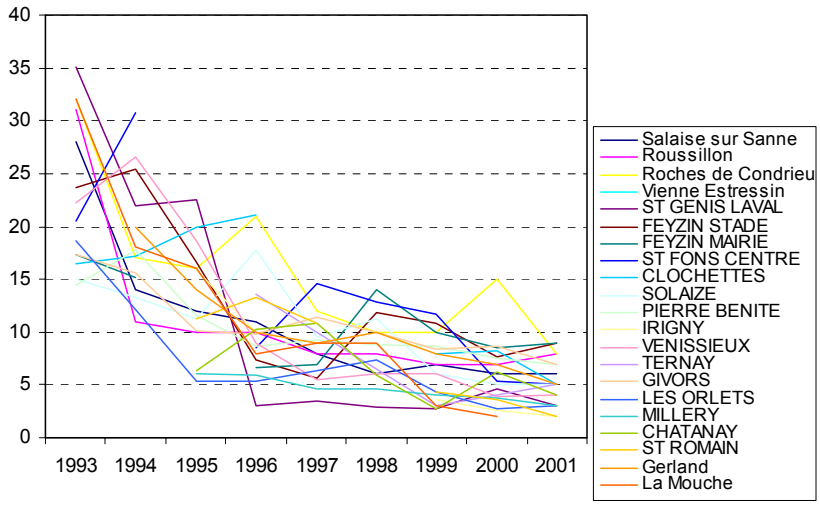
Annexe 1
Statistiques par sites

- Taux de fonctionnement des sites SO_2 de la vallée du Rhône (%)

