



Surveillance de la Qualité de l'Air  
en Ile-de-France

**ETUDE DE LA DISTRIBUTION SPATIALE  
DES NIVEAUX MOYENS D'OZONE EN PERIODE ESTIVALE  
DANS LE SECTEUR DE RAMBOUILLET  
ET DANS LA ZONE RURALE SUD-OUEST DE L'ILE-DE-FRANCE**

**JUIN 2001**

**AIRPARIF**  
Surveillance de la Qualité de l'Air  
en Ile-de-France

**ETUDE DE LA DISTRIBUTION SPATIALE  
DES NIVEAUX MOYENS D'OZONE EN PERIODE ESTIVALE  
DANS LE SECTEUR DE RAMBOUILLET  
ET DANS LA ZONE RURALE SUD-OUEST DE L'ILE-DE-FRANCE**

---

**JUIN 2001**

---

Etude réalisée par :

**AIRPARIF Surveillance de la Qualité de l'Air en Ile-de-France**  
7 rue Crillon 75004 Paris – Tél. : 01.44.59.47.64 – Fax : 01.44.59.47.67

3615 AIRPARIF  
[www.airparif.asso.fr](http://www.airparif.asso.fr)

# SOMMAIRE

<b>1 - RAPPELS ET GÉNÉRALITÉS SUR L'OZONE.....</b>	<b>1</b>
1.1. LES MÉCANISMES DE PRODUCTION, DE DESTRUCTION ET DE TRANSPORT DE L'OZONE TROPOSPHÉRIQUE.....	2
1.1.1. Mécanismes chimiques dans la troposphère naturelle.....	2
1.1.1.1. Production d'ozone.....	2
1.1.1.2. Destruction photochimique de l'ozone.....	3
1.1.1.3. Destruction au sol.....	3
1.1.2. Mécanismes chimiques dans la troposphère polluée.....	3
1.1.2.1. Source des radicaux OH et NO <sub>3</sub> .....	4
1.1.2.2. Oxydation des composés organiques volatils .....	4
1.1.2.2.1. Oxydation initiée par le radical OH.....	4
1.1.2.2.2. Oxydation initiée par le radical NO <sub>3</sub> .....	4
1.1.2.2.3. Ozonolyse.....	4
1.1.2.3. Chimie des composés carbonylés .....	4
1.1.2.4. Réactions de terminaison des chaînes d'oxydation .....	4
1.1.2.5. Rôle des aérosols.....	4
1.1.3. Chimie des oxydes d'azote dans la troposphère.....	5
1.1.3.1. Composés oxy-azotés inorganiques .....	5
1.1.3.2. Nitrates organiques .....	5
1.1.4. Processus dynamiques.....	6
1.1.4.1. Echanges verticaux.....	6
1.1.4.1.1. Couche de mélange et troposphère libre.....	6
1.1.4.1.2. Echanges stratosphère – troposphère .....	7
1.1.4.2. Echanges horizontaux .....	7
1.1.4.2.1. Transport horizontal à grande échelle.....	7
1.1.4.2.2. Echelle synoptique .....	7
1.1.4.2.3. Régime de brise.....	8
1.2. OZONE ET PRÉCURSEURS EN ATMOSPHÈRE POLLUÉE : DE L'ÉCHELLE LOCALE À L'ÉCHELLE RÉGIONALE ..8	
1.2.1. Les échelles temporelles et spatiales .....	8
1.2.2. Facteurs influençant le comportement de l'ozone à l'échelle locale.....	9
1.2.2.1. Les facteurs chimiques.....	9
1.2.2.1.1. Piégeage chimique.....	9
1.2.2.1.2. Dépôt sec .....	9
1.2.2.2. Les facteurs météorologiques .....	10
1.2.2.2.1. Le rayonnement .....	10
1.2.2.2.2. La température.....	10
1.2.2.2.3. La situation synoptique .....	10
1.2.2.2.4. Inversion de température et dynamique de la couche de mélange .....	11
1.2.3. Episodes de pollution .....	11
1.2.3.1. Noyau urbain central.....	11
1.2.3.2. Périmètre urbain.....	12
1.2.3.3. Région de transport mésoéchelle .....	12
1.3 EFFETS DE L'AUGMENTATION DES CONCENTRATIONS D'OZONE SUR L'EFFET DE SERRE ADDITIONNEL ET SUR LA TRANSMISSION DU RAYONNEMENT ULTRAVIOLET SOLAIRE .....	12
1.4. EFFETS DE L'AUGMENTATION DES CONCENTRATIONS D'OZONE SUR LA VÉGÉTATION .....	13
1.5. EFFETS DE L'AUGMENTATION DES CONCENTRATIONS D'OZONE SUR LA SANTÉ.....	13
<b>2 - PHOTOCHEMIE EN RÉGION ILE-DE-FRANCE.....</b>	<b>14</b>
2.1. EPISODES ESTIVAUX DE POLLUTION PHOTOCHEMIQUE : LA ZONE RURALE SUD-OUEST DE L'ILE-DE-FRANCE LA PLUS TOUCHÉE.....	14
2.2. LES PARAMÈTRES QUI DÉFAVORISENT LE SUD-OUEST DE LA RÉGION DANS LES ÉPISODES ESTIVAUX D'OZONE .....	15
2.3. LE CAPTEUR DE SONCHAMP EST -IL PLACÉ À L'ÉPICENTRE DU PHÉNOMÈNE OU TRADUIT -IL UNE SITUATION GÉNÉRALE QUI CONCERNE TOUT LE SUD-OUEST DE LA ZONE RURALE FRANCILIENNE ?.....	17
<b>3 - CAMPAGNE DE MESURE DE L'ÉTÉ 2000.....</b>	<b>18</b>
3.1. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE .....	18
3.2. PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE ET RÉPARTITION DES MOYENS MÉTÉOROLOGIQUES.....	18
3.3. PÉRIODE DE MESURES.....	21
3.4. CARACTÉRISTIQUES DES SITES .....	21

<b>4 - RÉSULTATS DES MESURES AUTOMATIQUES .....</b>	<b>28</b>
4.1 – CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES.....	28
4.2 – NORMES DE QUALITÉ DE L’AIR.....	32
4.3 – RÉSULTATS DES MESURES AUTOMATIQUES.....	33
4.3.1 – <i>Éléments statistiques</i> .....	33
4.3.2 – <i>Représentation graphique de quelques épisodes</i> .....	33
<b>5 - RÉSULTATS DES MESURES D’OZONE PAR TUBES À DIFFUSION.....</b>	<b>36</b>
<b>6 - LE CAPTEUR DE SONCHAMP EST-IL PLACÉ À L’ÉPICENTRE DU PHÉNOMÈNE, OU TRADUIT-IL UNE SITUATION GÉNÉRALE QUI CONCERNE TOUT LE SUD-OUEST DE LA ZONE RURALE FRANCILIENNE ? .....</b>	<b>39</b>
6.1 - LA HAUTEUR DE PRÉLÈVEMENT DE 18 MÈTRES PERMET-ELLE DE MESURER DES CONCENTRATIONS REPRÉSENTATIVES DU NIVEAU SOL ?.....	39
6.2 – LA VILLE DE RAMBOUILLET EST -ELLE ÉGALEMENT CONCERNÉE PAR CE PHÉNOMÈNE ?.....	39
6.3 – LE PHÉNOMÈNE S’ÉTEND-IL ÉGALEMENT AUX AUTRES ZONES URBAINES ISOLÉES DE FAIBLE SUPERFICIE OU D’ÉMISSIONS FAIBLES ? .....	40
6.4 – LE MASSIF FORESTIER DE RAMBOUILLET FAVORISE-T-IL L’AUGMENTATION DES NIVEAUX D’OZONE EN AVAL ?.....	40
6.5 – NIVEAUX D’OZONE EN AMONT DES ZONES RURALES.....	40
6.6 – POUR D’AUTRES POLLUANTS, QUE PEUT -ON DIRE ?.....	41
6.6.1 – <i>Oxydes d’azote</i> .....	41
6.6.2 – <i>Particules</i> .....	42
<b>7 - CONCLUSIONS.....</b>	<b>45</b>
<b>ANNEXE 1 .....</b>	<b>46</b>
<b>ANALYSE DES NIVEAUX D’OZONE LORS DE L’ÉPISODE PHOTOCHEMIQUE DU 3 AU 5 SEPTEMBRE 1999.....</b>	<b>47</b>
<b>ANNEXE 2 .....</b>	<b>53</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>55</b>

## LEXIQUE

O <sub>3</sub> :	Ozone
CO :	Monoxyde de carbone
NO :	Monoxyde d'azote
NO <sub>2</sub> :	Dioxyde d'azote
NOx :	Oxydes d'azote (NO + NO <sub>2</sub> )
COV :	Composés organiques volatils
PM10 :	Particules dont le diamètre aérodynamique moyen est inférieur à 10 µm
CH <sub>4</sub> :	Méthane
CO <sub>2</sub> :	Dioxyde de carbone ou gaz carbonique
1 ppm :	1 partie par million, soit 1000 mm <sup>3</sup> de polluant par m <sup>3</sup> d'air
1 ppb :	1 partie par billion, soit 1 mm <sup>3</sup> de polluant par m <sup>3</sup> d'air
1 ppt :	1 partie par trillion, soit 0,001 mm <sup>3</sup> de polluant par m <sup>3</sup> d'air
cm/s :	Centimètres par seconde
µm :	Micromètre (1 µm = 10 <sup>-6</sup> m, soit 1 millionième de mètre)
nm :	Nanomètre (1 nm = 10 <sup>-9</sup> m, soit 1 milliardième de mètre)
µg/m <sup>3</sup> :	Microgramme par mètre cube (1 µg = 10 <sup>-6</sup> g, soit 1 millionième de gramme)
° C :	Degrés Celsius (échelle de température centigrade)
° K (ou K) :	Degrés Kelvin (échelle de température absolue : 0 K = -273 °C)

## GLOSSAIRE

<b>Périodes de référence</b>
Année civile : du 1er janvier au 31 décembre

<b>Eléments statistiques</b>	
<b>Moyenne agglomération parisienne</b>	Moyenne de l'ensemble des sites urbains et périurbains de l'agglomération parisienne (définition INSEE 1990), avant un taux de représentativité supérieur ou égal à 75%
<b>Max h</b>	Mesure horaire la plus élevée
<b>Max J</b>	Mesure journalière la plus élevée
<b>Max 8 h</b>	Moyenne glissante heure par heure calculée sur 8 heures consécutives la plus élevée
<b>P50 h</b>	Percentile 50 horaire (médiane) : valeur dépassée par la moitié des mesures horaires
<b>P50 J</b>	Percentile 50 journalier (médiane) : valeur dépassée par la moitié des mesures journalières
<b>P98 h</b>	Percentile 98 horaire : valeur dépassée par 2 % des mesures horaires
<b>P98 J</b>	Percentile 98 journalier : valeur dépassée par 2 % des mesures journalières
<b>Nbre D 180 h</b>	Nombre de mesures horaires supérieures ou égales à $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$
<b>Nbre D 65 J</b>	Nombre de mesures journalières supérieures ou égales à $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$
<b>Nbre D 110 8 h</b>	Nombre de moyennes glissantes heure par heure calculées sur 8 heures consécutives supérieures ou égales à $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$
<b>Nbre J avec 1 h <math>\geq</math> 180</b>	Nombre de jours où l'on a observé au moins une mesure horaire supérieure ou égale à $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$
<b>Nbre J avec 8 h <math>\geq</math> 110</b>	Nombre de jours où l'on a observé au moins une moyenne glissante heure par heure sur 8 heures consécutives supérieure ou égale à $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$
<b>TR h</b>	Taux de représentativité des mesures horaires (rapport du nombre de mesures horaires valides sur nombre théorique d'heures de mesures de la période) (ex : une année = 365 jours théoriques = 8760 heures théoriques)
<b>TR 8 h</b>	Taux de représentativité des mesures 8 heures (rapport du nombre de mesures 8 heures valides sur nombre théorique de moyennes sur 8 heures de la période) (ex : une année = 365 jours = 8760 périodes de 8 heures glissantes heure par heure)

. Les concentrations (moyennes, maximums, percentiles) sont toutes exprimées en microgrammes de polluant par mètre cube d'air.

. Toutes les heures sont exprimées en heures légales

. La représentativité est considérée comme satisfaisante par l'Union Européenne

si le TR est supérieur ou égal à 75 %. Sauf cas particulier, les statistiques

pour les paramètres ayant un taux de représentativité horaire, journalier, 8 heures et/ou hebdomadaire

inférieur à 75 % ne sont pas calculées et sont indiquées "nr" (non représentatif)

## 1 - RAPPELS ET GENERALITES SUR L'OZONE

### EXTRAITS DU RAPPORT n° 30 DE L'ACADEMIE DES SCIENCES « OZONE ET PROPRIETES OXYDANTES DE LA TROPOSPHERE » - OCTOBRE 1993 [1]

#### Introduction

L'accroissement démographique et le développement des modes de production et des transports induisent depuis près de 2 siècles un changement de la composition en gaz traces de l'atmosphère. Les conséquences principales sur les équilibres globaux de l'environnement terrestre en sont les suivantes : l'effet de serre additionnel, la diminution de la couche d'ozone stratosphérique, et l'augmentation de la concentration d'ozone et des photo-oxydants dans la troposphère.

La troposphère est la partie inférieure de l'atmosphère comprise entre le sol et une altitude d'environ 15 km. La Figure 1 ci-dessous représente les différentes couches de l'atmosphère et les variations de température et de pression en fonction de l'altitude.

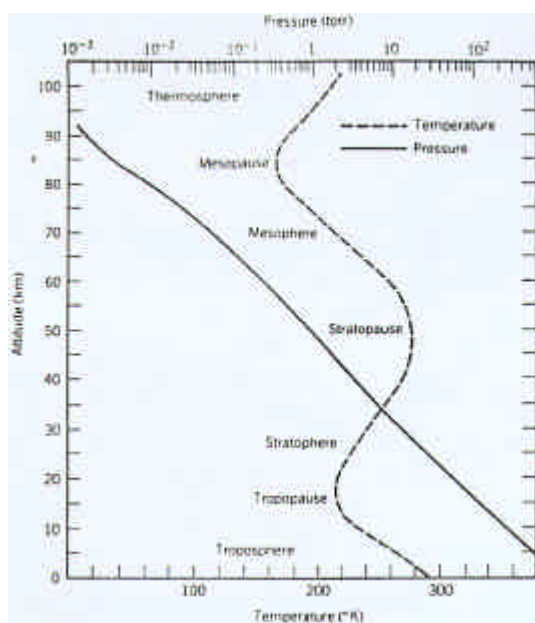


Fig 1 - Variation de température et de pression avec l'altitude  
(source : cours de pollution atmosphérique : G. Mouvier) [2]

L'ozone O<sub>3</sub> est un constituant secondaire de l'atmosphère issu de processus physico-chimiques, complexes par les différentes échelles spatiales concernées, la multiplicité des réactions, les rythmes très différents des cycles chimiques mis en jeu, les conditions climatiques, le relief, l'altitude etc... Dans la stratosphère, l'origine de l'ozone est unique, liée à la photodissociation de l'oxygène moléculaire (O<sub>2</sub>) sous l'influence du rayonnement solaire ultra-violet. Dans la troposphère en revanche, cette origine est double : d'une part, les transferts de masse d'air entre la stratosphère et la troposphère induisent une source dynamique d'environ 10% du contenu en ozone de l'atmosphère aux altitudes inférieures à 12 kilomètres, d'autre part, la photo-oxydation de toute une série de précurseurs, hydrocarbures, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, méthane, conduit à l'existence d'une source photochimique d'origine anthropique (combustion, transports...).

L'ozone formé par photochimie dans les atmosphères urbaines et périurbaines des grandes agglomérations fortement polluées constitue une source qui contribue, avec la production directe d'ozone dans l'atmosphère libre hors des régions de pollution, à l'augmentation des concentrations observées aux échelles régionales et globales.

La comparaison entre les valeurs actuelles d'ozone et les concentrations mesurées au début du XXe siècle montre que le niveau d'ozone dans l'atmosphère libre a été multiplié par 4 dans l'hémisphère Nord et par près de 2 dans l'hémisphère Sud. Ceci correspond à un taux de croissance régulier, supérieur à 1,5 % par an dans l'hémisphère Nord.

La variation en latitude des concentrations d'ozone traduit l'influence des sources anthropiques, reflétant la dissymétrie dans la distribution des sources, plus de 80 % des précurseurs polluants étant émis dans l'hémisphère Nord et dans les régions tropicales.

Oxydant puissant, l'ozone constitue un danger pour la santé lorsque les teneurs dépassent des seuils de 100 à 120 ppb (note : 1 ppb d'ozone  $\approx$  2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Il est également néfaste pour la croissance des végétaux, et constitue une source supplémentaire du dépérissement des forêts et de la dégradation des matériaux. C'est également un gaz à effet de serre. Il importe en revanche de constater que l'augmentation des concentrations dans la troposphère ne peut compenser les diminutions importantes observées dans la stratosphère.

### 1.1. Les mécanismes de production, de destruction et de transport de l'ozone troposphérique

La distribution spatiale et temporelle de l'ozone dans la troposphère est contrôlée par quatre processus principaux :

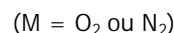
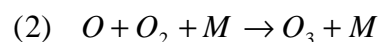
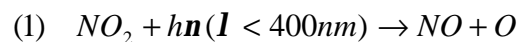
- a) La production photochimique dans la troposphère, qui résulte de l'oxydation du monoxyde de carbone et des hydrocarbures en présence d'oxydes d'azote,
- b) La destruction photochimique dans la troposphère,
- c) Les échanges de masse d'air entre la stratosphère et la troposphère,
- d) Le dépôt au sol (destruction à la surface terrestre et sur les plantes).

En ce qui concerne les mécanismes photochimiques impliqués, il importe de distinguer la troposphère naturelle et les régions polluées, afin de tenir compte de la complexité croissante des réactions chimiques, liée notamment au plus grand nombre de constituants chimiquement réactifs émis en région polluée. Par ailleurs, l'importance des phénomènes de transport sur la distribution spatiale et temporelle de l'ozone et de ses précurseurs, conduit naturellement à distinguer les différentes échelles spatiales de ces processus, de l'échelle locale, puis régionale, à l'échelle globale.