MOIS	FES	FEM	SFCE	SFCL	SOL	PB	IRI	TER	GIV	SRO	MIL	CHA	SRM	VEN	LMO	SSS	ROU	RDC	VIE
199601	100	99	28	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	0
199602	97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0
199603	99	96	100	100	100	100	100	100	100	63	100	100	100	99	100	97	92	100	0
199604	99	100	100	99	97	80	100	96	100	100	100	100	100	100	100	93	93	93	0
199605	100	100	100	100	92	100	100	96	87	89	99	100	99	100	100	76	56	80	0
199606	99	100	100	90	91	100	100	100	100	100	100	100	100	100	95	100	67	100	0
199607	99	100	100	99	93	98	100	98	98	96	98	99	93	100	96	97	79	100	0
199608	98	100	100	94	100	100	100	100	100	98	100	100	100	98	100	97	97	88	0
199609	100	100	100	93	100	100	100	100	93	100	100	100	24	100	100	83	81	84	0
199610	98	100	100	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100	99	100	0
199611	100	100	100	99	100	100	100	100	99	100	100	99	88	93	100	63	50	100	0
199612	85	97	97	95	66	97	97	97	97	97	97	97	82	94	97	37	95	100	0
199701	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	95	100	100	70	100	0
199702	91	100	100	100	46	100	100	100	100	100	100	100	97	93	100	100	83	100	0
199703	88	100	100	100	90	98	100	100	99	100	100	100	97	91	100	100	100	71	0
199704	100	100	100	100	100	99	90	99	100	100	100	100	98	89	100	79	29	77	0
199705	100	100	100	36	100	100	0	100	100	100	100	100	98	100	100	96	0	97	0
199706	98	99	100	0	100	99	0	100	100	97	100	100	100	100	100	78	41	100	0
199707	100	98	100	0	100	99	0	92	100	99	100	100	96	100	100	91	88	91	0
199708	98	100	100	0	100	100	0	100	100	100	100	100	100	100	100	77	77	100	0
199709	98	100	100	0	100	100	0	100	100	100	100	100	100	95	98	100	100	100	0
199710	100	56	100	0	97	100	0	100	100	100	100	100	100	81	97	100	100	100	0
199711	98	44	100	0	100	100	0	98	100	97	100	100	99	89	100	76	98	92	0
199712	98	100	100	0	100	100	0	99	100	99	100	96	79	100	100	100	100	100	0
199801	100	100	100	0	100	100	0	98	100	100	99	83	0	100	100	100	99	100	0
199802	100	100	100	0	100	98	0	100	100	100	96	85	0	100	99	88	95	92	0
199803	100	100	97	0	100	100	0	100	95	100	100	99	0	100	100	83	100	100	0
199804	100	98	100	0	100	98	0	99	82	100	100	100	0	87	100	85	96	100	0
199805	100	100	100	0	100	100	0	100	100	100	100	100	0	100	100	79	97	100	0
199806	94	100	100	41	100	100	56	100	100	99	100	100	62	100	100	97	99	100	0
199807	100	100	100	100	100	99	98	100	100	100	100	55	100	99	100	99	68	100	0
199808	99	100	100	99	100	100	100	89	100	93	100	100	100	98	100	94	93	94	0
199809	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	94	93	94	0
199810	100	90	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	99	100	100	45	53	100	0
199811	100	100	100	100	100	86	100	93	100	99	100	100	100	100	100	66	80	83	0
199812	79	100	100	100	100	100	98	100	100	100	100	100	96	100	100	100	100	100	0
199901	99	99	100	100	100	98	96	31	100	100	100	100	99	100	100	93	100	84	0
199902	100	100	100	100	100	100	100	0	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	0
199903	98	100	100	100	100	100	100	65	36	39	100	100	100	100	100	97	89	99	0
199904	100	100	100	100	100	97	100	94	0	99	100	100	100	96	100	95	100	100	0
199905	100	68	100	100	100	99	100	100	91	99	98	100	100	100	100	98	100	100	0
199906	100	2	100	100	100	99	100	100	95	96	100	100	100	100	100	80	77	83	0
199907	93	99	97	98	99	100	100	97	97	99	65	99	97	100	100	100	80	100	0
199908	100	40	100	100	100	100	100	85	100	91	97	97	100	100	94	78	77	78	0
199909	100	90	100	100	91	100	100	93	100	100	100	92	98	100	100	100	100	99	0
199910	100	99	100	100	92	92	100	83	100	71	100	100	100	100	100	95	82	86	0
199911	95	99	100	100	100	100	100	88	100	91	100	99	100	100	100	82	92	99	0
199912	100	98	100	100	100	100	91	80	100	65	100	100	100	100	100	76	56	95	0
200001	98	97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	96	100	100	99	99	100	0
200002	100	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0
200003	99	98	100	100	100	97	100	95	100	100	100	100	100	100	97	61	77	100	0
200004	100	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	95	100	100	0
200005	100	100	100	100	80	100	100	100	90	100	100	93	100	100	100	98	96	100	0
200006	100	100	100	100	100	100	100	100	91	86	100	100	100	100	100	100	95	88	0
200007	99	99	100	99	100	100	96	100	100	99	100	100	99	100	100	100	100	100	0
200008	100	97	100	100	100	100	97	95	94	99	100	100	100	100	99	100	100	100	0
200009	100	91	100	94	100	100	90	53	98	100	100	98	100	87	100	65	97	97	0
200010	100	96	100	93	100	100	76	100	100	100	100	100	100	50	15	44	100	100	0
200011	99	99	100	100	99	100	56	100	98	100	96	100	100	100	0	76	100	100	0
200012	100	100	100	100	100	99	98	98	98	98	100	98	100	100	0	100	100	95	56
200101	100	100	100	100	100	100	100	98	99	100	100	99	100	100	0	97	100	100	99
200102	99	100	99	100	100	96	100	100	100	91	100	96	100	98	0	96	100	100	98
200103	95	100	100	100	100	80	99	99	96	100	99	90	100	100	0	100	100	100	99
200104	100	100	100	100	100	100	100	100	100	96	100	99	96	100	0	83	100	100	100
200105	100	46	100	100	80	88	100	97	100	75	100	85	98	100	0	76	97	100	100
200106	99	32	100	100	25	99	100	100	99	37	100	89	100	100	0	85	100	100	94
200107	100	100	98	100	19	93	99	90	100	97	100	80	100	100	0	100	100	100	97
200108	100	97	95	100	100	100	98	100	91	98	94	93	99	100	0	100	100	100	99
200109	98	98	100	96	97	99	100	90	99	97	100	86	100	100	0	100	100	100	99
200110	99	99	100	100	100	97	100	97	98	91	97	88	100	100	0	100	98	100	96
200111	100	100	100	100	99	100	100	91	63	75	100	100	97	95	0	97	100	100	100
200112	88	100	100	100	98	100	100	99	100	99	100	100	100	100	0	96	100	100	80
200201	100	100	94	100	100	100	100	99	97	99	98	98	100	100	0	100	100	100	93
200202	100	100	97	100	99	100	100	100	97	93	91	96	100	100	0	100	100	99	99
200203	100	99	100	100	98	100	100	100	97	100	86	95	100	100	0	100	100	100	99
200204	99	99	78	100	99	98	100	100	91	100	84	97	100	100	0	99	100	100	99
200205	100	100	32	99	99	99	99	99	86	100	77	94	100	98	0	100	100	79	100
200206	100	100	90	100	100	96	96	100	80	84	65	73	99	100	0	46	99	57	92
200207	98	99	99	100	99	99	97	100	74	99	0	0	99	100	0	40	97	63	85
200208	100	100	85	100	98	94	100	99	95	99	0	0	96	100	0	54	100	88	94
200209	100	95	99	100	95	90	99	100	97	73	0	0	88	100	0	83	62	96	93

- Evolution du percentile 50 des moyennes quotidiennes

La baisse est surtout sensible avant 1996.



- Moyennes annuelles

Le seuil annuel de 20 µg.m^{-3}, quasi systématiquement dépassé en 1993, ne l'est plus depuis 1997, excepté pour le site de Feyzin Stade en 1998. Les seuils annuels de 40 µg.m^{-3} et 50 µg.m^{-3} n'ont jamais été atteints sur cette zone.

Nom de site	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
St-Fons Centre	26	37		10	17	16	13	8	7
Pierre Bénite	23	21	16	13	13	12	11	10	9
St-Genis Laval		25	26	7	8	7	6	7	5
Vénissieux		28	22	12	9	9	8	6	6
St-Fons Clochettes	22	21	24	24			10	11	8
Irigny			18	12			6	4	3
Feyzin Mairie		18		8	9	16	12	10	11
Feyzin Stade		29	19	12	8	21	19	14	16
Solaize	28	17	11	18	12	15	9	7	7
Millery			8	8	8	7	6	6	5
Ternay	21			17	16	11	6	7	7
Givors	21	18	13	12	15	13	10	10	8
Chasse s/R. Chatanay			10	13	14	9	4	7	5
St-Romain les Orlets	19	15	8	8	10	11	7	4	4
St-Romain Mairie				15	12		6	6	3
Vienne Estressin									5
Roches de Condrieu	36	23	24	25	17	13	13	18	10
Roussillon	29	13	13	12	12	10	8	9	9
Salaise sur Sanne	29	16	14	13	11	9	8	8	8

Moyennes annuelles par site

- **Seuil de 20 µg.m^{-3} de protection de la santé sur le semestre hivernal (du 01/10 au 31/03)**

Moyenne	1994-1995	1995-1996	1996-1997	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002
St-Fons Centre	32		16	20	16	13	7	10
Pierre Bénite		23	17	16	13	15	9	13
St-Genis Laval	28	33	11	10	8	8	10	8
Vénissieux	25	27	13	11	9	9	5	7
St-Fons Clochettes	15	30	25		13	12	10	10
Irigny		21	17		7	7	4	5
Feyzin Mairie	12		9	17	15	11	15	8
Feyzin Stade	22	26	10	13	22	20	10	16
Solaize	9	15	19	19	13	11	6	9
Millery	11	10	11	9	8	9	6	5
Ternay			20	14		10	7	10
Givors	22	18	19	17	13	13	10	9
Chasse s/R. Chatanay	1	16	17	13	4	7	7	4
St-Romain les Orlets	19	5	15	12	13	7	4	7
St-Romain Mairie			14		9	8	5	5
Vienne Estressin								6
Roches de Condrieu	27	30	25	17	13	19	16	12
Roussillon	15	17	16	13	12	11	9	11
Salaise sur Sanne	16	19	15	12	11	12	8	11

Depuis l'hiver 1996-1997, le seuil de 20 µg.m^{-3} n'est que ponctuellement dépassé sur l'ensemble des sites. Sur la région de Roussillon, ce seuil n'a jamais été dépassé depuis l'hiver 1994-95.

Seuil journalier de 125 µg.m^{-3}

Ce seuil n'est plus dépassé depuis 1999, excepté pour le site de Feyzin Stade.

Nom de site	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
St-Fons Centre	3	1		0	1	0	0	0	0
Pierre Bénite	5	0	1	1	1	0	0	0	0
St-Genis Laval		0	2	0	1	0	0	0	0
Vénissieux		0	1	1	1	0	0	0	0
St-Fons Clochettes	2	1	1	1			0	0	0
Irigny			0	0			0	0	0
Feyzin Mairie		0		0	0	0	0	0	0
Feyzin Stade		3	0	0	0	5	2	0	2
Solaize	11	0	0	0	0	2	0	0	0
Millery			0	0	1	0	0	0	0
Ternay	0			0	1	0	0	0	0
Givors	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chasse s/R. Chatanay			0	0	0	0	0	0	0
St-Romain les Orlets	0	1	0	0	0	1	0	0	0
St-Romain Mairie				0	0		0	0	0
Vienne Estressin									0
Roches de Condrieu	4	1	1	2	3	1	0	0	0
Roussillon	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Salaise sur Sanne	2	0	0	0	0	0	0	0	0

Nombre de dépassements des seuils horaires de 300 et 600 µg.m^{-3}

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
St-Fons Centre	17	30		1	13	1	1	2	2
Pierre Bénite	37	7	13	11	7	1	0	2	0
St-Genis Laval		2	6	2	5	0	0	0	1
Vénissieux		2	7	4	16	0	0	0	0
St-Fons Clochettes	7	15	18	5			0	0	0
Irigny			0	0			1	0	0
Feyzin Mairie		1		0	2	2	3	5	2
Feyzin Stade		14	0	0	1	18	22	9	14
Solaize	59	0	0	0	0	14	1	0	2
Millery			0	0	6	0	0	0	0
Ternay	0			0	7	0	0	0	0
Givors	6	0	0	0	1	0	1	0	0
Chasse s/R. Chatanay			0	0	0	0	0	0	0
St-Romain les Orlets	0	4		0	4	8	0	1	3
St-Romain Mairie				0	0		0	0	0
Vienne Estressin									0
Roches de Condrieu	27	25	39	18	6	12	3	8	1
Roussillon	1	1	0	0	1	2	0	0	0
Salaise sur Sanne	6	0	0	0	1	3	0	0	0