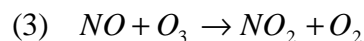
#### **1.1.1. Mécanismes chimiques dans la troposphère naturelle**

##### *1.1.1.1. Production d'ozone*

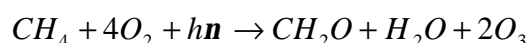
La production directe d'ozone dans l'atmosphère résulte de la seule réaction de recombinaison d'un atome d'oxygène O avec une molécule d'oxygène  $\text{O}_2$ , en présence d'un troisième corps qui stabilise les produits de la réaction. Dans la troposphère, l'atome d'oxygène nécessaire est produit à partir de la photodissociation du  $\text{NO}_2$  aux longueurs d'onde inférieures à 400 nm :



Le NO ainsi formé réagissant rapidement avec l'ozone pour reformer le  $\text{NO}_2$  :



Il s'établit ainsi un état stationnaire entre  $\text{NO}_2$ , NO et  $\text{O}_3$ . Il n'y a production nette d'ozone que lorsque le NO est converti en  $\text{NO}_2$  sans perte d'ozone. Cette conversion fait intervenir dans la troposphère naturelle les radicaux hydroperoxyde  $\text{HO}_2$  et le méthylperoxyde  $\text{CH}_3\text{O}_2$ , intermédiaires de l'oxydation du CO et du méthane  $\text{CH}_4$ . Ces radicaux réagissent avec NO en troposphère naturelle lorsque le rapport des concentrations de NO et d'ozone est supérieur à  $2 \cdot 10^{-4}$ , ce qui correspond à des teneurs en oxydes d'azote (NOx) supérieures à environ 10 à 20 pptv. Cette valeur constitue un seuil déterminant quant à la production nette d'ozone. Les bilans globaux des chaînes d'oxydation de CO et  $\text{CH}_4$ , initiées par la réaction d'oxydation avec le radical hydroxyle OH, peuvent être exprimés de la façon suivante :





En troposphère modérément riche en NOx, l'oxydation de CO et CH<sub>4</sub> conduit donc à la formation d'ozone (figure 2). L'oxydation complète d'une molécule de CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub> produit en fait 3,7 molécules d'ozone, dans la mesure où le formaldéhyde formé, CH<sub>2</sub>O, peut à son tour être oxydé. Selon l'hydrocarbure de départ, le potentiel maximum de formation d'ozone peut être compris entre 4 et 14 molécules.

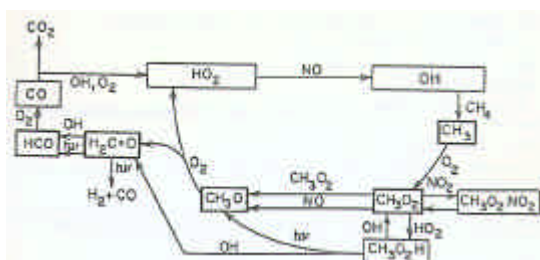


Fig 2 – Mécanismes d'oxydation du méthane et du monoxyde de carbone dans la troposphère

### 1.1.1.2. Destruction photochimique de l'ozone

Dans la troposphère, l'ozone absorbe le rayonnement solaire dans le domaine des longueurs d'onde visibles, entre 410 nm et 850 nm, et ultra-violettes entre 290 nm et 350 nm. Cette absorption conduit à la photodissociation de l'ozone qui produit de l'oxygène atomique dans l'état fondamental O(<sup>3</sup>P) ou excité O(<sup>1</sup>D)

Lorsque les concentrations en NOx sont inférieures au seuil de quelques pptv, le bilan de l'oxydation complète du méthane en gaz carbonique fait apparaître une perte nette de 1,7 molécule d'ozone par molécule de CH<sub>4</sub> oxydé et une perte de 3,5 radicaux HOx ([OH] + [HO<sub>2</sub>]), dont les teneurs sont une mesure du pouvoir oxydant de la troposphère.

### 1.1.1.3. Destruction au sol

Le puits dominant pour l'ozone en milieu rural est la destruction sèche à la surface, qui résulte pour l'essentiel de deux voies de disparition principales :

- 1- La simple décomposition thermodynamique  $2O_3 \rightarrow 3O_2$ , catalysée par les surfaces,
- 2- La réaction avec les surfaces végétales.

La vitesse globale de destruction par voie sèche est alors gouvernée par deux processus indépendants :

- a) – La vitesse d'apport de l'ozone depuis l'atmosphère jusqu'au voisinage de la surface. Ce facteur est directement dépendant de la turbulence atmosphérique. Pour l'essentiel, ce terme croît quand la vitesse du vent augmente ;
- b) – La vitesse de réaction de l'ozone avec la surface. Ce terme dépend de la nature de la surface, et, pour les surfaces végétales, de l'activité métabolique. Du fait des échanges stomatiques qui sont alors intenses, la vitesse de fixation est plus grande de jour, en période photosynthétique, que de nuit.

La vitesse de dépôt peut varier, selon les conditions locales, de 0,02 à 2,0 cm/s. Les valeurs moyennes usuellement retenues dans les modèles sont de 0,3 à 0,5 cm/s.

## 1.1.2. Mécanismes chimiques dans la troposphère polluée

La situation est différente en atmosphère polluée du fait de la présence d'autres composés chimiques et notamment des composés organiques volatils (COV) autres que le méthane, d'origine biogénique ou anthropique. Le terme COV regroupe les hydrocarbures (alcanes, alcènes, alcynes, aromatiques) et les composés oxygénés. Les COV sont extrêmement nombreux et de structures très diverses, et ont des réactivités très variées, en général supérieures à celles du méthane. Leurs émissions sont souvent associées à celles du NO. Les processus chimiques en zone polluée sont donc plus complexes, et les mécanismes mis en jeu conduisent à des concentrations d'ozone qui peuvent être très supérieures à celles observées en milieu naturel non pollué. Cette augmentation de la concentration d'ozone est due à des mécanismes d'oxydation des COV qui viennent perturber le cycle naturel NOx – O<sub>3</sub>, en offrant d'autres voies d'oxydation du NO en NO<sub>2</sub> que la seule réaction avec l'ozone. Les mécanismes d'oxydation des COV sont induits principalement par le radical hydroxyle OH le jour, et le radical NO<sub>3</sub> la nuit, ainsi que par l'ozone pour certains d'entre eux.

### 1.1.2.1. Source des radicaux OH et NO<sub>3</sub>

En troposphère polluée, les radicaux OH ont plusieurs sources possibles :

- a) La photolyse de l'ozone aux longueurs d'onde inférieures à 310 nm,
- b) La photolyse du formaldéhyde,
- c) La photolyse de l'acide nitreux HONO.

Les radicaux NO<sub>3</sub> proviennent presque exclusivement de la réaction de O<sub>3</sub> avec NO<sub>2</sub>. Du fait de leur photolyse très rapide dans le visible, leur concentration est très faible de jour. De nuit, les radicaux nitrates sont en équilibre avec NO<sub>2</sub> et l'anhydride nitrique.

### 1.1.2.2. Oxydation des composés organiques volatils

#### 1.1.2.2.1. Oxydation initiée par le radical OH

Le mécanisme d'oxydation troposphérique des COV peut généralement se décomposer en quatre étapes, la complexité du mécanisme complet augmentant très rapidement avec la taille du composé de départ.

- 1<sup>ère</sup> étape : formation de radicaux organiques par arrachement d'hydrogène ou addition sur une liaison non saturée, dont la nature diffère suivant le composé de départ (alcane, alcène...). Cette première étape est l'étape limitative du processus. Les constantes de vitesse varient rapidement avec la nature du composé organique, les alcènes et les composés aromatiques étant les plus réactifs.
- 2<sup>ème</sup> étape : formation d'un radical peroxy par addition d'oxygène sur le radical précédemment formé.
- 3<sup>ème</sup> étape : réduction du radical peroxy formé, soit par NO (cas le plus général), soit par réaction avec le radical HO<sub>2</sub> ou un autre radical peroxy.
- 4<sup>ème</sup> étape : le radical de type RO formé précédemment réagit avec l'oxygène moléculaire pour former des composés carbonyles et le radical HO<sub>2</sub>. Le radical RO peut aussi s'isomériser ou se décomposer en formant dans les deux cas un radical R. qui réagit ensuite avec O<sub>2</sub> pour former à nouveau un radical peroxy RO<sub>2</sub>.

Dans tous ces mécanismes, il se forme toujours un ou plusieurs radicaux HO<sub>2</sub> et RO<sub>2</sub> qui peuvent oxyder NO en NO<sub>2</sub>, sans consommation d'ozone. Les molécules de NO<sub>2</sub> ainsi formées peuvent ensuite se photolyser par la réaction (1) suivie immédiatement par la réaction (2) de formation d'ozone. On explique ainsi les fortes concentrations d'ozone observées dans les atmosphères polluées dès que la lumière solaire est suffisamment intense. Dans les cas plus rares où la concentration des NO<sub>x</sub> est insuffisante, il peut alors y avoir consommation d'ozone.

#### 1.1.2.2.2. Oxydation initiée par le radical NO<sub>3</sub>

L'oxydation par le radical NO<sub>3</sub> peut être importante pour les hydrocarbures insaturés tels que les alcènes et les terpènes. Le mécanisme primaire est une addition de NO<sub>3</sub> sur une liaison non saturée.

#### 1.1.2.2.3. Ozonolyse

Les alcènes et les polyènes peuvent réagir avec l'ozone à des vitesses comparables à celles de la réaction avec OH. Il se forme d'abord un iso-ozonide qui, instable, se décompose en un aldéhyde et un biradical (intermédiaire de CRIEGEE). Les biradicaux peuvent soit réagir avec NO pour donner encore un aldéhyde, soit se réarranger pour donner un acide carboxylique.

### 1.1.2.3. Chimie des composés carbonyles

Dans cette chimie complexe, il importe également de prendre en compte les composés carbonyles, aldéhydes et cétones. Ce sont des polluants primaires émis par différentes sources, mais aussi des polluants secondaires produits lors de la photo oxydation de tous les COV. Ces composés forment une source potentielle importante de radicaux libres, et leur oxydation produit de l'ozone, et permet la dégradation progressive des COV.

### 1.1.2.4. Réactions de terminaison des chaînes d'oxydation

Ce sont principalement des réactions de recombinaison avec un oxyde d'azote, ou des réactions de peroxy entre eux.

### 1.1.2.5. Rôle des aérosols

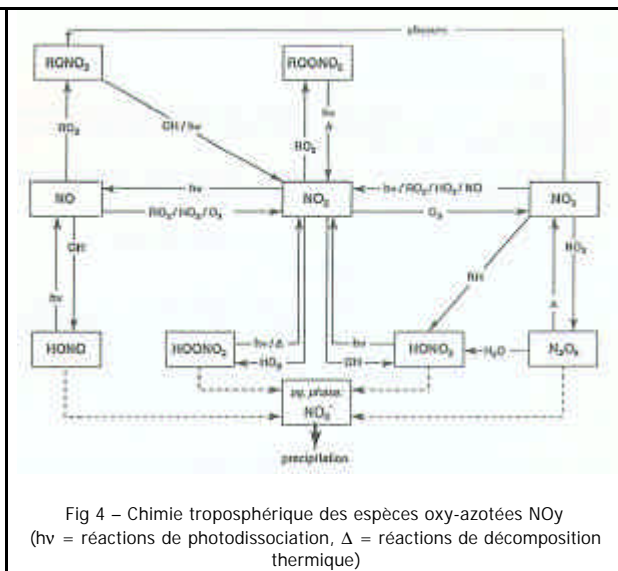
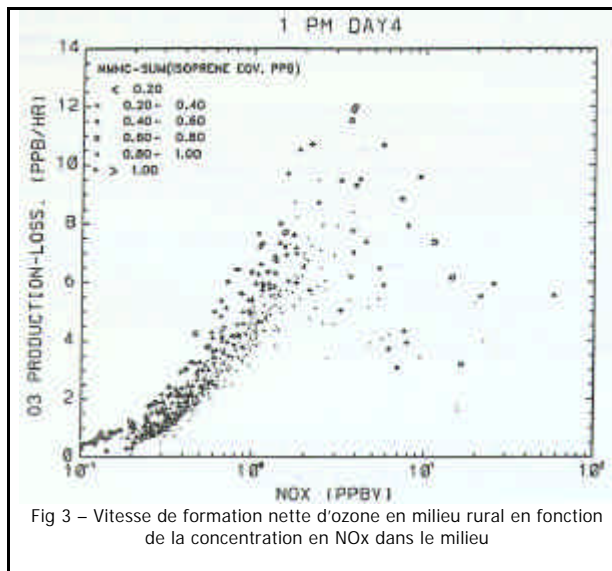
L'aérosol urbain contribue également aux mécanismes chimiques en zone polluée par, d'une part la réduction de la visibilité et son action sur le rayonnement solaire, d'autre part ses propriétés propres de toxicité. Cet aérosol est un milieu très complexe constitué d'un mélange d'émissions primaires telles que suies et cendres volantes, et d'espèces secondaires résultant de processus chimiques dans l'atmosphère. Les principaux constituants en sont des sulfates, nitrates, sels d'ammonium, métaux, composés carbonés, et l'eau.

### 1.1.3. Chimie des oxydes d'azote dans la troposphère

Dans la troposphère, il existe différentes zones de concentration des NOx :

- une zone de « bas niveau », en atmosphère non polluée, où les niveaux de NOx sont déterminés par les transports à longue distance des nitrates, ce qui détermine fondamentalement l'importance des voies d'oxydation, donc la consommation ou la production nette d'ozone ;
- une zone de « moyen niveau », en atmosphère rurale ou forestière non polluée. La végétation étant source de COV, des niveaux « naturels » d'ozone très élevés peuvent être observés dans ces zones ;
- une zone de « haut niveau », en atmosphère polluée, dans les zones urbaines ou industrielles, ou sous leur influence directe. L'équilibre photo stationnaire NO<sub>2</sub>-NO-O<sub>3</sub> peut être fortement perturbé, et les interprétations peuvent alors être très compliquées.

Le potentiel de formation d'ozone dans la troposphère naturelle ou polluée est donc directement lié à la distribution spatio-temporelle des NOx. Celle-ci dépend de la chimie et du transport des espèces azotées, qui comprennent les oxydes d'azote NOx, mais aussi des espèces oxy-azotées, notées NOy, qui constituent des réservoirs ou des puits de NOx (figures 3 et 4 ci-dessous).

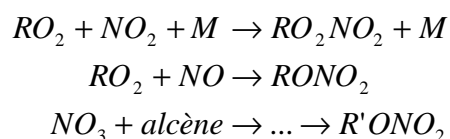


#### 1.1.3.1. Composés oxy-azotés inorganiques

Les NOx sont émis dans l'atmosphère majoritairement sous forme de NO. NO et NO<sub>2</sub> sont rapidement inter-convertis, en des temps de l'ordre de la minute, par réaction entre NO et O<sub>3</sub> et par photolyse de NO<sub>2</sub>. Cette dernière régénère NO et O<sub>3</sub>, conduisant à un état photo-stationnaire entre NO, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub>, et la conversion de NO en NO<sub>2</sub> n'est accompagnée de formation d'ozone que lorsque NO réagit avec les radicaux peroxydes HO<sub>2</sub> et RO<sub>2</sub>.

#### 1.1.3.2. Nitrates organiques

Ces composés sont formés principalement dans l'atmosphère par les réactions suivantes :



Les radicaux RO<sub>2</sub> sont produits soit par oxydation de composés organiques, soit par photolyse. Parmi les peroxy-nitrates, les plus stables sont les peroxyacylnitrates, et parmi ces derniers, le plus important est le

peroxyacétylnitrate (PAN)  $\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{O}_2\text{NO}_2$  (ou nitrate de peroxyacétyle), produit notamment à partir de l'acétaldéhyde  $\text{CH}_3\text{CHO}$ .

Dans la basse atmosphère, la principale réaction du PAN est la décomposition thermique qui régénère  $\text{NO}_2$ , et dont la vitesse est fortement dépendante de la température. Deux autres processus d'élimination du PAN sont à considérer : la réaction avec le radical OH et la photolyse. Ils prédominent dans la haute troposphère, où la décomposition thermique est très lente, du fait des basses températures qui y règnent. Ces deux processus limitent à 3 mois la durée de vie moyenne du PAN dans la troposphère. Cette durée de vie est néanmoins suffisamment élevée pour que le PAN soit un réservoir de  $\text{NO}_x$  efficace, capable de transporter ces espèces loin de leurs zones d'émission.

#### 1.1.4. Processus dynamiques

La distribution de l'ozone et de ses précurseurs dans la troposphère résulte de la combinaison entre les processus chimiques de formation ou de destruction, et les processus de mélange qui viennent disperser et transporter les composés. Selon la durée de vie des espèces et les réservoirs considérés, ces mécanismes peuvent conduire à :

- une production rapide d'ozone à partir des précurseurs réactifs et un transport à mésoéchelle puis à grande échelle ;
- une production progressive au cours du transport de l'échelle régionale à la grande échelle ;
- un transport des précurseurs et une formation lente d'ozone à l'échelle globale.

Par ailleurs, il importe également de considérer les transports verticaux qui contribuent à l'apport d'ozone stratosphérique, réservoir principal puisqu'il contient près de 90% de la quantité totale d'ozone présente dans l'atmosphère, vers la troposphère, et au transfert de l'ozone produit dans les couches inférieures polluées de la troposphère vers la troposphère libre.

##### 1.1.4.1. Echanges verticaux

La structure verticale de l'atmosphère est essentiellement régie par le profil vertical de température (voir figure 1, page 1). L'atmosphère présente, suivant la verticale, une succession de couches stables et instables d'épaisseur variable, les couches stables interdisant ou limitant les transferts de matière d'une couche à une autre. On distingue plusieurs domaines d'altitude en fonction du signe du gradient vertical de température :

- La troposphère, caractérisée par un gradient négatif de température, peut être divisée en deux domaines d'altitude :
  - la couche limite, du sol à approximativement 1,5 km d'altitude, directement affectée par les phénomènes se produisant à l'échelle locale (pollution, cycle thermique journalier, vents locaux). L'altitude de la première inversion de température évolue rapidement au cours de la journée, faisant ainsi varier l'épaisseur de la couche dans laquelle sont émis les polluants, appelée aussi couche de mélange (voir figure 5).
  - la troposphère libre, aux altitudes supérieures, plus homogène à grande échelle.
- La stratosphère s'étend au-dessus de la tropopause, située en moyenne à 12 km. C'est un domaine stratifié et stable verticalement, du fait de l'existence d'un gradient positif de température avec l'altitude.