Dépassement du seuil de 300 µg.m^{-3}

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
St-Fons Centre	2	0		0	3	0	0	0	0
Pierre Bénite	2	2	1	1	0	0	0	0	0
St-Genis Laval		0	0	0	0	0	0	0	0
Vénissieux		0	0	0	8	0	0	0	0
St-Fons Clochettes	1	2	1	0			0	0	0
Irigny			0	0			0	0	0
Feyzin Mairie		0		0	0	0	2	0	1
Feyzin Stade		0	0	0	0	0	1	0	1
Solaize	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Millery			0	0	1	0	0	0	0
Ternay	0			0	0	0	0	0	0
Givors	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Chasse s/R. Chatanay			0	0	0	0	0	0	0
St-Romain les Orlets	0	2	0	0	0	1	0	0	3
St-Romain Mairie				0	0		0	0	0
Vienne Estressin									0
Roches de Condrieu	3	6	11	4	1	3	0	1	0
Roussillon	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salaise sur Sanne	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Dépassement du seuil de 600 µg.m^{-3}

Annexe 2
Corrélation des dépassements entre zones

Cette annexe complète la répartition des épisodes pour d'autres zones :

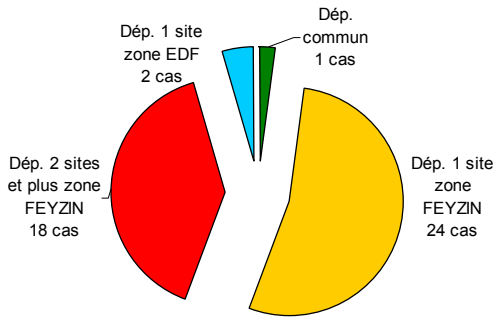
- pour les hivers 1993-1995, 1996-1998 et 1999-2002,
- pour les étés 1993-1995, 1996-1998 et 1999-2002.

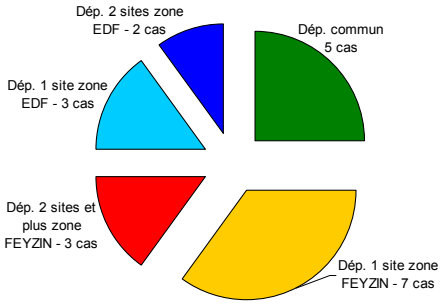
Zones ROCHES et ROUSSILLON

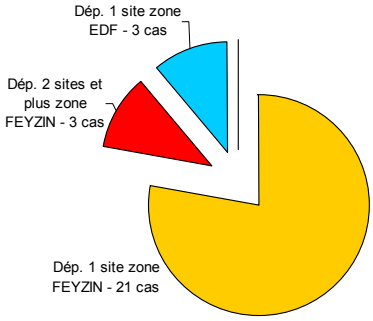
	hiv 93-95	hiv 96-98	hiv 99-02	été 93-95	été 96-98	été 99-02
Dép. commun	0	0	0	1	0	0
Dép. sur la zone "ROCHES"	25	14	9	26	8	4
Dép. sur la zone "ROUSSILLON"	1	2	0	1	0	0

Zones FEYZIN et EDF

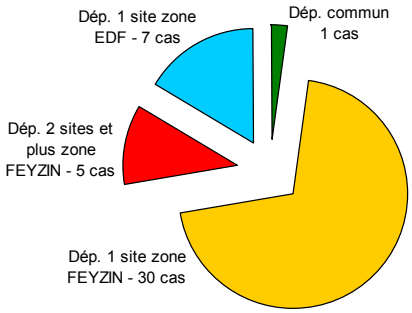
Répartition sur les hivers 1993-1995, 1996-1998 et 1999-2002