Du fait de l'historique des différentes masses d'air, deux situations peuvent se rencontrer :

- La température décroît plus rapidement que le gradient adiabatique. Schématiquement, les couches inférieures sont anormalement chaudes, par exemple du fait de l'échauffement du sol par temps clair sous l'effet du rayonnement solaire. Elles ont alors tendance à s'élever, créant une convection marquée qui a pour effet de mélanger rapidement les différentes couches troposphériques. L'atmosphère est instable, et cette situation est favorable à la dispersion des émissions et des polluants secondaires.
- La température décroît moins rapidement que le gradient adiabatique, ou croît avec l'altitude. Soit les couches inférieures sont anormalement froides (cas fréquent le matin par ciel clair du fait du rayonnement intense du sol pendant la nuit), soit les couches supérieures sont anormalement chaudes (cas locaux, exemple : bassin de Los Angeles). Dans ce cas, qui correspond à une inversion de température où l'air dense est situé sous l'air chaud, il n'y a aucun mélange vertical spontané. L'atmosphère est stratifiée, stable, et la situation est alors très favorable à l'accumulation de la pollution.

##### 1.1.4.1.1. Couche de mélange et troposphère libre

La couche de mélange est instable ou neutre, et donc bien mélangée à l'échelle de l'heure. C'est dans cette couche que se produisent les épisodes de pollution. L'altitude de la première inversion de température, variable au cours de la journée, limite vers le haut le volume de la couche de mélange. L'ampleur des épisodes de pollution photochimique est dépendante de ce phénomène de manière déterminante (voir figure 5).

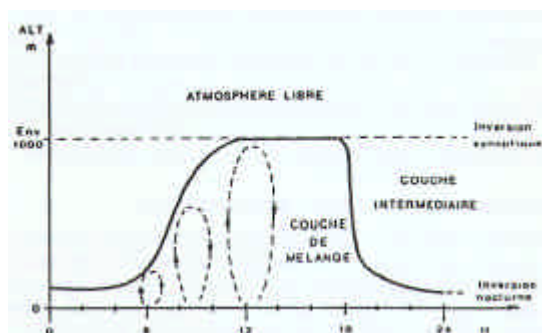


Fig 5 – Variation de la hauteur de la couche de mélange au cours d'un cycle diurne

La nuit, le sol se refroidit par rayonnement plus vite que l'atmosphère, ce qui crée une inversion de température à faible altitude. La couche de mélange est peu épaisse, de quelques dizaines de mètres à 100 mètres. Les polluants primaires émis près du sol s'accumulent dans un faible volume et leur concentration atteint, au lever du jour, des valeurs élevées. Corrélativement, la concentration d'ozone est très faible, car il a été détruit par dépôt au sol la nuit et par titration chimique. Le matin, le soleil réchauffe le sol, ce qui crée des cellules de convection verticale qui se développent de plus en plus en altitude. Le sommet de la première inversion de température s'élève au cours de la matinée jusqu'à un niveau d'équilibre, atteint en fin de matinée, qui dure jusqu'en fin d'après-midi. La première couche d'inversion a atteint ainsi l'inversion synoptique, générée par des processus de type anticyclonique, qui bloquent tout échange entre la couche de mélange et l'atmosphère libre. Lorsque l'angle zénithal solaire augmente, la convection perd en intensité, et dès la nuit tombée, la hauteur de la couche de mélange est ramenée à sa valeur nocturne. La formation de l'inversion nocturne conduit alors à la formation, sous l'inversion synoptique, d'une couche intermédiaire réservoir, totalement isolée du sol et de l'atmosphère libre par les deux inversions. Sa composition, qui est celle de la couche de mélange en fin d'après midi, évolue lentement au cours de la nuit, puis de nouveau rapidement le lendemain au lever du soleil. Les produits présents dans la couche intermédiaire sont réincorporés dans la couche de mélange lorsque la convection se développe. On peut alors observer au sol une pointe d'ozone intense et brève qui correspond au rabattement au sol de cette couche fossile âgée (smog âgé).

#### 1.1.4.1.2. Echanges stratosphère – troposphère

Lors des échanges entre la stratosphère et la troposphère, les masses d'air injectées vers les basses altitudes conservent leurs « caractéristiques » stratosphériques, et notamment un contenu élevé en ozone.

#### 1.1.4.2. Echanges horizontaux

On distingue le transport à grande échelle, le transport à l'échelle synoptique, et les régimes de vent particulier, notamment le régime de brise qui influence fortement les conditions locales.

##### 1.1.4.2.1. Transport horizontal à grande échelle

La circulation générale à grande échelle est déterminée par la position des grands systèmes de hautes et basses pressions. A partir des grandes zones d'émission des précurseurs de l'ozone, on observe dans un premier temps une formation rapide d'ozone à l'échelle locale ou régionale dans la couche limite, sous l'effet de la transformation des COV les plus instables. A cette première phase succède la dispersion et le transport dans la troposphère de l'ozone ainsi formé, et des précurseurs à plus longue durée de vie (CO, CH<sub>4</sub>...) qui donnent progressivement lieu à une production lente d'ozone, en 2 à 3 semaines, responsable de la majeure partie de l'ozone formé à grande échelle.

##### 1.1.4.2.2. Echelle synoptique

La situation météorologique à l'échelle synoptique est un facteur déterminant dans l'apparition d'épisodes de pollution photochimique aiguë, car elle détermine les trajectoires suivies par les masses d'air et donc le transport de l'ozone et de ses précurseurs, ainsi que l'intensité des processus de dispersion. Dans nos régions, les situations dépressionnaires d'été dirigent sur l'Ouest de l'Europe un flux d'air océanique très peu pollué et instable, peu favorable à l'apparition d'épisodes de pollution photochimique.

Les situations anticycloniques sont plus favorables à l'apparition d'épisodes de pollution en Europe de l'Ouest : la circulation générale transporte du Nord-Est vers le Sud-Ouest des masses d'air qui ont lentement traversé les régions industrialisées et très peuplées du Benelux et de l'Allemagne.

#### 1.1.4.2.3. Régime de brise

En absence de vent synoptique notable, de situation anticyclonique ou de marais barométrique, les circulations sont complexes avec la possibilité de recirculation de masses d'air déjà polluées.

### 1.2. Ozone et précurseurs en atmosphère polluée : de l'échelle locale à l'échelle régionale

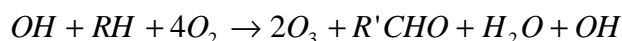
#### 1.2.1. Les échelles temporelles et spatiales

Les précurseurs de l'ozone sont émis dans la couche limite. C'est aussi dans la couche limite que se produisent les épisodes de pollution aiguë. Sa dynamique diurne conditionne largement les concentrations observées près du sol, tandis que ses processus d'échange avec l'atmosphère conditionnent la nature et les flux de composés injectés dans l'atmosphère libre.

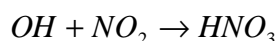
Dans la couche limite, une chimie très complexe s'opérant sur les COV, d'origine aussi bien naturelle qu'anthropique, met en jeu des espèces qui sont dégradées en quelques heures. La plupart d'entre elles n'atteindront pas l'atmosphère libre en quantité notable, et sont donc sans importance directe à l'échelle globale. Elles ont en revanche une importance capitale dans la production d'espèces secondaires dans les basses couches, comme l'ozone, certains COV et les NOx notamment, qui sont ensuite injectées dans l'atmosphère libre.

Par ailleurs, la proximité des sources conduit, pour de très nombreuses espèces, à des niveaux de concentration supérieurs à ce que l'on observe dans l'atmosphère libre. Les concentrations varient rapidement avec la distance aux sources, d'une part globalement du fait de la dilution, d'autre part différemment d'une espèce à l'autre du fait de leurs réactivités différentes. Le cas des hydrocarbures (HC) et plus généralement des COV, et celui des NOx, est particulièrement important.

L'ozone se forme à partir de l'oxydation rapide de NO en NO<sub>2</sub> par un cycle de réactions qui débute, pour une large part, par l'attaque d'un hydrocarbure RH par le radical OH. Le bilan global de ces réactions d'oxydation peut se mettre sous la forme :



Cependant, le radical OH peut également réagir avec de nombreuses autres espèces, en particulier le NO<sub>2</sub>, selon la réaction :



Le rapport des vitesses des deux réactions est proportionnel au rapport HC / NO<sub>2</sub>, ou plus généralement COV/NOx.

En milieu riche en NOx (COV / NOx petit), une part importante des radicaux OH est « détournée » vers la formation de l'acide nitrique HNO<sub>3</sub> par la seconde réaction, ce qui ralentit la vitesse de formation de l'ozone par la première. C'est ce processus qui est observé au centre des villes, où le piégeage de l'ozone prédomine. En milieu pauvre en NOx, la seconde réaction est peu importante, et l'ozone se forme en plus grande quantité. C'est ce second processus que l'on observe sous le vent des agglomérations.

En été, on estime que les NOx sont pratiquement oxydés en acide nitrique en un temps assez court, de l'ordre de la journée. La situation pour les COV est plus complexe, car certains s'oxydent plus rapidement que d'autres. En outre, si les émissions de NOx sont essentiellement dues au transport, donc localisées dans les régions densément peuplées, les composés organiques sont aussi émis par la fermentation et la végétation, qui sont, elles, largement réparties dans l'espace. Globalement, la concentration des NOx décroît plus vite que celle des COV quand on s'éloigne des sources, et donc le rapport COV / NOx augmente. Il en résulte un passage progressif d'une situation où le piégeage de l'ozone l'emporte, à une situation où la production domine.

L'analyse du comportement de l'ozone dans la basse atmosphère conduit à distinguer 5 échelles d'espace :

- a) Le noyau urbain central. Il s'agit de la zone d'habitat et d'activité très dense. Les sources de précurseurs sont très intenses avec un rapport COV / NOx assez faible, ce qui induit une consommation nette d'ozone : c'est le piégeage qui prédomine. La concentration d'ozone y est donc peu importante, tandis que celle des polluants primaires COV et NOx est très importante.

- b) Le périmètre urbain. Cette zone est encore habitée, mais moins que le noyau urbain. Le trafic automobile y est intense, car il s'agit du mode de déplacement privilégié. C'est la première zone à être touchée par l'ozone formé dans le panache du noyau urbain central. Cependant, ce n'est généralement pas dans cette zone que s'observent les concentrations les plus élevées, car il existe encore un piégeage notable du fait de l'importance des émissions de NOx notamment.
- c) La région de transport mésoéchelle. C'est celle qui est directement affectée par l'ozone formé aux deux échelles précédentes. La densité d'habitat et d'activité est généralement faible, il s'agit généralement d'un tissu urbain lâche ou d'une zone rurale. Le rapport COV / NOx y est élevé du fait de l'oxydation rapide des NOx en nitrates, favorisant la formation de l'ozone au détriment de son piégeage. C'est dans cette région que les concentrations les plus élevées d'ozone sont observées, et le comportement de l'ozone y est majoritairement déterminé par l'influence des deux premières zones.
- d) La région de transport d'échelle synoptique. C'est la région des grands systèmes météorologiques susceptibles d'intervenir de façon déterminante sur la concentration d'ozone dans les basses couches : dépression, anticyclone.
- e) Le réservoir de fond constitué par le reste de l'atmosphère, au-delà des limites de l'échelle précédente.

### 1.2.2. Facteurs influençant le comportement de l'ozone à l'échelle locale

A l'échelle locale et régionale, la concentration d'ozone est gouvernée par trois contributions principales :

- a) La production photochimique à partir des émissions locales
- b) Le piégeage au sol et sur le couvert végétal
- c) Le transport depuis le réservoir troposphérique.

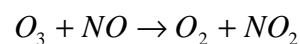
L'importance relative de ces contributions dépend de facteurs chimiques et physiques.

#### 1.2.2.1. Les facteurs chimiques

La seule voie significative de production d'ozone dans la troposphère est la photolyse de NO<sub>2</sub> en présence d'hydrocarbures (HC). Deux puits principaux sont à prendre en compte pour interpréter les variations temporelles de la concentration d'ozone à l'échelle locale et régionale : le piégeage chimique en phase gazeuse et le dépôt au sol et sur la végétation.

##### 1.2.2.1.1. Piégeage chimique

En milieu pollué, le piégeage chimique en phase gazeuse résulte d'abord de la réaction avec le NO :



Cette réaction de titration chimique module très fortement la concentration de NO et d'ozone au voisinage des sources intenses de NO. Elle explique que la concentration d'ozone près des sources en centre ville est toujours très basse, notamment dans les rues « canyon ». Les émissions d'oxydes d'azote par le trafic automobile étant essentiellement constituées de NO, cette réaction de titration est généralement la source majeure de NO<sub>2</sub>. Dans ces milieux riches en NO, le NO<sub>2</sub> représente en quelque sorte la trace de l'ozone qui y a été injecté.

##### 1.2.2.1.2. Dépôt sec

Le second puits, dominant en milieu rural, est le dépôt sec. Ces processus se déroulent en toutes circonstances et s'ajoutent, le cas échéant, au puits constitué par NO pour faire décroître la concentration d'ozone au niveau du sol pendant la nuit. La figure 6 représente le profil vertical d'ozone enregistré à travers le couvert végétal pour chaque heure de la journée, dans les Landes, dans une forêt de pins de 25 mètres de hauteur en moyenne (Lopez et al, 1988).

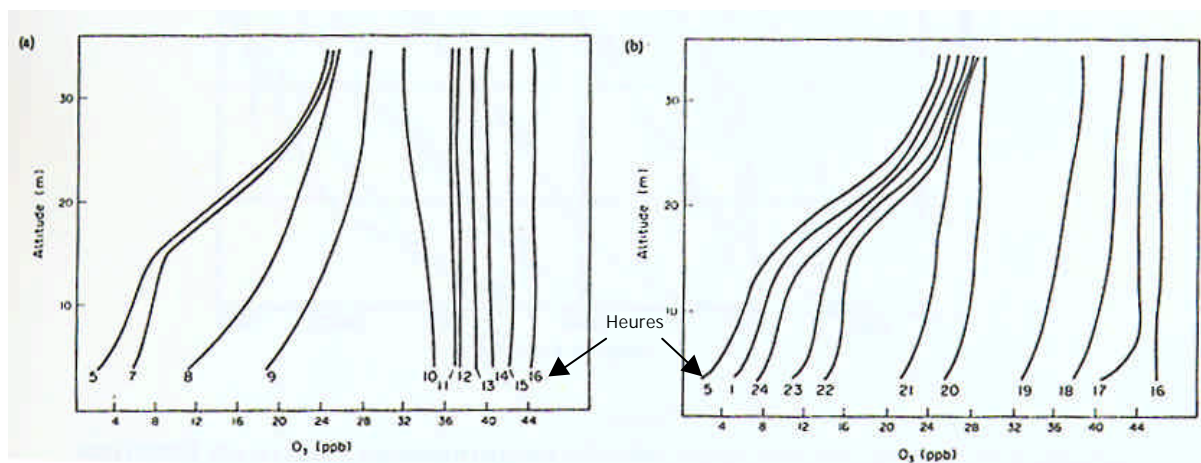


Fig 6 – Evolution diurne moyenne de la distribution verticale d'ozone observée dans la forêt des Landes (Septembre 1984)

Le jour, la concentration d'ozone est pratiquement constante avec l'altitude, conséquence de la forte convection verticale diurne qui homogénéise l'air des basses couches et de la couche de mélange. Les processus de dépôt sont masqués par un important apport d'ozone depuis l'atmosphère libre. En revanche, dans les conditions nocturnes très stables, l'atmosphère emprisonnée sous la canopée en début de nuit n'est le siège d'aucun échange avec l'atmosphère libre. La disparition d'ozone par dépôt sec sous le couvert forestier est rapide puisque la concentration dans les 15 premiers mètres passe de 25 ppb à 8 ppb en 4 heures. Un peu plus haut, entre 15 et 25 mètres, les échanges avec l'atmosphère sont plus importants, ce qui compense partiellement le dépôt. La concentration en ozone rejoint progressivement celle de l'atmosphère. En plaine, on observe souvent les mêmes phénomènes de dépôt sec, dès que l'atmosphère est stable, notamment en fin de nuit claire. Ces processus, alliés aux réactions de piégeage de l'ozone en phase gazeuse, expliquent la plupart des profils diurnes observés, caractérisés par leur forme en « cloche ».

#### 1.2.2.2. Les facteurs météorologiques

##### 1.2.2.2.1. Le rayonnement

L'intensité au sol du rayonnement solaire est essentiellement liée à l'angle du soleil avec la verticale du lieu, représenté par l'angle zénithal Z.

Le nombre de photons dans la bande de longueurs d'onde 290-300 nm, qui correspond à la source primaire des radicaux OH par la photolyse de l'ozone en  $O(^1D)$ , est très sensible à la hauteur du soleil sur l'horizon, puisqu'il présente une décroissance beaucoup plus rapide que le rayonnement solaire total quand Z augmente. Ceci explique la très faible activité photochimique hivernale et son accroissement dès l'arrivée du printemps. De même, cette variation explique que la contribution de la photolyse de l'ozone à la production des radicaux OH reste faible le matin.

##### 1.2.2.2.2. La température

Dans la plupart des études, la température apparaît comme une variable corrélée à la concentration d'ozone. Son influence résulte de l'addition de plusieurs effets. La relation de cause à effet est directe en ce qui concerne les émissions par la végétation (isoprène, terpènes) et les vitesses de réaction (Dodge, 1989). La température est également, indirectement, un indicateur de conditions ensoleillées et/ou anticycloniques, éventuellement de forte humidité absolue favorisant la formation des radicaux OH, toutes conditions favorables à de fortes concentrations d'ozone.

##### 1.2.2.2.3. La situation synoptique

C'est le facteur atmosphérique principal, responsable de l'apparition des épisodes de pollution photochimique aiguë, car il détermine la nature et l'intensité des processus de dispersion (voir § 1.4.2.2). La différence entre les situations anticycloniques et dépressionnaires, du point de vue des échanges entre la couche de mélange et le reste de la troposphère, se traduit par une dissymétrie de l'impact des sources sur leur environnement. Dans les régions européennes de climat océanique, les pointes de pollution s'observent rarement sous les vents dominants de secteur Ouest, car ils se rencontrent principalement dans des contextes dépressionnaires. Au contraire, les secteurs Ouest à Sud-Ouest sont sous le vent des sources dans des contextes de type anticyclonique. Ceci est particulièrement vérifié en Ile-de-France, où l'on n'observe qu'exceptionnellement des valeurs élevées d'ozone



dans les secteurs Nord à Sud-Est, alors que les secteurs Sud-Ouest à Ouest enregistrent régulièrement les concentrations d'ozone les plus élevées de la région (Toupance et al, 1986).

#### 1.2.2.2.4. Inversion de température et dynamique de la couche de mélange

Dans un très grand nombre de cas, le profil diurne « en cloche » de l'ozone peut s'interpréter exclusivement en terme de dynamique de la couche de mélange (voir figure 7a).

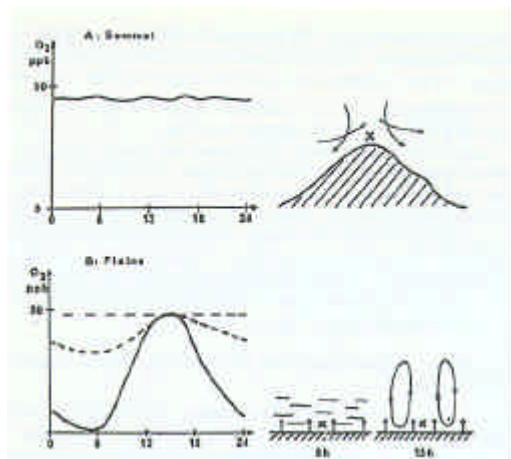


Fig 7a – Allure typique de la variation de la concentration d'ozone sur un sommet (A) et sur un site de plaine (B) (le profil en pointillés correspond à une situation de vent fort)

Sur un sommet, la convection orographique interdit la formation d'une couche stable au voisinage de la surface. La concentration d'ozone y varie donc peu au cours de la journée, et est représentative de la concentration d'ozone dans la couche intermédiaire ou dans l'atmosphère libre. En plaine en revanche, par vent faible, on observe systématiquement un profil en cloche qui doit être compris essentiellement comme une modulation en négatif du niveau de fond par les pièges d'ozone au sol. L'augmentation de la concentration au cours de la journée traduit le recyclage au sol du contenu de la couche intermédiaire, du fait de l'établissement de la convection diurne. L'existence d'un vent fort contribue à mélanger l'atmosphère et à empêcher la formation d'une inversion nocturne à faible altitude : le profil se rapproche de celui d'un sommet (pointillés), avec en cours de journée une concentration maximale voisine de la concentration moyenne d'ozone dans la région.

Dans d'autres cas, c'est la production photochimique locale qui est le facteur déterminant. Durant ces épisodes de pollution photochimique, la production d'ozone dans le panache des sources se superpose à ce comportement de base. La plupart des cas typiques de variation diurne des concentrations d'ozone dont représentés sur la figure 7b

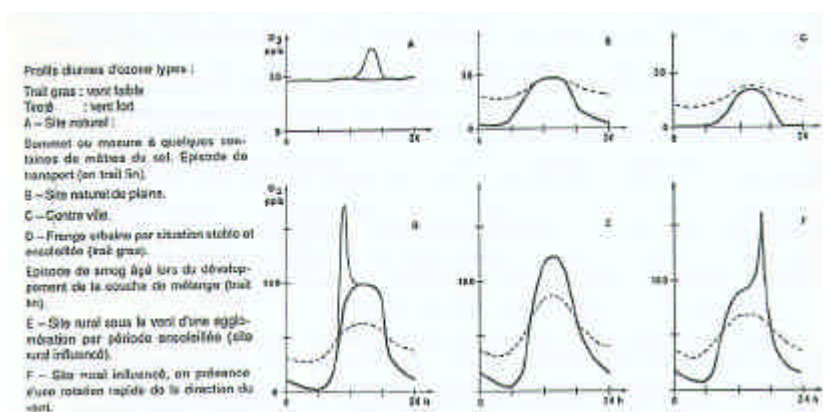


Fig 7b – Exemples de profils diurnes de la distribution verticale d'ozone correspondant à diverses situations typiques (Toupance, 1988)

### 1.2.3. Episodes de pollution

#### 1.2.3.1. Noyau urbain central

En milieu pollué, la production d'ozone est limitée par le « détournement » des radicaux OH vers la formation de l'acide nitrique. Le piégeage chimique de l'ozone en phase gazeuse est favorisé par la réaction d'oxydation de NO

en NO<sub>2</sub>. Les concentrations de l'ordre de une à quelques dizaines de ppb que l'on y rencontre de jour résultent pour une large part du transport depuis l'atmosphère libre par convection et advection. La nuit, les concentrations d'ozone sont généralement très faibles. Il en résulte un profil diurne en cloche marqué mais de faible amplitude absolue (voir figure 7b).

### 1.2.3.2. Périphérie urbaine

En banlieue, la densité d'habitat et d'activité tendant à décroître, les processus de piégeage par la réaction de titration NO / O<sub>3</sub> sont globalement moins intenses, et les concentrations d'ozone peuvent atteindre une centaine de ppb durant les épisodes de pollution photochimiques. Les plus importants sont observés en période anticyclonique : fort ensoleillement et température élevée qui favorisent tous deux la production d'ozone, inversion marquée de température à quelques centaines de mètres d'altitude qui limite la dispersion verticale.

### 1.2.3.3. Région de transport mésoéchelle

C'est à cette échelle que la pollution photochimique prend toute son importance. En Ile-de-France, le panache de l'agglomération parisienne a fait l'objet d'une étude approfondie (Toupance et al, 1986) qui a montré que les concentrations les plus élevées s'observent régulièrement dans le Sud-Ouest, avec des pointes pouvant dépasser 150 ppb dans la région de Rambouillet. La figure 8 représente un exemple de profil d'ozone le long d'une direction Nord-Est / Sud-Ouest lors d'un épisode. On observe clairement que l'agglomération se comporte comme un puits et que l'ozone se forme sous le vent au cours du déplacement du panache. On note que les épisodes d'ozone peuvent se produire très tard en saison, au-delà de l'équinoxe dans cet exemple. C'est essentiellement dans le secteur Sud à Ouest de la région que se rencontrent les épisodes de pollution photochimique les plus marqués. A ensoleillement équivalent, très peu d'épisodes sont enregistrés sous le vent de l'agglomération de l'Est au Nord.

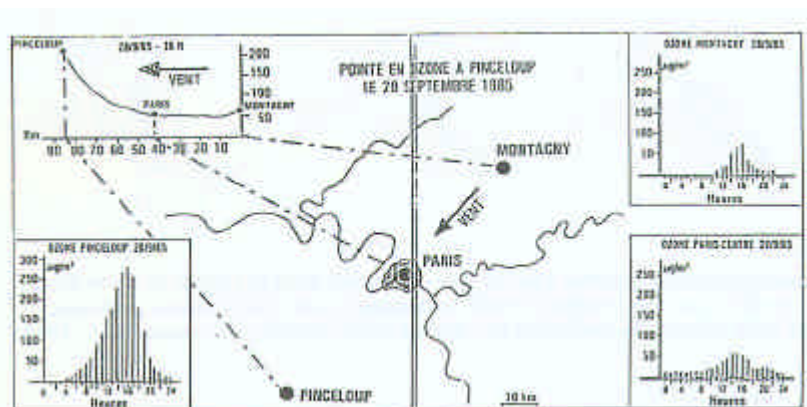


Fig 8 – Concentrations d'ozone à la surface (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 50 \text{ ppbv}$ ) observées lors d'un épisode de pollution photochimique en région parisienne (coupe Nord-Est / Sud-Ouest), le 28 septembre 1985 (d'après Toupance et al., 1986)

Lorsqu'une situation anticyclonique stable s'installe sur l'Europe, les effets régionaux de chacune des régions urbaines s'accroissent pour donner naissance à un épisode photochimique de large extension spatiale, dans lequel la basse atmosphère continentale se trouve considérablement enrichie en ozone.

Toutes les grandes agglomérations du monde sont aujourd'hui concernées par la pollution photochimique, aussi bien dans les pays développés que ceux en développement.

## 1.3 Effets de l'augmentation des concentrations d'ozone sur l'effet de serre additionnel et sur la transmission du rayonnement ultraviolet solaire

Par ses propriétés spectrales d'absorption du rayonnement électromagnétique, l'ozone joue dans l'atmosphère terrestre un rôle double. Principal absorbant du rayonnement solaire dans le domaine de longueurs d'onde compris entre 240 nm et 320 nm, il filtre le rayonnement ultraviolet (UV-B et UV-C), protégeant ainsi la vie animale et végétale à la surface de la Terre d'un rayonnement nocif. L'existence d'une bande de vibration-rotation dans le domaine des longueurs d'onde infrarouge, autour de 9,6  $\mu\text{m}$ , fait également de l'ozone un gaz à effet de serre, susceptible de bloquer une partie du rayonnement tellurique et de le renvoyer vers le sol. Une augmentation des concentrations d'ozone dans la troposphère peut donc avoir deux conséquences principales en termes de rayonnement :

- a) Une augmentation du piégeage du rayonnement infrarouge dans la troposphère, et donc une contribution positive à l'effet de serre additionnel.
- b) Une augmentation de l'absorption du rayonnement ultraviolet dans la basse atmosphère et donc une possibilité de compensation de l'accroissement de ce rayonnement lié à la diminution de la couche d'ozone stratosphérique.

Une des particularités de l'ozone troposphérique est de présenter, à l'inverse de l'ozone stratosphérique, une tendance à l'augmentation.

#### 1.4. Effets de l'augmentation des concentrations d'ozone sur la végétation

Les principales manifestations des effets toxiques de l'ozone sur la végétation se traduisent par l'apparition de très petites taches nécrotiques sur la face supérieure des feuilles. Ces symptômes apparaissent chez les plantes sensibles après une exposition de quelques heures à des concentrations égales ou supérieures à 40 ppb. L'action de l'ozone sur la photosynthèse est variable d'une espèce à l'autre. Lors d'expositions de faible durée, le taux d'activité photosynthétique est réduit, mais le phénomène est réversible : quelques heures après l'exposition, la plante recouvre son taux d'activité initial. Par contre, les expositions chroniques à de faibles concentrations réduisent la photosynthèse nette de façon cumulative. L'absorption des constituants gazeux de l'atmosphère par les végétaux (O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>...) dépend également des facteurs climatiques : vitesse du vent, lumière, température, humidité relative.

#### 1.5. Effets de l'augmentation des concentrations d'ozone sur la santé

Les études épidémiologiques, conduites notamment sur la côte Ouest des Etats-Unis, ont montré que les pics de pollution d'ozone entraînaient une irritation des yeux et des voies aériennes supérieures, provoquant la toux, des maux de tête et un certain nombre de perturbations de la fonction respiratoire chez les enfants en particulier, et chez les asthmatiques. Les effets de l'exposition à l'ozone sur la santé résultent, pour une grande part, de réactions avec les constituants biochimiques des organismes. Ces réactions sont dues surtout au caractère très oxydant de l'ozone.

Des études in vitro ou de groupes de témoins à court terme ont mis en évidence chez certains sujets des réactions telles que toux, douleurs thoraciques, céphalées, diminution de la capacité pulmonaire, irritations au niveau des organes sensoriels (œil, muqueuse nasale).

## 2 - PHOTOCHEMIE EN REGION ILE-DE-FRANCE

En Ile-de-France, les conditions nécessaires à la formation photochimique d'ozone sont souvent observées en période anticyclonique avec un vent de secteur Nord à Est, lorsque la masse d'air a traversé des zones continentales (air peu humide) pendant plusieurs jours. Ce trajet sur le Nord de l'Europe et de la France lui fait par ailleurs franchir d'importantes zones urbanisées, ce qui peut induire en entrée de l'Ile-de-France un niveau de fond déjà non négligeable. Les rétrotrajectoires des masses d'air, par exemple du 4 septembre 1999 (Annexe 1, carte 1) ou du 25 mai 2001 (Annexe 2, carte 3) illustrent un exemple de ce phénomène.

### 2.1. Episodes estivaux de pollution photochimique : la zone rurale Sud-Ouest de l'Ile-de-France la plus touchée

Chaque été, lorsque les conditions météorologiques sont favorables à la formation de l'ozone, la fréquence de dépassement des seuils réglementaires en ozone (normes françaises de qualité de l'air) est plus élevée en zone rurale Sud-Ouest que partout ailleurs dans la région. Cette observation vaut tant pour les dépassements du seuil d'information ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne horaire) que des seuils de protection de la santé ( $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur 8 heures) et de protection de la végétation ( $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne journalière). Le tableau 1 ci-dessous fournit la liste des stations rurales et leurs dates d'ouverture.

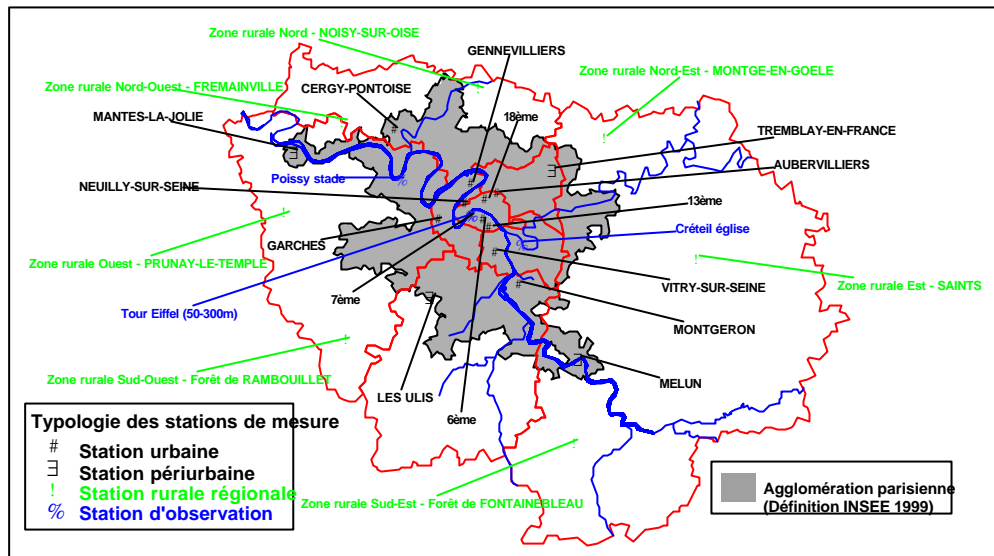
**Tableau 1**

Nom de la station	Date d'ouverture
Zone rurale Sud-Ouest – Forêt de Rambouillet	05/09/1991
Forêt de Fontainebleau – Desquinemare *	18/10/1991
Zone rurale Nord-Est – Montgé-en-Goële	15/05/1993
Zone rurale Nord-Ouest – Frémainville	26/02/1998
Zone rurale Ouest – Prunay-le-Temple	01/10/1998
Zone rurale Est – Saints	06/01/1999
Zone rurale Sud-Est – Forêt de Fontainebleau	14/06/1999
Zone rurale Nord – Noisy-sur-Oise	09/05/2000

\* : Fermeture définitive de la station le 23/07/98

La zone rurale Sud-Ouest dispose d'une station de surveillance de l'ozone depuis 1991, au Sud du massif forestier de Rambouillet, sur la commune de Sonchamp. Depuis la fin de l'année 1998, une station a été installée à l'Ouest de la région, sur la commune de Prunay-le-Temple. Le réseau de surveillance en milieu rural sera complété dans le courant de l'été 2001 par une station dans la zone rurale Sud, sur la commune de Bois-Herpin à 8,5 kilomètres au Sud-Est d'Etampes.

La carte ci-dessous représente les emplacements des stations du réseau AIRPARIF mesurant l'ozone au 5 janvier 2001. Les stations rurales régionales apparaissent en vert.



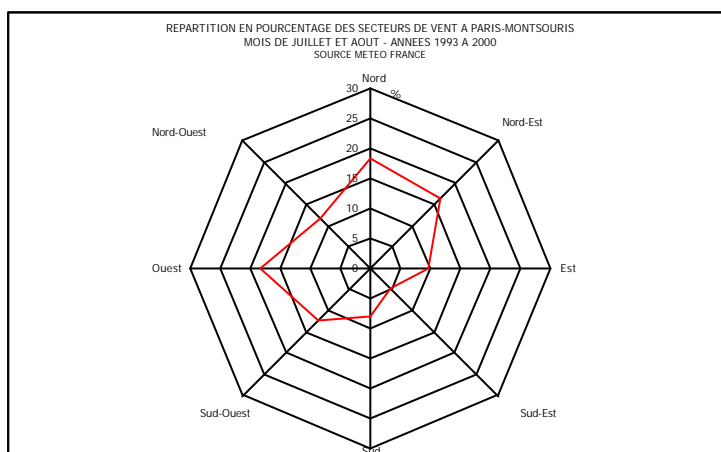
Les observations de dépassements plus fréquents sur le secteur Sud-Ouest sont systématiques depuis la mise en place du capteur en 1991. Le trop court historique de mesure (zone rurale Ouest) ou son absence (zone rurale Sud) ne permettent pas de dire si elles se placent dans une situation comparable à celle du Sud-Ouest. Les observations des prochains étés permettront sans doute d'apporter une réponse à cette question.

Mises à part ces ouvertures prévues, trois autres stations mesurent l'ozone en zone rurale depuis plusieurs années. Ces stations, situées du Nord-Ouest au Sud-Est de la région, indiquent une situation moins exposée, quels que soient les étés considérés.

## [2.2. Les paramètres qui défavorisent le Sud-Ouest de la région dans les épisodes estivaux d'ozone](#)

Au moins deux paramètres jouent un rôle important dans l'observation de niveaux d'ozone plus élevés dans le Sud-Ouest de la région.

Tout d'abord les conditions propices à la photochimie d'été s'observent souvent par régime de vent continental, de secteur Nord à Est. Ces conditions placent alors le Sud-Ouest sous le vent de l'agglomération parisienne. Les régimes de vent de Nord-Est sont souvent durables en été, ils permettent donc une augmentation régulière des concentrations maximales d'ozone d'un jour à l'autre. La rose de vent ci-après représente les secteurs de vent observés à la station Météo-France de Paris-Montsouris, sur les mois de juillet et août, de 1993 à 2000. Elle montre que pendant ces 2 mois d'été, les vents de secteur Nord, Nord-Est et Est ont représenté 45% des cas (17% pour les vents de secteur Nord-Est). Lorsque le vent de Nord-Est persiste plusieurs jours, l'import continental d'ozone progresse de jour en jour, souvent avec une élévation régulière de la température. Les masses d'air provenant des grandes conurbations du Bénélux ou de l'Allemagne sont déjà chargées en précurseurs et en ozone avant même d'arriver sur l'Ile-de-France. A ce titre, les stations au vent de l'agglomération ces jours là (ex : Montgé-en-Goële) renseignent précisément sur la concentration amont, avant toute production locale. Les données issues d'autres réseaux de surveillance, notamment en Picardie, peuvent être d'une aide précieuse lors de telles situations.



Ensuite, l'agglomération est peu développée dans le Sud-Ouest de la région, comparativement par exemple au Sud et au Sud-Est. Rapidement les masses d'air sortent de la zone agglomérée où les émissions de précurseurs s'amointrissent, ce qui diminue parallèlement la titration chimique et a pour effet d'accroître les concentrations d'ozone. La station de Sonchamp est, a priori, idéalement placée puisque suffisamment éloignée du bord de l'agglomération. La distance de 40 kilomètres qui la sépare de Paris, conduit à un temps de transport de l'ordre de la demi-journée par vent inférieur à 2 m/s, échelle de temps adaptée à la formation de l'ozone sous le panache de l'agglomération.