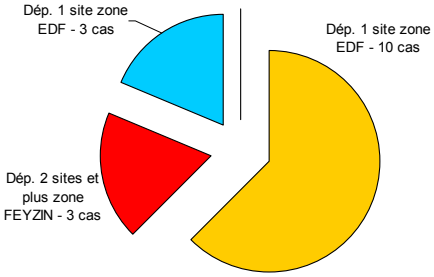


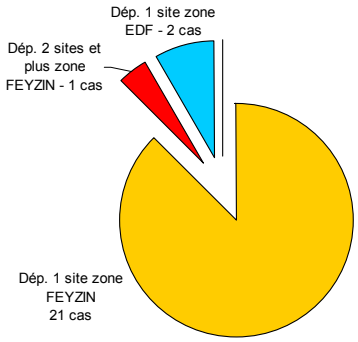




Répartition sur les étés 1993-1995, 1996-1998 et 1999-2002

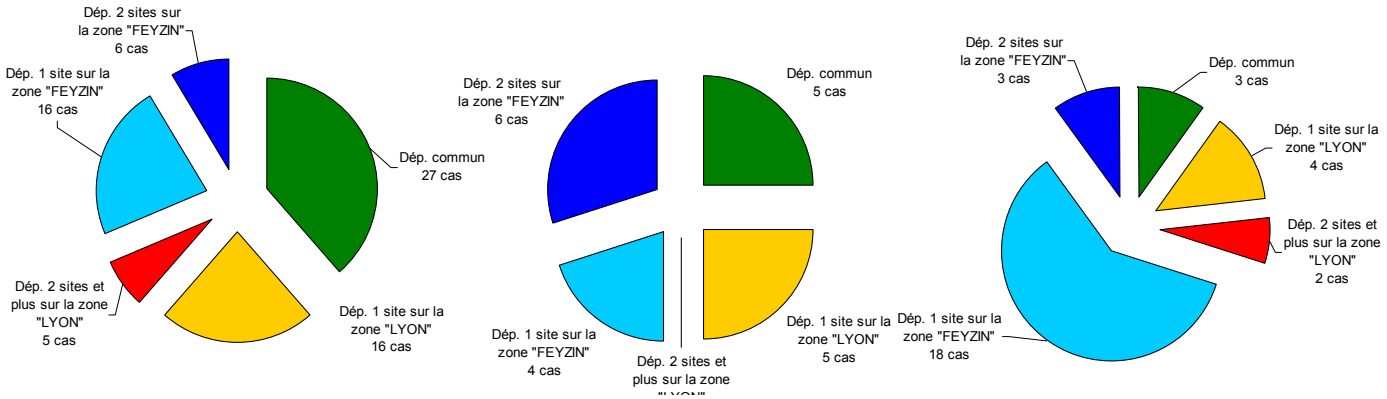




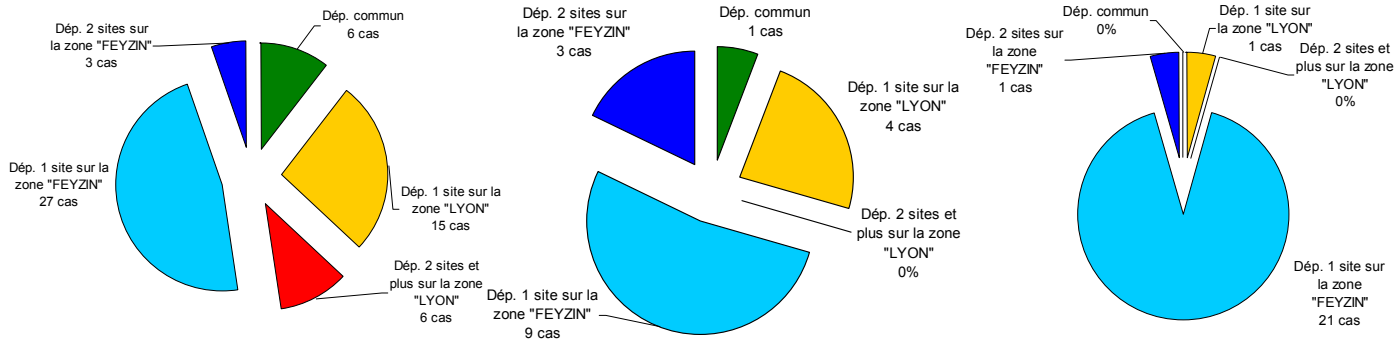


Zones LYON et FEYZIN

Répartition sur les hivers 1993-1995, 1996-1998 et 1999-2002



Répartition sur les étés 1993-1995, 1996-1998 et 1999-2002

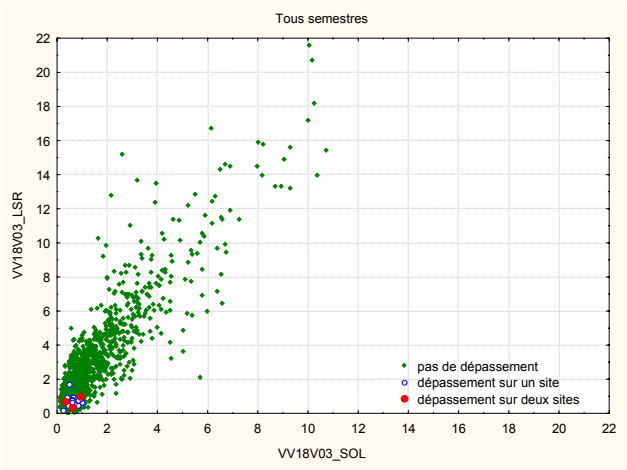


Il s'agit des deux zones pour lesquelles le nombre de dépassements communs est le plus important, en particulier en hiver. Ce nombre décroît cependant au fil des années.

Annexe 3
Résultats complémentaires sur la journée type identifiée pour la zone VDR_COP

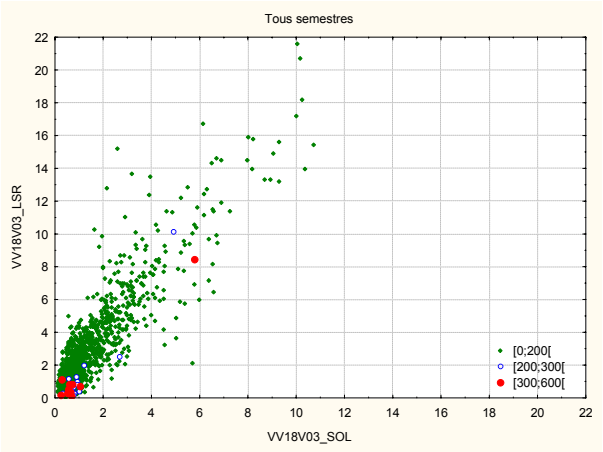
Conditions de stabilité associées aux épisodes caractérisés par un dépassement sur plus d'un site

On peut se demander si un dépassement de seuil observé sur plusieurs sites est caractérisé par des conditions météorologiques plus sévères. Le graphique suivant nous prouve le contraire : les trois cas caractérisés par un dépassement du seuil de 300 µg.m^{-3} sur deux sites n'indiquent pas de vent moins marqué. Si l'on considère la bascule de vent entre 00h et 12h UTC, telle que définie plus haut, deux journées sur trois avec dépassement sur deux sites sont effectivement caractérisées par une bascule de vent. Pour la troisième journée, les données manquantes du radiosondage ne permettent pas d'estimer cette bascule.