Un épisode de ce type, le 4 septembre 1999, est illustré en annexe 1, sur les graphiques 1 à 5 et la carte d'interpolation n° 2.

Le tableau 2 ci-dessous recense le nombre de jours où les seuils d'information et de protection de la santé ont été atteints ou dépassés pour les stations rurales du réseau AIRPARIF sur tout leur historique de mesure.

**Tableau 2 [7]**

**Nombre de jours où les seuils d'information et de protection de la santé ont été atteints ou dépassés pour les stations rurales du réseau AIRPARIF**

Seuil d'information : 180 µg/m<sup>3</sup> en moyenne sur 1 heure

Seuil de protection de la santé (objectif de qualité) : 110 µg/m<sup>3</sup> en moyenne sur 8 heures

Station	Année	2000	1999	1998	1997	1996	1995	1994	1993	1992
Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Rambouillet	Seuil d'information	0	8	4	7	4	18	8	4	14
	Seuil de protection de la santé	27	65	41	44	51	52	41	37	64
Zone rurale Ouest - Prunay-le-Temple	Seuil d'information	0	3							
	Seuil de protection de la santé	20	29							
Zone rurale Nord-Ouest - Frémenville	Seuil d'information	1	6	2						
	Seuil de protection de la santé	19	34	10						
Zone rurale Nord-Est - Montgé-en-Goële	Seuil d'information	0	1	2	2	0	3	3		
	Seuil de protection de la santé	24	33	24	17	15	27	20		
Zone rurale Est - Saints	Seuil d'information	0	0							
	Seuil de protection de la santé	25	32							
Zone rurale Sud-Est - Forêt de Fontainebleau *	Seuil d'information	1	1		3	1	0	0	0	1
	Seuil de protection de la santé	25	33		33	31	26	0	6	20

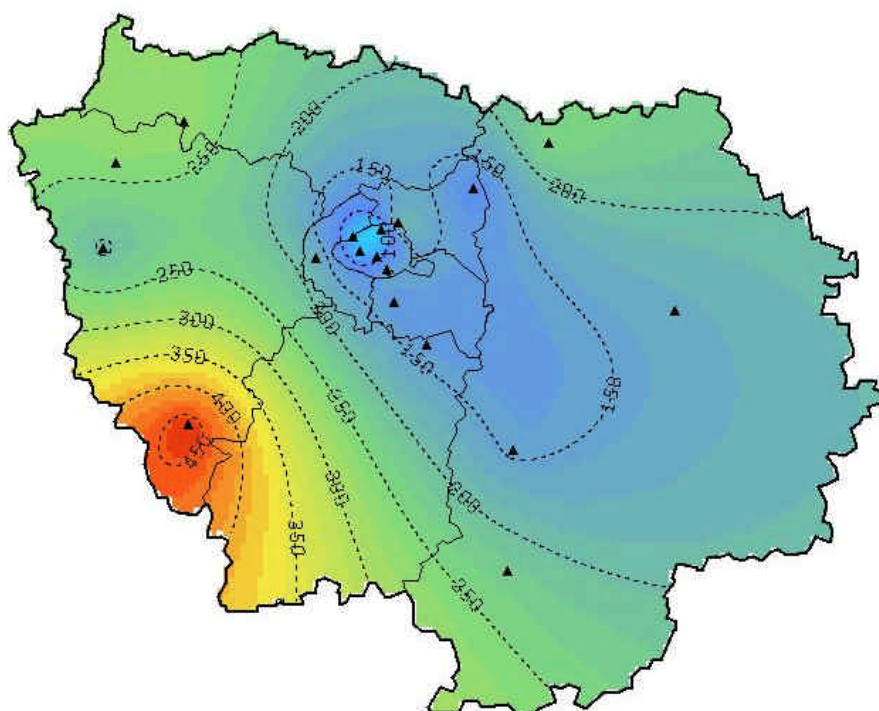
\* : usine des eaux Desquinemare de 1992 à 1997 ; Maison forestière du Clos du Roi en 1999 (mesures non représentatives en 1998)

En grisé : station inexistante ou donnée non représentative

La carte 1 ci-après illustre la répartition spatiale du nombre d'heures de dépassement du seuil de 110 µg/m<sup>3</sup> sur 8 heures (seuil de protection de la santé). Cette carte d'interpolation est réalisée à partir des mesures d'ozone de toutes les stations de fond de l'Ile-de-France en 1999 [3]. Elle montre clairement une zone particulièrement touchée dans tout le grand Sud-Ouest de la région.

## Carte 1

### Répartition spatiale du nombre d'heures de dépassement du seuil de $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d'ozone sur 8 h en 1999



De nombreux épisodes de pollution photochimique ont pu être observés sur les stations du réseau AIRPARIF en zone rurale. Compte tenu des conditions météorologiques précédemment énoncées, ces épisodes ont le plus souvent été observés par vent de secteur Nord-Est sur la zone rurale Sud-Ouest. L'annexe 1 retrace un épisode typique de pollution par l'ozone en période estivale, traduit par des concentrations particulièrement élevées sur la station de Sonchamp, le 4 septembre 1999.

### 2.3. Le capteur de Sonchamp est-il placé à l'épicentre du phénomène ou traduit-il une situation générale qui concerne tout le Sud-Ouest de la zone rurale francilienne ?

Quelle représentativité accorde-t-on au capteur de Sonchamp ? La hauteur de prélèvement (18 mètres) permet-elle de mesurer des concentrations représentatives du niveau sol ?

La ville de Rambouillet est-elle également concernée par ce phénomène ? Les émissions locales d'oxydes d'azote contribuent-elles à réduire les concentrations d'ozone, ou le phénomène très général s'étend-il également aux zones urbaines isolées de faible superficie ou d'émissions faibles ?

Pour d'autres polluants ( $\text{NO}_2$ , particules  $\text{PM}_{10}$ ), que peut-on dire ?

Pour répondre à ces questions, des campagnes de mesure ont été organisées en équipant entre autres d'analyseurs d'ozone d'autres points du Sud-Ouest de la région, au cours de l'été 2000.

## 3 - CAMPAGNE DE MESURE DE L'ETE 2000

---

### 3.1. Objectifs de l'étude

AIRPARIF a réalisé en juillet et août 2000 une campagne de mesure dans le secteur de Rambouillet. L'objectif de l'étude était notamment de caractériser la distribution spatiale des concentrations d'ozone dans l'ensemble du secteur rural Sud-Ouest de la région, allant de l'Ouest du département des Yvelines au Sud-Ouest du département de l'Essonne.

A cet effet, deux types de mesures ont été réalisés :

**Mesures automatiques** toutes les heures au moyen des deux camions laboratoires d'AIRPARIF et d'un parc d'analyseurs complémentaires,

**Mesures par tubes à diffusion passive** répartis sur l'ensemble du périmètre retenu, permettant de disposer de concentrations moyennes hebdomadaires. La simplicité de l'installation et son coût moindre par rapport aux mesures par camion laboratoire ont permis la mise en œuvre d'un nombre de sites plus important, de l'ordre d'une dizaine.

### 3.2. Périmètre d'étude et répartition des moyens métrologiques

Le périmètre d'étude a été centré sur le secteur de Rambouillet-Sonchamp.

. Le centre-ville même de la ville de Rambouillet a été équipé d'un camion laboratoire. Celui-ci a été stationné dans la cour d'un bâtiment public du centre-ville, dans une situation de fond éloignée des axes de circulation et des lieux de stationnement de véhicules.

. La station de mesure de Sonchamp (château de Pinceloup) a servi de référence. Placé au sommet du château dans le clocheton central, le prélèvement est effectué à environ 18 mètres du sol.

. Afin de valider finement l'aire de représentativité du site actuel et d'identifier la potentielle influence de la hauteur de prélèvement sur les concentrations relevées, un autre site de mesure automatique a été implanté au voisinage immédiat du château, dans une dépendance située à 250 mètres au Nord du site AIRPARIF. Ce site automatique a été instrumenté d'analyseurs installés dans un local mis à la disposition d'AIRPARIF, avec un prélèvement proche du sol, à une hauteur de 4 mètres.

. Afin de suivre précisément le phénomène de panache de l'agglomération par vent de secteur Nord-Est, en complément de la station de mesure périurbaine des Ulis, placée en limite Sud-Ouest de l'agglomération, le deuxième camion laboratoire a été installé sur un site intermédiaire entre Sonchamp et les Ulis, sur la commune de Bullion. Le site de mesure devrait notamment permettre de savoir dans quelle mesure la masse d'air se charge progressivement en ozone à mesure qu'elle quitte la zone agglomérée. Placé en amont du massif forestier, il permettra également de répondre à une question souvent posée : peut-on considérer que le massif forestier participe aux concentrations élevées rencontrées à Sonchamp, par ses potentielles émissions naturelles de COV précurseurs ?

. Enfin, un périmètre d'environ 25 kilomètres autour de Rambouillet a également été étudié par des mesures par tubes passifs. Dans ce périmètre, une dizaine de sites ont été retenus. Deux axes ont été privilégiés : Nord-Est/Sud-Ouest (direction du panache photochimique en provenance de l'agglomération) et Nord-Ouest/Sud-Est. Ce second axe est grossièrement situé entre les stations rurales régionales de Prunay-le-Temple à l'Ouest et de la future station de Bois-Herpin au Sud de la région. Dans ces deux zones, des tubes à diffusion ont été implantés comme référence de limite de périmètre. Des tubes ont également été installés sur les installations automatiques de Rambouillet centre ville et Sonchamp-Pinceloup.

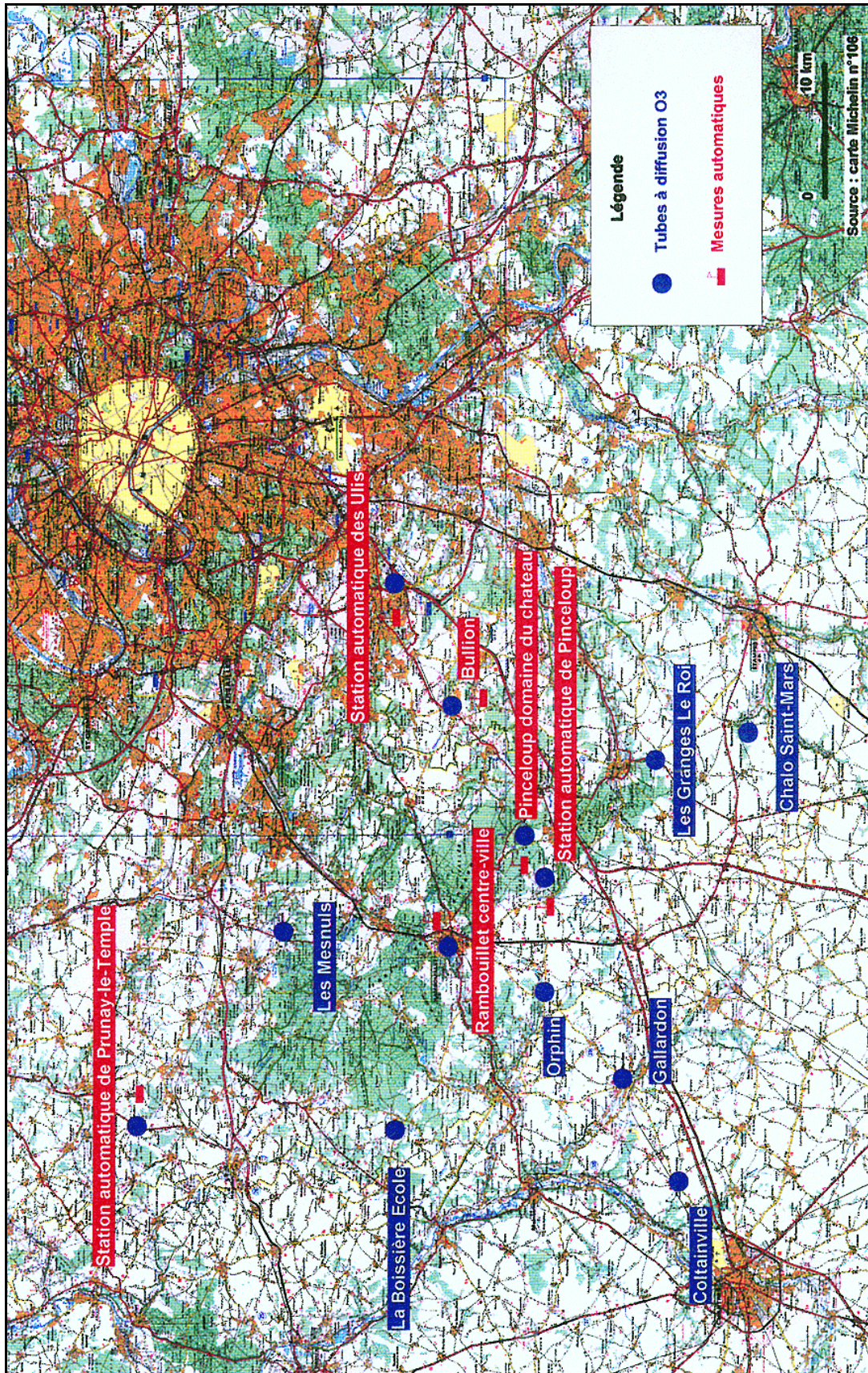
Deux sites ont été installés en zone rurale entre Etampes et Dourdan (les Granges-le-Roi et Chalo-Saint-Mars (91), enfin un site entre Rambouillet et Houdan au Nord-Est du massif forestier de Rambouillet (Les Mesnuls (78)).

Selon l'axe Nord-Est/Sud-Ouest, le point de référence Nord-Est est la station de mesure des Ulis. Le site automatique de Bullion a été équipé de tubes, ainsi que la commune d'Orphin, en limite Sud-Ouest de la région. En complément de ce dispositif, un tube a été installé en limite Ouest du périmètre d'étude, sur la commune de la Boissière-Ecole.



En collaboration avec le réseau de mesure LIG'AIR, deux sites ont été instrumentés en région Centre en Eure-et-Loir, à Gallardon et à Coltainville. La carte 2 ci-après indique le positionnement des différents sites de mesure.

Carte 2



Ces différentes communes définies, un emplacement plus précis a été préalablement recherché sur carte, en essayant dans la mesure du possible de repérer des emplacements dégagés et en plateau, ce qui n'a pas toujours été possible pour certaines communes.

Outre les analyseurs de gaz, les deux camions laboratoires sont équipés chacun d'un analyseur de particules PM10. L'installation des deux véhicules à Rambouillet et à Bullion a donc été l'occasion de réaliser des mesures de PM10 en dehors de l'agglomération parisienne, et notamment en zone rurale (Bullion). Ces mesures apporteront des éléments d'appréciation du comportement encore peu connu de la pollution particulaire en zone rurale.

### 3.3. Période de mesures

La période de mesures a été choisie en été, où sont le plus souvent observées les conditions météorologiques les plus favorables à la formation de l'ozone : fort ensoleillement, températures élevées, régimes de vent faible et continental (secteur Nord-Est) peu chargés en humidité.

Les mesures automatiques ont été réalisées du 8 juillet au 3 septembre 2000, sauf pour le site de Bullion où les mesures ont pris fin le 16 août pour des raisons de disponibilité du matériel.

Les mesures par tubes ont eu lieu pendant 9 semaines, du 3 juillet au 4 septembre 2000.

### 3.4. Caractéristiques des sites

#### - Stations automatiques du réseau AIRPARIF

Nom du site	Typologie	Orientation par rapport à l'agglomération	Distance au centre de l'agglomération	Hauteur de prélèvement par rapport au sol	Polluants mesurés
<b>Zone rurale Sud-Ouest – Forêt de Rambouillet</b>	Rurale régionale	Sud-Ouest	45 km	18 m	O <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub>
<b>Zone rurale Ouest - Prunay-le-Temple</b>	Rurale régionale	Ouest	48 km	4 m	O <sub>3</sub> + NO, NO <sub>2</sub> pour la durée des mesures
<b>Les Ulis</b>	Périurbaine	Sud-Ouest	22 km	5,5 m	O <sub>3</sub>

- Station rurale régionale du secteur Sud-Ouest (forêt de Rambouillet) : la station est située au dernier étage du château de Pinceloup (école d'horticulture Le Nôtre). La tête de prélèvement émerge dans le clocheton du château, à une hauteur de 18 mètres du sol.



- Station rurale régionale du secteur Ouest (Prunay-le-Temple) : la station se trouve sur un plateau près d'un champ, à l'orée d'un bois.



- Station périurbaine des Ulis : cette station est située à mi-parcours entre le centre de l'agglomération et la station rurale du secteur Sud-Ouest (forêt de Rambouillet). Elle est implantée à l'entrée d'un groupe scolaire, la hauteur de prélèvement est de 4,5 mètres.



- Stations automatiques temporaires

Nom du site	Typologie	Orientation par rapport à l'agglomération	Distance au centre de l'agglomération	Hauteur de prélèvement	Polluants mesurés
<b>Domaine de Pinceloup</b>	Rurale régionale	Sud-Ouest	45 km	4 m	O <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub>
<b>Bullion</b>	Rurale régionale	Sud-Ouest	36 km	3,5 m	O <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , PM10
<b>Rambouillet centre ville</b>	Périurbaine	Sud-Ouest	43 km	4 m	O <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , PM10

- Domaine de Pinceloup : des analyseurs ont été installés dans un local de l'espace scolaire, mis à disposition par l'école Le Nôtre. Il se trouve à 250 mètres au Nord de la station automatique du réseau (rurale régionale Sud-Ouest - forêt de Rambouillet). Le prélèvement a été réalisé le plus près possible de la hauteur minimale recommandée pour une station de fond (de 2 à 15 m). Des contraintes techniques d'implantation ont conduit à réaliser le prélèvement à 4 mètres du sol, ce qui représente une hauteur de prélèvement classiquement utilisée sur des stations de fond.



- Bullion : un camion laboratoire a été installé en bordure des courts de tennis communaux, dans une clairière de la vallée de Chevreuse. L'environnement (clairière) et la topographie du site (vallée) lui confèrent une position relativement encaissée. L'environnement du site est largement boisé.



- Centre-ville de Rambouillet : un camion laboratoire a été installé sur le parking de l'Inspection Académique, 7 avenue Foch. Exceptionnellement pour la durée des mesures, et en raison de la période des congés d'été, le parking a pu être fermé au stationnement pour éviter de perturber les mesures.



- **Sites équipés de tubes à diffusion**

D'une manière générale, les tubes ont été installés sur des supports existants tels que poteaux téléphoniques ou électriques, dans un environnement dégagé, répondant aux critères d'un site à typologie rurale régionale (commune de type rural au sens de l'INSEE, densité de population faible, dégagement suffisant par rapport aux obstacles, éloignement des axes routiers). Ils ont été installés à des hauteurs comprises entre 3 et 3,5 mètres.