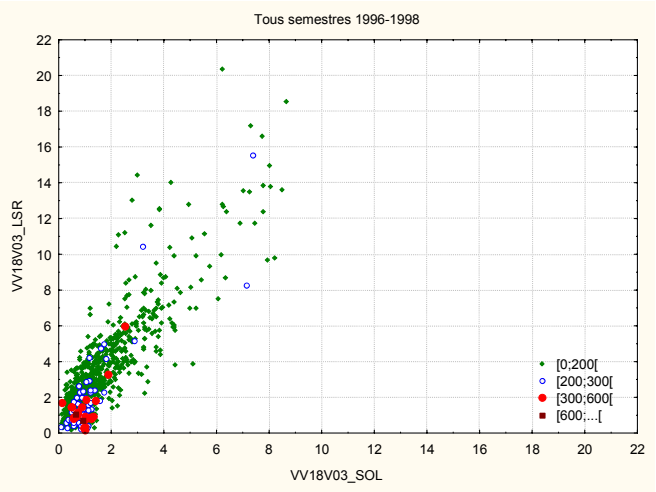
Application des conditions de stabilité horizontale aux épisodes observés sur Lyon entre 1999 et 2002

Les critères de vent retenus pour la zone VDR_COP expliquent de la même façon les épisodes de pollution observés sur Lyon. Ceci peut permettre d'envisager l'extension de cette démarche à l'agglomération lyonnaise.

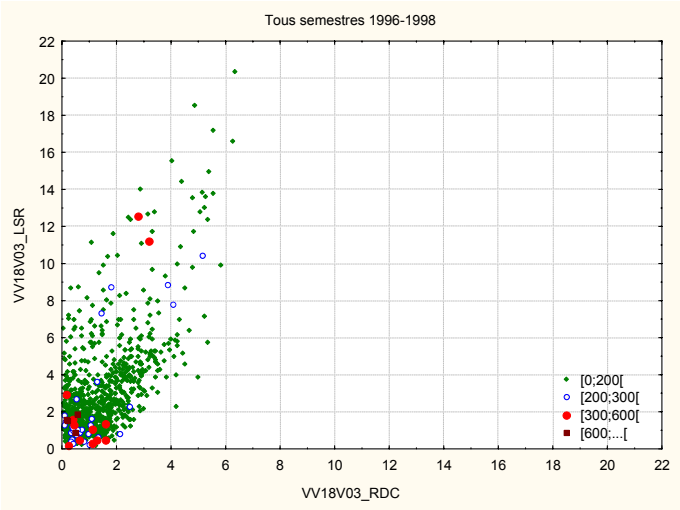


Application des conditions de stabilité horizontale aux épisodes observés sur la zone COP VDR entre 1996 et 1998

Les dépassements de seuil observés entre 1996 et 1998 répondent à des critères de vent moins sélectifs. S'il fallait identifier une journée type pour cette période, le seuil de 1 m/s devrait être augmenté à 2 m.s^{-1}. Ceci permet de conforter l'hypothèse que les pics observés depuis 1999 répondent à des critères de stabilité sensiblement plus sévères qu'auparavant.



Occurrence de dépassement de seuil sur la zone VDR_COP par comparaison avec le vent à Solaize et Loire sur Rhône



Occurrence de dépassement de seuil sur la zone VDR_SUP par comparaison avec le vent aux Roches et Loire sur Rhône

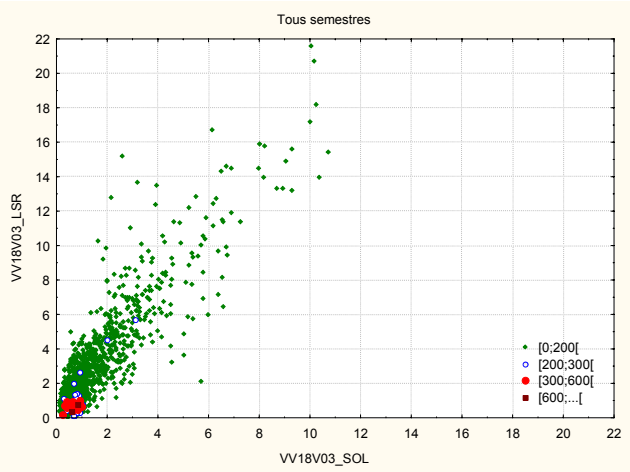
Les situations à risque identifiées sur la période 1999-2002 sont cependant sensiblement moins fréquentes sur la période 1996-1998, avec près de 64 journées par an, contre 81 journées sur la période 1999-2002. Le tableau ci-dessous synthétise année par année la fréquence de ces journées types.