Emplacements retenus :

- Les Granges-le-Roj : terrain de boules près du stade, à la sortie du village, sur le plateau.



- Chalo Saint-Mars : chemin de terre près d'un champ, à l'extérieur du village, en plateau.



- Les Mesnuls : chemin de terre près d'un champ à l'extérieur du village, à mi-hauteur de coteau.



- Orphin : piquet d'angle du court de tennis communal, à la sortie du village, à quelques dizaines de mètres de l'orée d'un petit bois, en plateau.





- La Boissière-Ecole : stade à l'extérieur du village, dans une zone arborée, à mi-hauteur de coteau.



Les deux sites suivants (photos non disponibles) sont en région Centre, dans le département de l'Eure-et-Loir.

- Gallardon : site rural à 17 kilomètres au Nord-Est du centre de Chartres et à 17 kilomètres au Sud-Ouest de Rambouillet. Les tubes ont été implantés sur un poteau à la sortie du village, donnant sur un champ, à 10 mètres des dernières habitations.
- Coltainville : site rural à 9 kilomètres au Nord-Est du centre de Chartres et à 25 kilomètres au Sud-Ouest de Rambouillet. Les tubes ont été implantés sur un poteau au milieu d'un champ, à 100 mètres des premières habitations.

## 4 - RESULTATS DES MESURES AUTOMATIQUES

---

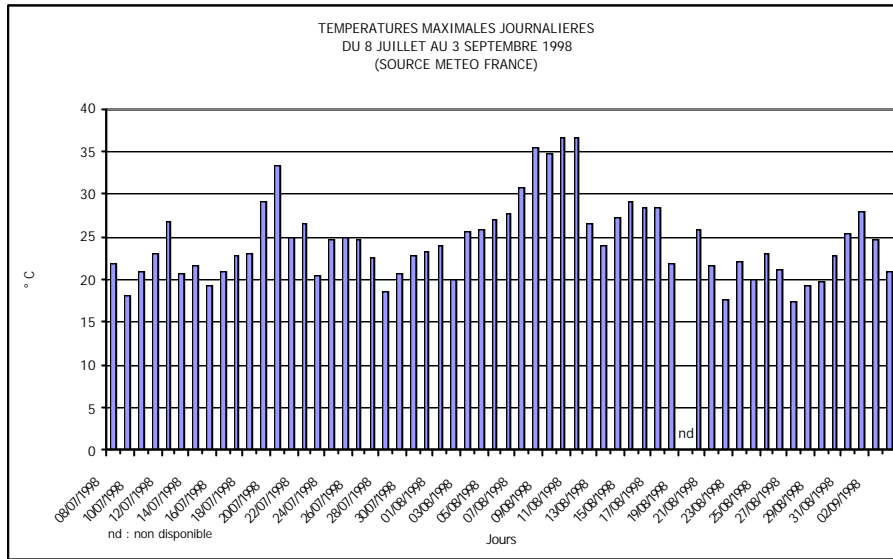
### 4.1 – Conditions météorologiques

L'été 2000 a été particulièrement maussade, avec une nébulosité importante, des pluies nombreuses et un faible ensoleillement pour la saison. Sur la période du 8 juillet au 3 septembre, la température maximale a été de 31,7 °C le 25 août à 14 heures, par vent de secteur Est, et la température moyenne de 19,1 °C.

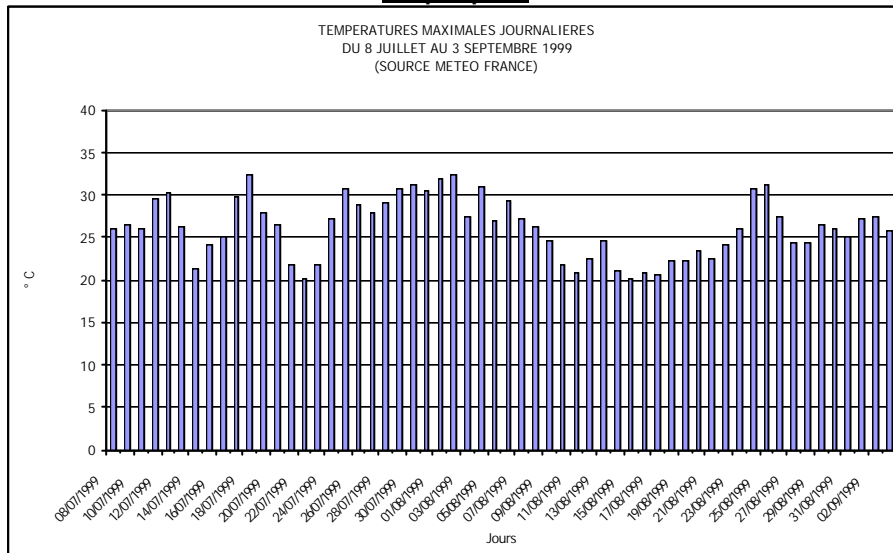
A titre de comparaison, sur la même période de référence en 1999 et 1998, la température maximale a été respectivement de 32,5 °C et 36,7 °C, et la température moyenne de 21,1 °C et 19,7 °C. Les graphiques 1 à 3 représentent les températures maximales journalières des trois derniers étés. Les graphiques 4 à 6 représentent la répartition des températures maximales par tranches de 5 °C, sur la période de référence du 8 juillet au 3 septembre des années 1998 à 2000. Ils montrent que la température maximale journalière de l'été 2000 était le plus souvent comprise entre 20 et 24 °C, ce qui est insuffisant pour activer une photochimie importante. L'été 1999 a été celui où ont été observées les plus nombreuses journées avec une température maximale supérieure à 25 °C, toutefois, le maximum absolu de ces trois derniers étés a été observé en 1998.

Les conditions météorologiques de l'été 2000 n'ont donc dans l'ensemble pas été favorables à l'activation de réactions photochimiques, essentiellement par défaut d'ensoleillement et de fortes températures. Par ailleurs, cet été a bénéficié de peu de régimes de Nord-Est et de périodes fortement anticycloniques, ce qui n'a pas occasionné d'importants niveaux d'ozone par photochimie dans le secteur Sud-Ouest de la région. Sur la période de référence, la fréquence de vents de secteur Nord-Est a été de 13% en 2000, pour 26% en 1999, et 9% en 1998. Les roses de vent par secteurs de 45° représentées sur les graphiques 7 à 9 illustrent la répartition des secteurs de vent au cours de la période de référence pour ces trois dernières années.

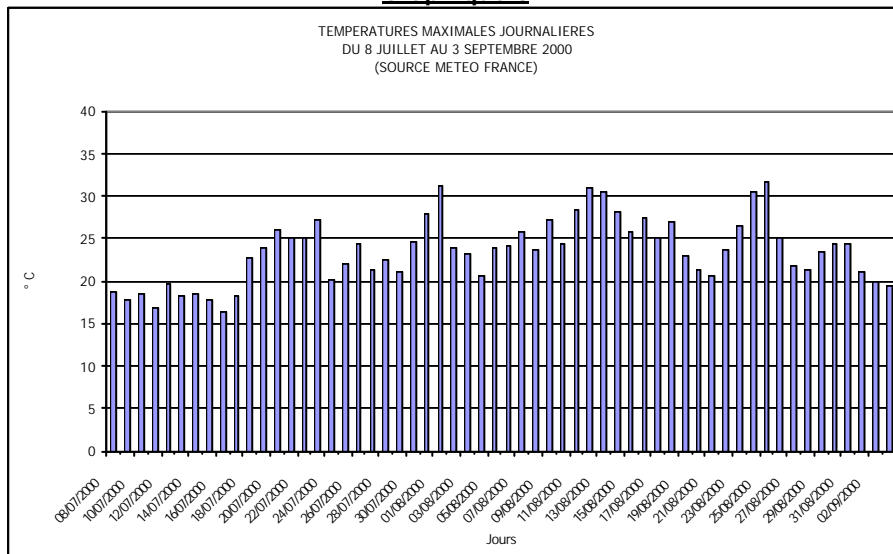
**Graphique 1**



**Graphique 2**

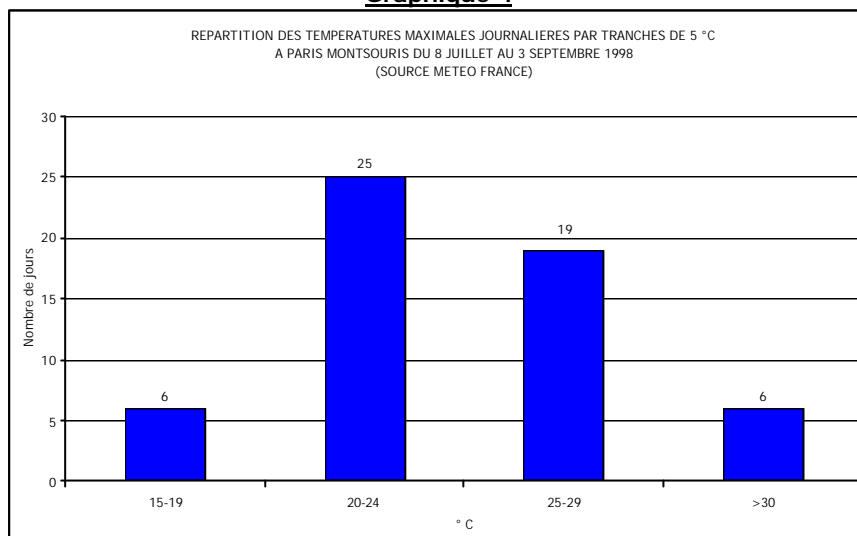


**Graphique 3**

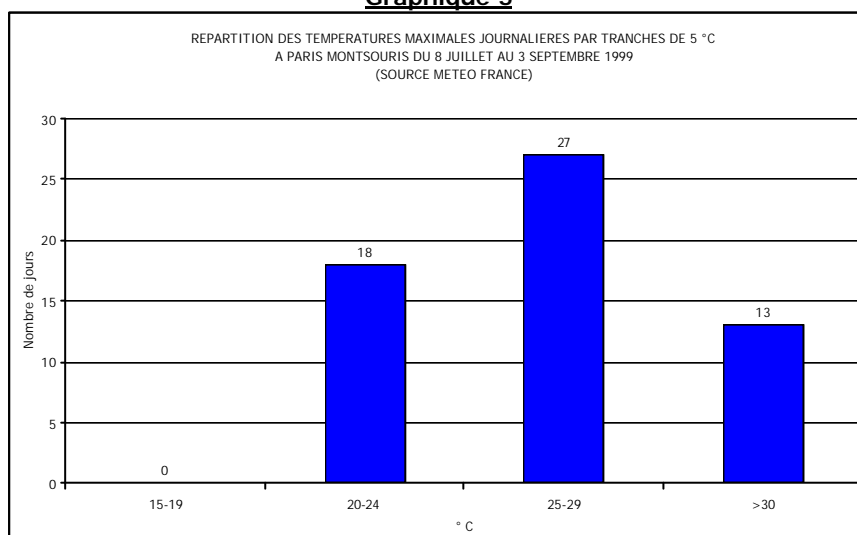


N.B. : Dans les graphiques de répartition ci-dessous, les températures ont été arrondies à l'entier plus proche.

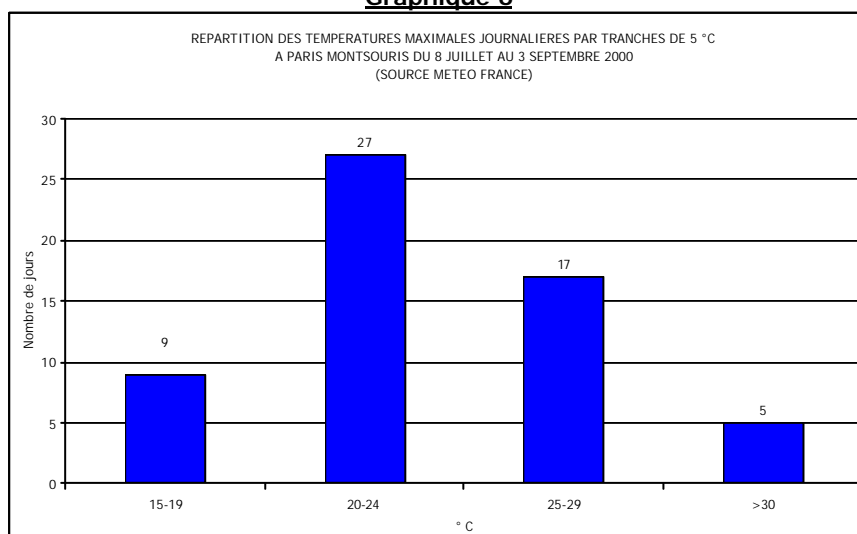
**Graphique 4**



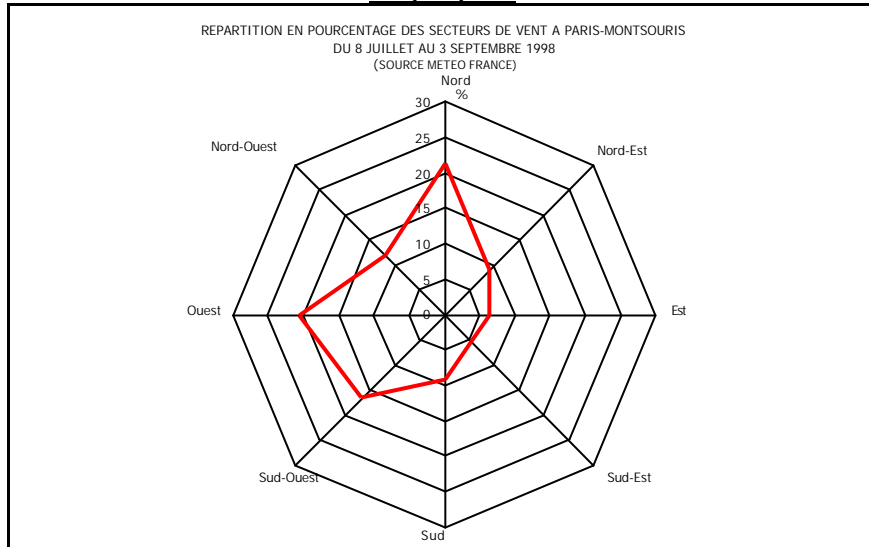
**Graphique 5**



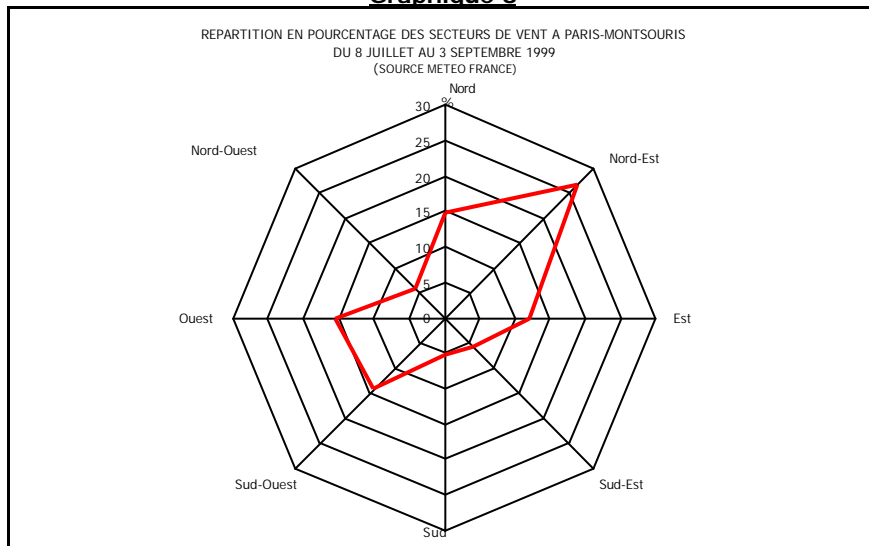
**Graphique 6**



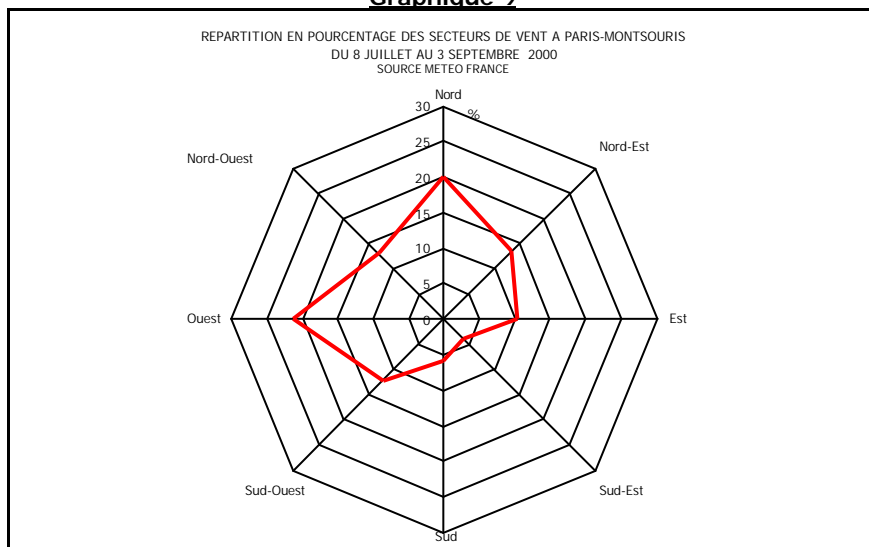
**Graphique 7**



**Graphique 8**



**Graphique 9**



## 4.2 – Normes de qualité de l'air

Les normes françaises de qualité de l'air concernant l'ozone sont les suivantes [4] [5] :

- Seuil d'information : 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne horaire
- Seuil d'alerte : 360  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne horaire
- Seuil de protection de la santé (objectif de qualité) : 110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne 8 heures
- Seuils de protection de la végétation (objectifs de qualité) : 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne horaire et 65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne journalière.

Deux déclenchements de la procédure d'information et d'alerte définie par l'arrêté interpréfectoral du 24 juin 1999 [6] ont eu lieu au cours de l'été 2000 :

- le premier le 20 juillet en zone hors agglomération Sud et Ouest, le seuil d'information (180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ayant été dépassé par la station rurale régionale de la forêt de Fontainebleau,
- le second le 12 août en agglomération parisienne et en zone hors agglomération Nord et Est, le niveau d'information ayant été dépassé en zone hors agglomération par la station rurale régionale de Frémainville.

Au cours de l'été, deux stations rurales régionales et huit stations de l'agglomération ont dépassé le seuil d'information. Ces dépassements n'ont concerné qu'une journée pour chaque capteur. Les stations de l'agglomération parisienne ayant dépassé le seuil d'information sont des stations du Nord et de l'Ouest (2 d'entre elles n'étaient pas encore intégrées dans la procédure d'information et d'alerte lors des mesures).