Année	[0;200[	[200;300[	[300;600[	[600;...[	Total
1996	70	9	3	0	82
1997	58	9	1	0	68
1998	34	5	1	1	41
1999	66	7	4	1	78
2000	68	10	7	0	85
2001	66	7	5	2	80
2002	53	3	4	0	60

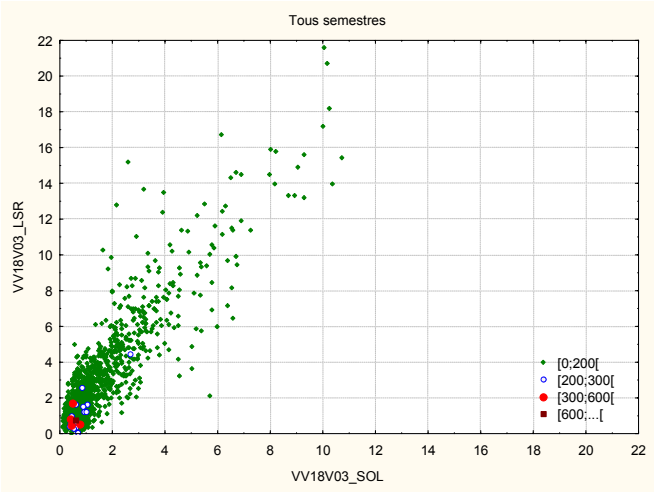
Fréquence des situations à risque telles qu'identifiées sur la période 1999-2002

Distinction des dépassements de seuil des zones FEY (sauf FES) et EDF au regard des conditions de stabilité horizontale

Les figures suivantes montrent que les dépassements associés à la zone FEY ne répondent pas à des conditions de dispersion horizontale plus strictes que les dépassements de la zone EDF.



Occurrence de dépassement de seuil sur la zone FEYZIN par comparaison avec le vent à Solaize et Loire sur Rhône



Occurrence de dépassement de seuil sur la zone EDF par comparaison avec le vent à Solaize et Loire sur Rhône

Annexe 4
Présentation des caractéristiques d'un profileur de vent et de température dans les basses couches

La mesure continue du vent en altitude : DEGREWIND (DEGREANE)

Source : site DEGREANE (http://www.meteo.degreane.fr)

Les profileurs de vent DEGREWIND exploitent les derniers développements technologiques du domaine radar pour la mesure du profil vent : force et direction. Utilisant des propriétés de réflexion des ondes électromagnétiques par l'atmosphère, la gamme des profileurs DEGREWIND fournit des profils verticaux selon la puissance et la fréquence émise, depuis 75m jusqu'à des altitudes de 20 km.
Un réseau d'antennes génère de trois à cinq faisceaux (1 vertical, 2 à 4 obliques). La position des faisceaux associée à la fréquence Doppler de l'onde rétro-diffusée par les turbulences de l'air, permet d'obtenir la direction et la force du vent.

Points forts

- Surveillance permanente et en temps réel du vent.
- Pas de nuisances sonores.
- Pas de nuisances électromagnétiques grâce aux faibles lobes secondaires.
- Fonctionnement automatique 24h/24.
- Fonctionne sous tout type de climat.
- Fournit des données vent à des cadences paramétrables.
- Mesure de la vitesse verticale du vent.
- Fournit la variabilité du vent.
- Pilotage à distance par le réseau téléphonique.
- Outil d'aide à la prévision de la dispersion des polluants dans l'atmosphère.
- Estimation de la hauteur de la couche limite.

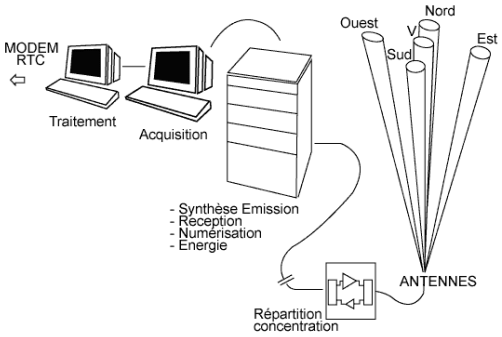


Schéma de fonctionnement

Performances du modèle PCL 1300 (900 – 1400 Mhz)

Altitude minimale (1) :	75m
Altitude maximale (2) :	2,5 - 8 km
Résolution spatiale :	à partir de 50m
Précision intrinsèque de la vitesse du vent :	<1m/s
Précision intrinsèque de la direction du vent :	<10°
Temps d'intégration :	2 - 60 minutes
Puissance de sortie crête :	de 500 à 3500W

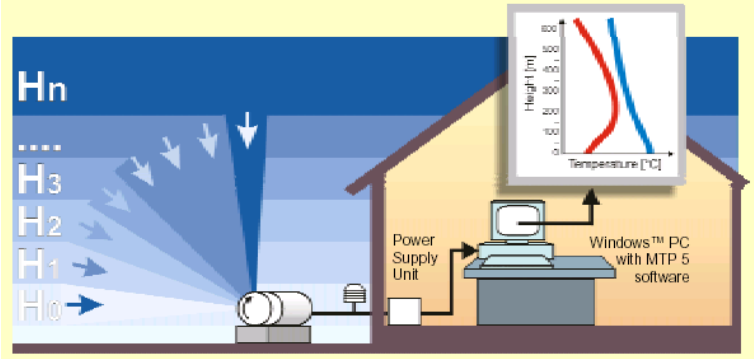
(1) Fonction des conditions d'environnement et de la bande passancte disponible
(2) Fonction des conditions atmosphérique

MTP 5 (Meteorological Temperature Profiler) de Kipp & Zonen

Sources : site KIPP & ZONEN (http://www.kippzonen.com) - ASPA

Le profileur de température MTP5 permet de déterminer le profil vertical de température dans les basses couches à une fréquence temporelle élevée. Ce système est bien adapté aux études liées à la qualité de l'air, à la stabilité atmosphérique et à la climatologie.