Depuis son ouverture en 1991, la station rurale de la forêt de Rambouillet a connu des dépassements du seuil d'information en ozone tous les étés. Contrairement aux années précédentes, aucun dépassement de ce seuil n'a été observé sur cette station au cours de l'été 2000. Cette différence est imputable à la faible fréquence de vents de secteur Nord à Est plaçant le site sous le vent de l'agglomération parisienne, et à l'absence de situations prolongées propices à la photochimie.

Comparativement aux étés précédents, et en simulant les déclenchements sur ces étés avec les règles de déclenchement de la procédure actuelle, l'été 2000 a été celui où le nombre de déclenchements du seuil d'information a été le plus faible depuis l'instauration de la première procédure d'information et d'alerte en 1994. Ainsi toutes zones confondues (rurales et agglomération), les deux journées de dépassement de l'été 2000 pour l'ozone sont à rapprocher des 22 journées de 1995, 5 en 1996, 10 en 1997, 6 en 1998 et 16 en 1999. Le tableau 3 regroupe ces chiffres avec le nombre de jours de dépassement du seuil d'information sur la station de la forêt de Rambouillet, d'une part sur la période totale d'été (du 1<sup>er</sup> avril au 30 septembre), d'autre part sur la période de référence du 8 juillet au 3 septembre :

**Tableau 3**

Année	Nombre de déclenchements de la procédure d'information et d'alerte du public toutes zones confondues pour l'ozone du 1 <sup>er</sup> avril au 30 septembre	Nombre de jours de dépassements du seuil d'information pour l'ozone (180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sur la station de la forêt de Rambouillet du 1 <sup>er</sup> avril au 30 septembre	Nombre de déclenchements de la procédure d'information et d'alerte du public toutes zones confondues pour l'ozone du 8 juillet au 3 septembre	Nombre de jours de dépassements du seuil d'information pour l'ozone (180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sur la station de la forêt de Rambouillet du 8 juillet au 3 septembre
1995	22 *	18	16 *	13
1996	5 *	4	3 *	2
1997	10 *	7	9 *	6
1998	6 *	4	5 *	4
1999	16 **	8	10	5
2000	2	0	2	0

\* : basés sur une simulation appliquant les conditions de déclenchement de la procédure d'information et d'alerte tels que définis par l'arrêté interpréfectoral du 24 juin 1999, mis en application le 1<sup>er</sup> juillet 1999.

\*\* : basés sur une simulation du 1<sup>er</sup> janvier au 30 juin 1999 dans les mêmes conditions que ci-dessus (\*), réels à partir du 1<sup>er</sup> juillet, lors de la mise en application de l'arrêté interpréfectoral du 24 juin 1999.

Le tableau 4 rappelle le nombre de jours de dépassements de l'objectif de qualité (110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyennes 8 heures) sur la station rurale de la forêt de Rambouillet sur la période du 1<sup>er</sup> avril au 30 septembre et la période du 8 juillet au 3 septembre, pour les années 1995 à 2000 :

**Tableau 4**

Année	Nombre de jours de dépassements de 110 µg/m <sup>3</sup> en moyenne 8 heures sur la station de la forêt de Rambouillet du 1 <sup>er</sup> avril au 30 septembre	Nombre de jours de dépassements de 110 µg/m <sup>3</sup> en moyenne 8 heures sur la station de la forêt de Rambouillet du 8 juillet au 3 septembre
1995	52	34
1996	51	20
1997	44	24
1998	41	20
1999	65	34
2000	27	13

**4.3 – Résultats des mesures automatiques**

**4.3.1 – Éléments statistiques**

Le tableau 5 ci-après regroupe quelques éléments statistiques pendant la période de mesures du 8 juillet au 3 septembre 2000 pour les stations de l'étude et les stations du réseau AIRPARIF mesurant l'ozone.

**Tableau 5**

STATISTIQUES DES NIVEAUX D'OZONE (en µg/m<sup>3</sup>)  
DU 8 JUILLET AU 3 SEPTEMBRE 2000

Station	Typologie de la station	Moyenne	Max h	Date et heure max h	Nb D 180 h	Nb jours avec 1h>=180	Max 8h	Date et heure max 8h	Nb D 110 8h	Nb jours avec 8h>=110	Nb D 200 H	Nb D 65 J	TR h %	TR 8h %
Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Rambouillet	Rurale régionale	60	160	20/7 17h	0	0	148	12/8 14-21h	80	13	0	19	100	100
Forêt de Rambouillet - Domaine de Pinceloup	Rurale régionale	58	165	20/7 17h	0	0	149	12/8 13-20h	78	13	0	18	98	98
Rambouillet centre-ville	Périurbaine	53	151	24/8 17h	0	0	129	20/7 12-19h	38	9	0	10	94	94
Bullion	Rurale régionale	nr	163	20/7 16h	nr	nr	141	20/7 12-19h	nr	nr	nr	nr	68	68
Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Fontainebleau	Rurale régionale	59	191	20/7 19h	2	1	159	20/7 14-21h	63	12	0	17	87	87
Zone rurale Nord-Est - Montgé - en-Goele	Rurale régionale	61	143	20/7 15h	0	0	134	25/8 14-21h	66	11	0	20	98	98
Zone rurale Nord-Ouest - Fremainville	Rurale régionale	66	221	12/8 19h	3	1	178	12/8 15-22h	91	14	2	24	98	98
Zone rurale Est - Saints	Rurale régionale	55	165	20/7 17h	0	0	150	20/7 13-20h	61	12	0	14	99	99
Zone rurale Ouest - Prunay-le-Temple	Rurale régionale	53	154	24/8 17h	0	0	142	12/8 14-21h	47	9	0	13	97	97
Zone rurale Nord - Noisy-sur-Oise	Rurale régionale	56	157	12/8 18h	0	0	135	12/8 15-22h	55	11	0	15	100	100
Paris 6ème	Urbaine	51	191	12/8 18h	3	1	166	12/8 14-21h	45	9	0	11	100	100
Paris 7ème	Urbaine	35	131	12/8 19h	0	0	118	25/8 13-20h	10	3	0	1	98	98
Paris 13ème	Urbaine	47	169	12/8 18h	0	0	147	12/8 14-21h	30	8	0	11	98	98
Paris 18ème	Urbaine	44	189	12/8 18h	3	1	162	12/8 14-21h	31	7	0	6	99	99
Garches	Urbaine	57	187	12/8 18h	4	1	160	12/8 14-21h	60	13	0	11	96	96
Gennevilliers	Urbaine	50	208	12/8 18h	4	1	175	12/8 14-21h	46	9	2	7	99	100
Neuilly-sur-Seine	Urbaine	50	191	12/8 18h	2	1	158	12/8 14-21h	13	3	0	6	100	100
Aubervilliers	Urbaine	46	195	12/8 19h	3	1	166	12/8 14-21h	35	8	0	8	99	100
Tremblay-en-France	Périurbaine	44	153	12/8 18h	0	0	132	25/8 13-20h	36	6	0	7	98	98
Vitry-sur-Seine	Urbaine	44	155	12/8 19h	0	0	135	12/8 14-21h	26	6	0	7	99	100
Mekun	Urbaine	50	173	20/7 17h	0	0	142	20/7 14-21h	45	10	0	11	100	100
Mantes-la-Jolie	Périurbaine	57	193	12/8 17h	4	1	174	12/8 15-22h	62	11	0	14	94	94
Les Lilis	Périurbaine	59	177	20/7 17h	0	0	155	20/7 13-20h	71	12	0	15	96	85
Montgeron	Urbaine	49	149	12/8 18h	0	0	134	12/8 13-20h	34	7	0	9	99	100
Cergy-Pontoise	Périurbaine	58	238	12/8 19h	5	1	192	12/8 15-22h	75	14	3	14	100	100

nr : donnée non représentative

Heures exprimées en heures légales

Max h : mesure horaire la plus élevée

Max 8h : moyenne glissante heure par heure calculée sur 8 heures consécutives la plus élevée

Nb D 180 H : nombre de mesures horaires supérieures ou égales à 180 µg/m<sup>3</sup>

Nb jours avec 1h>=180 : nombre de jours où l'on a observé au moins une mesure horaire supérieure ou égale à 180 µg/m<sup>3</sup>

Nb D 110 8H : nombre de moyennes glissantes heure par heure calculées sur 8 heures consécutives supérieures ou égales à 110 µg/m<sup>3</sup>

Nb jours avec 8h>=110 : nombre de jours où l'on a observé au moins une moyenne glissante heure par heure sur 8 heures consécutives supérieure ou égale à 110 µg/m<sup>3</sup>

Nb D 65 J : nombre de mesures journalières supérieures ou égales à 65 µg/m<sup>3</sup>

TR h : taux de représentativité des mesures horaires

TR 8h : taux de représentativité des mesures 8 heures

Ces éléments, bien que portant sur une période restreinte de l'année, mais néanmoins parmi les plus favorables aux épisodes de pollution photochimique, montrent la particularité de cet été, par rapport aux années précédentes, notamment par le nombre très inférieur de jours avec au moins un dépassement des seuils réglementaires (voir tableaux 3 et 4 avec nombre de jours de dépassements des seuils de 110 µg/m<sup>3</sup> sur 8 heures et de 180 µg/m<sup>3</sup> sur 1 heure).

**4.3.2 – Représentation graphique de quelques épisodes**

Les conditions météorologiques de cet été n'ayant pas induit de nombreux et intenses épisodes de pollution photochimique, trois périodes, les plus favorables à la photochimie, ont été retenues pour être représentées graphiquement. Les graphiques 10, 11 et 12 représentent les évolutions des concentrations horaires d'ozone de ces périodes sur les stations du Sud-Ouest de la région (forêt de Rambouillet, domaine de Pinceloup, Rambouillet centre-ville, Bullion), et une station du réseau pour laquelle les niveaux ont été élevés. Chacun de ces épisodes est encadré de deux journées sans photochimie.

Ils portent sur les périodes suivantes :

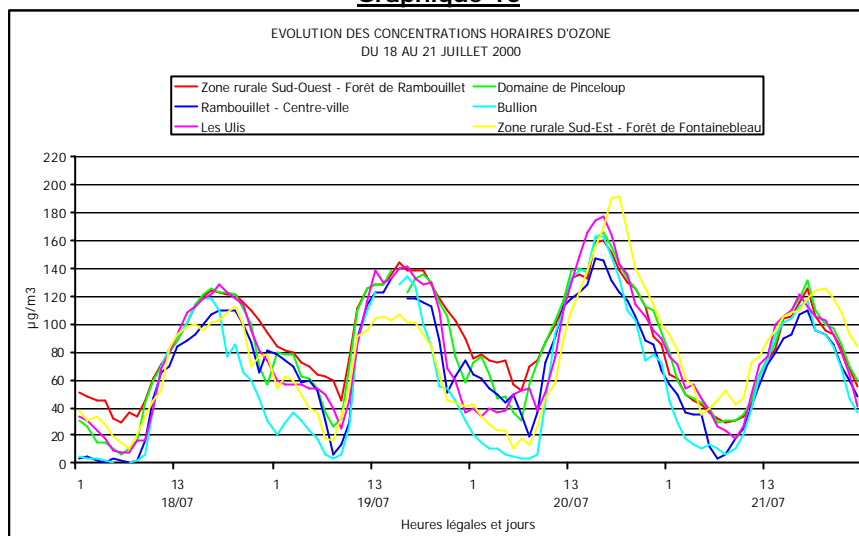
- du 18 au 21 juillet 2000
- du 30 juillet au 2 août 2000
- du 10 au 14 août 2000

Pour ces trois périodes exemptes de précipitations, la température maximale a été de 26 à 31 °C, la vitesse de vent de 1 à 4 m/s. La nébulosité était nulle à faible, avec parfois l'apparition de quelques nuages de haute altitude dans l'après midi ou en soirée, voilant à peine le ciel. Les nuits étaient généralement claires. La couche de mélange atteignait dans la journée 1500 à 2000 mètres. La pression atmosphérique maximale au niveau de la mer était de l'ordre de 1020 à 1025 hPa, ce qui représente une situation anticyclonique. Ces paramètres sont généralement favorables à la photochimie.

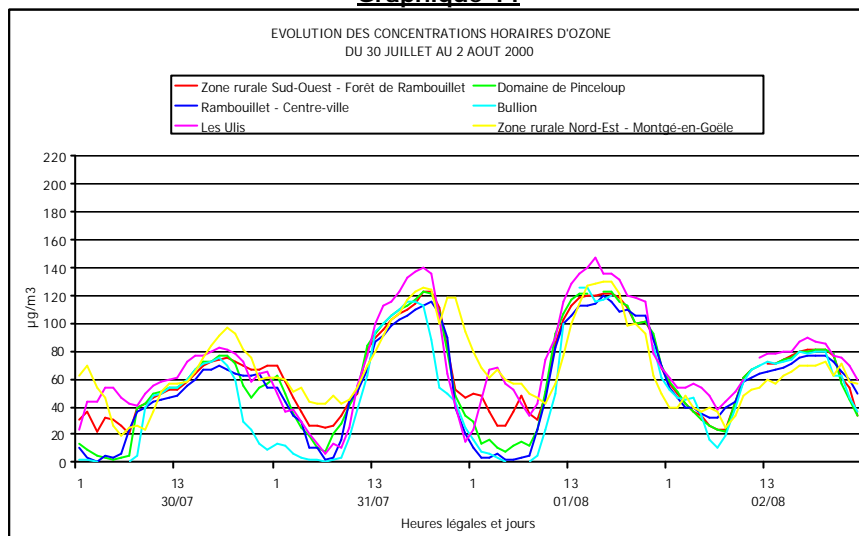
Les roses des vents des graphiques 7 à 9 montrent que les vents de secteur Nord-Est sur la période du 8 juillet au 3 septembre étaient de 9% en 1998, 27% en 1999 et 13% en 2000. L'année 1998 a toutefois connu plus de dépassements des seuils pour l'ozone que l'année 2000, car les situations de vents de secteur Nord-Est en 1998 étaient plus souvent associées à des situations favorables à la photochimie (vent faible, rayonnement et température importants...).



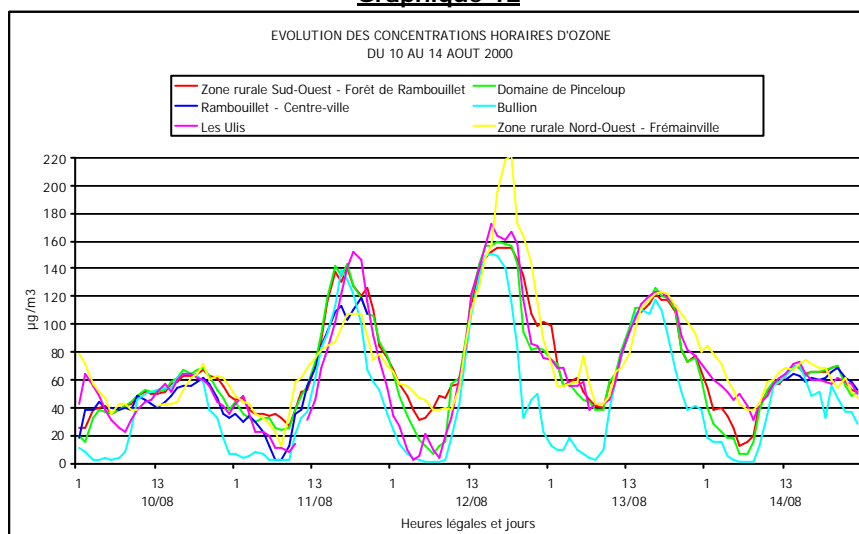
**Graphique 10**



**Graphique 11**



**Graphique 12**



Les éléments statistiques (tableau 5) et l'évolution des concentrations horaires des trois périodes ci-dessus apportent des éléments de réponse aux questions soulevées au paragraphe 2.3.

## 5 - RESULTATS DES MESURES D'OZONE PAR TUBES A DIFFUSION

Les tubes à diffusion utilisés sont fabriqués et analysés par la société Passam (Suisse). Ils fournissent une valeur moyenne hebdomadaire d'absorbance. La concentration moyenne hebdomadaire en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  est obtenue à l'aide de courbes de références élaborées par le fabricant, à partir de tubes ayant été exposés en chambre d'analyse à côté d'analyseurs d'ozone automatiques leur servant de référence.

Sur le secteur Sud-Ouest, les treize sites repérés sur la carte 2 (paragraphe 3.2) étaient équipés de tubes à diffusion, y compris les quatre sites automatiques.

Sur la station rurale de Sonchamp, les écarts des moyennes des tubes par rapport à l'analyseur sont trop importants, de l'ordre de 25 à 35 %. Les profils horaires de cet analyseur (cf. graphiques 10 à 12 au paragraphe 4.3.2), bien corrélés avec ceux de la station expérimentale du domaine de Pinceloup située à 250 mètres, ne mettent pas en cause le fonctionnement de l'analyseur automatique. Le point de prélèvement de la station de Sonchamp au sommet du château de Pinceloup à 18 mètres du sol est un endroit très ventilé. Or, les limites d'utilisation des tubes à diffusion liées notamment au vent laissent présumer un artefact de mesure.

Les écarts relatifs des mesures par tubes du site du domaine de Pinceloup par rapport aux tubes de la station rurale de Sonchamp varient au cours des neuf semaines de mesure de -28% à -13%, alors que ces mêmes écarts pour les analyseurs automatiques correspondants varient de -8% à -3%. Les concentrations d'ozone des mesures par tubes sur la station rurale de Sonchamp sont visiblement très surestimées. Les résultats obtenus par tubes sur ce site ont été invalidés et n'ont pas été pris en compte dans l'interprétation et la cartographie suivante.

Le tableau 6 ci-dessous présente les résultats des tubes placés sur les quatre sites automatiques, au regard des moyennes automatiques calculées sur les mêmes périodes, et l'écart relatif des moyennes des tubes par rapport à celles des analyseurs correspondants.