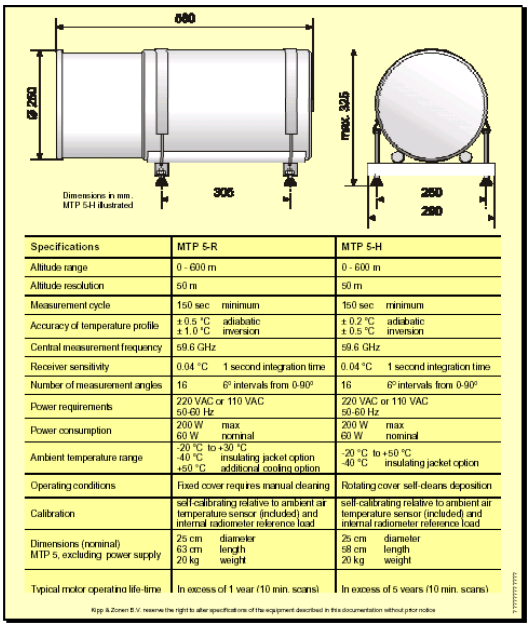
La technologie employée repose sur l'utilisation d'un radiomètre à micro-ondes qui détecte la densité des molécules d'oxygène (O_2). La détermination du profil résulte du balayage d'un faisceau à différents angles zénithaux, de 0° à 90°. Le calcul d'un profil peut être réalisé jusqu'à toutes les dix minutes, par pas de 50m, du sol à 600m de hauteur.



Principe de fonctionnement du profileur

Caractéristiques :

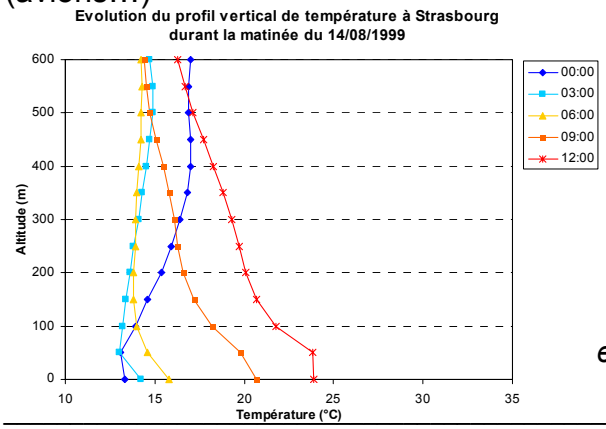
- fonctionne par tout temps (brouillard, pluie, nuages)
- calibrage automatique de l'appareil par l'intermédiaire d'un capteur de température ambiante
- installation à quelques mètres au-dessus du sol (sur un toit par exemple) dans un endroit bien dégagé, sur une surface plane
- sensible aux perturbations atmosphériques (avions…)



Specifications	MTP 5-R	MTP 5-H
Altitude range	0 - 600 m	0 - 600 m
Altitude resolution	50 m	50 m
Measurement cycle	150 sec minimum	150 sec minimum
Accuracy of temperature profile	± 0.5 °C adiabatic ± 1.0 °C inversion	± 0.2 °C adiabatic ± 0.5 °C inversion
Central measurement frequency	59.6 GHz	59.6 GHz
Receiver sensitivity	0.04 °C 1 second integration time	0.04 °C 1 second integration time
Number of measurement angles	16 6° intervals from 0-90°	16 6° intervals from 0-90°
Power requirements	220 VAC or 110 VAC 50-60 Hz	220 VAC or 110 VAC 50-60 Hz
Power consumption	200 W max 60 W nominal	200 W max 60 W nominal
Ambient temperature range	-20 °C to +30 °C -40 °C insulating jacket option +50 °C additional cooling option	-20 °C to +50 °C -40 °C insulating jacket option
Operating conditions	Fixed cover requires manual cleaning	Rotating cover self-cleans deposition
Calibration	self-calibrating relative to ambient air temperature sensor (included) and internal radiometer reference load	self-calibrating relative to ambient air temperature sensor (included) and internal radiometer reference load
Dimensions (nominal) MTP 5, excluding power supply	25 cm diameter 63 cm length 20 kg weight	25 cm diameter 58 cm length 20 kg weight
Typical motor operating life-time	In excess of 1 year (10 min. scans)	In excess of 5 years (10 min. scans)

Kipp & Zonen B.V. reserve the right to alter specifications of the equipment described in this documentation without prior notice.

Spécifications techniques



Exemple de profils verticaux effectués à Strasbourg en 1999
Source : ASPA