**Tableau 6**

**CONCENTRATIONS HEBDOMADAIRES D'OZONE EN  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   
PAR TUBES A DIFFUSION PASSIVE ET ANALYSEURS AUTOMATIQUES  
Tubes fabriqués et analysés par la société Passam (Suisse)**

Période de mesure	Rambouillet Centre ville				Domaine de Pinceloup				Bullion			
	Tube (T)	Analyseur (A)	Ecart T - A	Ecart relatif T / A	Tube (T)	Analyseur (A)	Ecart T - A	Ecart relatif T / A	Tube (T)	Analyseur (A)	Ecart T - A	Ecart relatif T / A
du 03/07 au 10/07	48.3	nr	--	--	46.7	44.4	2.3	5.2%	49.4	43.8	5.6	12.8%
du 10/07 au 17/07	50	45.2	4.8	10.6%	51.3	46.5	4.8	10.3%	46.8	43	3.8	8.8%
du 17/07 au 24/07	81.9	67.4	14.5	21.5%	79	78.1	0.9	1.2%	75.6	60.9	14.7	24.1%
du 24/07 au 31/07	51.8	46.8	5	10.7%	48.2	48.2	0	0.0%	40.5	39	1.5	3.8%
du 31/07 au 07/08	72.5	59.2	13.3	22.5%	69.5	60.7	8.8	14.5%	58.2	50.1	8.1	16.2%
du 07/08 au 14/08	61.6	nr	--	--	58.9	60.1	-1.2	-2.0%	50	41.8	8.2	19.6%
du 14/08 au 21/08	46.3	41	5.3	12.9%	46.9	44.3	2.6	5.9%	40.5	38.1	2.4	6.3%
du 21/08 au 28/08	65.4	65.1	0.3	0.5%	65.4	69.6	-4.2	-6.0%	56.9	--	--	--
du 28/08 au 04/09	65.4	53.9	11.5	21.3%	65.4	58.1	7.3	12.6%	53.3	--	--	--

nr : donnée non représentative

-- : pas de donnée

On remarque que, le plus souvent, les résultats des tubes sont surestimés par rapport à ceux des analyseurs. Les écarts relatifs sont généralement de l'ordre de 10 à 20 %, parfois inférieurs à 10%, et dans quelques cas, les résultats des tubes sont sous-estimés par rapport aux analyseurs. Compte tenu de l'incertitude liée à la méthode de mesure, ces résultats sont globalement satisfaisants.

Le tableau 7 ci-dessous recense les moyennes hebdomadaires sur les sites de mesure par tubes, et la moyenne par site sur l'ensemble de la campagne. Les mesures de la station de Sonchamp, estimées non représentatives, ne sont pas reportées.

**Tableau 7**

**RESULTATS EN  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  DES CONCENTRATIONS HEBDOMADAIRES D'OZONE  
FOURNIES PAR LES TUBES A DIFFUSION PASSIVE DU 3 JUILLET AU 4 SEPTEMBRE 2000  
Tubes fabriqués et analysés par la société Passam (Suisse)**

Site	du 03/07 au 10/07	du 10/07 au 17/07	du 17/07 au 24/07	du 24/07 au 31/07	du 31/07 au 07/08	du 07/08 au 14/08	du 14/08 au 21/08	du 21/08 au 28/08	du 28/08 au 04/09	Moyenne des 9 semaines
La Boissière-Ecole	43.2	50.1	89.9	44.6	63	52.4	42.7	88.3	63.8	59.8
Les Mesnuls	51.4	61	85.5	53	62.6	53.8	46.6	69.6	61.5	60.6
Prunay-le-Temple	48.2	48.8	67.3	54.6	62.8	56.4	48.5	71.4	64.7	58.1
Bullion	49.4	46.8	75.6	40.5	58.2	50	40.5	56.9	53.3	52.4
Chalo St Mars	69.9	52.7	86	59.4	l	76.1	53.2	90.5	72.4	70.0
Les Granges le Roi	50.9	47.5	87.8	l	89.3	76	59.5	72.1	81.8	70.6
Les Ullis	54.5	51	81.8	68.7	84.4	74.5	61.8	92.1	94.8	73.7
Rambouillet centre-ville	48.3	50	81.9	51.8	72.5	61.6	46.3	72	65.4	61.1
Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Rambouillet	l	l	l	l	l	l	l	l	l	nr
Domaine de Pinceloup	46.7	51.3	79	48.2	69.5	58.9	46.9	70.2	65.4	59.6
Orphin	54.7	66.5	77.7	54.3	77.1	58	51.9	80.7	71.9	65.9
Gallardon	67.9	58.7	83.1	51.6	76.2	59.7	46.4	87.9	69.6	66.8
Coltainville	57.4	--	88.4	74.2	--	--	l	87.7	81.6	nr

l : donnée invalidée

nr : moyenne non représentative

-- : pas de donnée

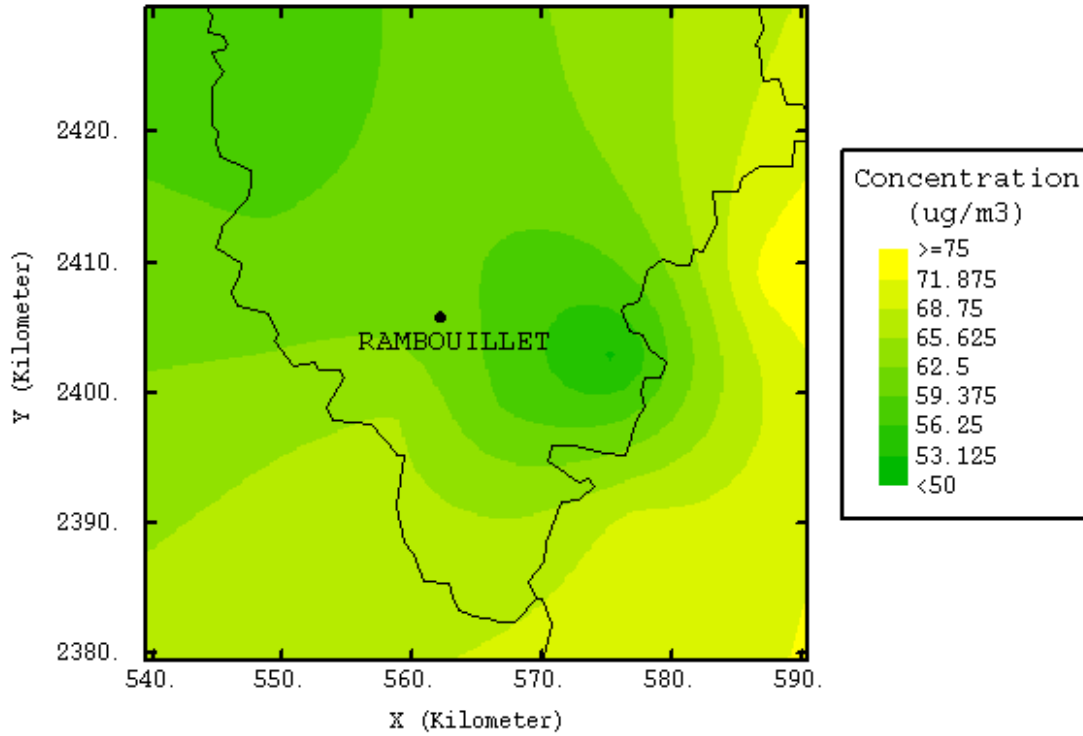
Les concentrations sont globalement homogènes sur l'ensemble des sites. La moyenne des 9 semaines est généralement comprise entre 60 et 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

On remarque toutefois que les moyennes les plus faibles sont régulièrement relevées sur les sites les moins dégagés, en particulier à Bullion. L'interprétation des mesures automatiques a montré que la topographie relativement encaissée de ce site (vallée et espaces boisés) induit un contraste marqué entre les niveaux nocturnes et les concentrations horaires maximales de la journée (voir graphiques 10 à 12, paragraphe 4.3.2). En effet, ces dernières sont équivalentes à celles du secteur, tandis que les niveaux nocturnes sont très faibles en raison d'un piégeage important par dépôt sec (voir en première partie § 2.2.1.2 et fig 6). Il en résulte une valeur moyenne plus faible que sur les autres sites du secteur, tant sur les tubes à diffusion que sur les analyseurs automatiques. Les valeurs moyennes sont donc à interpréter avec précaution : le site de Bullion est en fait autant exposé en concentrations maximales que l'ensemble du secteur notamment lors d'épisodes photochimiques.

Le site de Coltainville (en Eure-et-Loir) n'a pas fourni suffisamment de concentrations hebdomadaires pour en calculer une moyenne représentative des 9 semaines. Parmi les données disponibles pour ce site, les moyennes sont le plus souvent supérieures à celles de Gallardon (située entre Coltainville et Sonchamp), elles-mêmes supérieures à celles du domaine de Pinceloup). Il semble donc que les niveaux moyens d'ozone continuent d'augmenter après Sonchamp. Les niveaux moyens relevés en zone périurbaine aux Ullis sont pourtant le plus souvent supérieurs à ceux de Sonchamp, comme le montrent également les mesures automatiques de ces deux stations, ainsi que la station périurbaine et la station rurale du secteur Nord-Ouest (Cergy-Pontoise et Frémainville).

Sur la carte d'interpolation ci-après (carte 3), il apparaît une zone moins exposée autour de Bullion (zone sombre), et une autre autour de Prunay-le-temple, les deux sites les moins dégagés. Ces zones, représentatives d'une moyenne hebdomadaire, ne sont pas significatives pour des valeurs maximales et les risques encourus en terme de dépassements des objectifs de qualité. Une représentation cartographique portant sur des nombres d'heures de dépassement de 110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyennes 8 heures (cf. carte 1 au paragraphe 2.2) estomperait vraisemblablement cet effet de « puits ». En conséquence, il est envisageable et souhaitable, lors de futures campagnes sur ce thème, de réaliser des mesures à l'aide de tubes à diffusion mesurant des concentrations d'ozone sur 8 heures. Ce type de mesure nécessite toutefois une logistique lourde (installation / désinstallation le même jour, simultanéité impérative de pose / dépose sur tous les sites, effectifs de personnel importants), qui interdit de fait un nombre important de mesures.

**Carte 3**



Le logiciel utilisé pour les cartes d'interpolation n'est actuellement pas en mesure de gérer le relief. C'est pourquoi la zone de plus faible concentration est limitée autour de Bullion. Toutefois, il est très probable que les résultats de cette station soient représentatifs d'autres sites de vallée. Aussi, la zone sombre (concentrations plus faibles) autour de Bullion devrait-elle très probablement suivre le relief de la vallée.

## **6 - LE CAPTEUR DE SONCHAMP EST-IL PLACE A L'EPICENTRE DU PHENOMENE, OU TRADUIT-IL UNE SITUATION GENERALE QUI CONCERNE TOUT LE SUD-OUEST DE LA ZONE RURALE FRANCILIENNE ?**

### **6.1 - La hauteur de prélèvement de 18 mètres permet-elle de mesurer des concentrations représentatives du niveau sol ?**

La station automatique provisoire placée dans le domaine de Pinceloup a été installée pour répondre à cette question. La comparaison entre les mesures des deux stations montre que les principaux éléments statistiques sont équivalents sur la période du 8 juillet au 3 septembre 2000 :

- maximum horaire de  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur la station du réseau et  $165 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur la station expérimentale du domaine de Pinceloup ; les deux maximums ont été atteints le 20 juillet à 17 heures,
- maximum des moyennes 8 heures de  $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur la station du réseau et  $149 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur la station expérimentale du domaine de Pinceloup, le 12 août, de 14 à 21 h pour la première et de 13 à 20 h pour la seconde.

Le seuil de  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne 8 heures a été atteint ou dépassé au cours de 13 journées sur chacune de ces deux stations, le nombre de dépassements de ce seuil a été respectivement de 80 et 78. Sur la période considérée, et au regard des autres stations, ces valeurs traduisent bien des mesures en milieu peu influencé par des sources locales, où le dépassement de ce seuil persiste plus tard en soirée qu'en zone urbaine, en raison d'un piégeage moindre par des émissions de réducteurs.

Sur les graphiques 10 à 12 des concentrations horaires représentés au paragraphe 4.3.2, une différence est observable la nuit : tandis que la station rurale de la forêt de Rambouillet conserve des niveaux de fond nocturnes de l'ordre de  $20$  à  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ceux du domaine de Pinceloup leur sont généralement inférieurs de quelques  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à une vingtaine de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Il semble que cet écart soit essentiellement attribuable à un piégeage nocturne plus sensible sur le site du domaine de Pinceloup, plus près du sol et des structures porteuses, conduisant à l'adsorption de l'ozone.

De ces divers éléments, on peut conclure que la hauteur du dispositif de prélèvement du capteur de Sonchamp n'a pas d'influence notable sur les mesures, notamment sur les niveaux maximums, et que les concentrations mesurées sont représentatives du niveau sol. On en dégage par contre l'effet du piégeage nocturne au sol.

### **6.2 – La ville de Rambouillet est-elle également concernée par ce phénomène ?**

Les éléments statistiques du tableau 3 montrent que les données sont légèrement inférieures sur le site du centre ville de Rambouillet : maximum horaire de  $151 \mu\text{g}/\text{m}^3$  le 24 août à 17 heures, maximum des moyennes 8 heures :  $129 \mu\text{g}/\text{m}^3$  le 20 juillet de 12 à 19 h. Parmi les données disponibles, le seuil de  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne 8 heures a été dépassé 38 fois au cours de 9 journées. Or, en raison d'une coupure d'alimentation électrique, ce site n'a pu fournir de données pendant l'épisode photochimique du 11 au 13 août. Le seuil de  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne 8 heures a cependant été dépassé par les autres stations de la zone rurale Sud-Ouest, il est donc certain qu'il aurait été également dépassé sur le site du centre-ville de Rambouillet. Malgré un taux de représentativité sur la période globale supérieur à 75 % (94%), l'absence de mesures au cours de cette période essentielle affecte nécessairement le calcul du nombre de dépassements de ce seuil, et du nombre de jours où un dépassement a été observé. Compte tenu des profils de cette station par rapport à celles du secteur, on peut considérer que le seuil aurait été dépassé au moins le 12 août, voire le 13, ce qui augmenterait le nombre de dépassements du seuil de  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur 8 h, et porterait à 10 ou 11 le nombre de jours avec  $8\text{h} \geq 110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Les éléments portant sur les moyennes horaires et les profils des concentrations horaires des graphiques 10 à 12 permettent cependant d'établir une faible différence par rapport au secteur de Sonchamp. On observe essentiellement un profil abaissé d'une dizaine de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et un piégeage nocturne plus sensible, dus aux émissions d'oxydes d'azote nécessairement plus importantes en centre-ville.

Mis à part ces phénomènes de réduction et de piégeage nocturne, la ville de Rambouillet n'en est pas moins concernée par le panache urbain en provenance de l'agglomération parisienne lorsqu'elle se trouve sous le vent. Le capteur placé à Sonchamp constitue alors un indicateur utile à l'appréciation des niveaux d'ozone à Rambouillet, et plus particulièrement des pointes de l'après-midi pouvant conduire à des dépassements des objectifs de qualité.

### 6.3 – Le phénomène s'étend-il également aux autres zones urbaines isolées de faible superficie ou d'émissions faibles ?

Afin d'estimer l'étendue géographique des résultats du capteur de Sonchamp, des tubes à diffusion ont été implantés selon la carte 2, de même qu'un site de mesure automatique dans la commune rurale de Bullion. Des contraintes techniques ont nécessité un arrêt de la station de Bullion le 16 août, 2 semaines avant la fin de l'étude. Cet arrêt prématuré a conduit à un taux de représentativité inférieur à 75 % sur la période d'étude, ne permettant pas d'exploiter tous les résultats statistiques. Toutefois, le maximum horaire de  $163 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et le maximum des moyennes 8 heures de  $141 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sont comparables à ceux des deux stations de Sonchamp et du domaine de Pinceloup. Les profils sur les graphiques 10 à 12 des concentrations horaires montrent que ce site atteint des valeurs maximales équivalentes à celles des stations du secteur. En revanche, les niveaux nocturnes redescendent très bas et sont parfois presque nuls. Le point de mesure, situé dans une clairière de la Vallée de Chevreuse, est relativement encaissé. L'effet de vallée, conjugué à la présence de hauts arbres forme une enclave autour du point de mesure. Cette topographie particulière induit une plus grande stabilité des masses d'air la nuit, créant des inversions thermiques nocturnes plus fortes qu'en plaine, dans une couche de mélange de faible hauteur (quelques dizaines de mètres). Il en résulte un piégeage nocturne plus important par les oxydes d'azote émis pendant la journée, faibles certes, mais restés dans la couche de mélange, ainsi que par la biomasse, d'où des concentrations d'ozone très faibles la nuit. Lors de la reprise de l'ensoleillement dans la matinée, on note sur les graphiques 10 à 12 des profils horaires un léger décalage de la réactivation de la photochimie, la convection s'établissant plus lentement en raison de l'occlusion du site.

Outre la topographie particulière du site induisant un profil moins étalé sur la journée, les valeurs maximales atteintes notamment lors d'épisodes photochimiques sont tout à fait comparables, voire même supérieures dans certains cas, à celles du capteur de Sonchamp. Il en découle que les mesures effectuées sur ce dernier site sont également représentatives d'un large secteur environnant.

### 6.4 – Le massif forestier de Rambouillet favorise-t-il l'augmentation des niveaux d'ozone en aval ?

Les hydrocarbures naturels (terpènes) provenant des végétaux subissent également des réactions photochimiques pouvant générer des oxydants dont l'ozone. Les mesures effectuées sur le site de Bullion, situé en amont du massif forestier par vent de secteur Nord-Est, montrent que les valeurs maximales sont équivalentes en amont (à Bullion) et en aval (à Sonchamp) de la forêt. La présence de la forêt de Rambouillet sur le trajet des masses d'air ne semble donc pas induire de surplus aux concentrations d'ozone mesurées à Sonchamp. Par contre, elle contribue certainement à un piégeage nocturne plus important, qui n'a pas lieu sur le capteur de Sonchamp, dégagé de tout obstacle.

### 6.5 – Niveaux d'ozone en amont des zones rurales

Ces trois dernières années, plusieurs nouvelles stations sont venues compléter le dispositif de mesure de l'ozone du réseau AIRPARIF. Au début de l'année 2000, deux stations ont été ouvertes sur les communes périurbaines de Cergy (au Nord-Ouest) et des Ulis (au Sud-Ouest), secteurs intermédiaires entre Paris et les zones rurales. Elles ont régulièrement fourni, au cours de la période de mesure, des valeurs maximales élevées, parfois supérieures à celles des zones rurales. En effet, on a pu constater à plusieurs reprises des concentrations d'ozone plus élevées aux Ulis qu'en zone rurale Sud-Ouest. Le même constat a été fait à Cergy-Pontoise par rapport à la zone rurale Nord-Ouest (station rurale régionale de Frémainville), le 12 août notamment, où on a relevé un maximum horaire de  $238 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à Cergy-Pontoise et  $221 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à Frémainville. Le trop court historique de ces deux stations (Les Ulis et Cergy-Pontoise) et de plusieurs stations récentes, ainsi que les conditions météorologiques particulières de l'été 2000 ne permettent pas d'en dégager un comportement systématique, toutefois, ces divers éléments ont montré que le secteur de Rambouillet n'est pas inéluctablement le plus touché de la région. On peut par ailleurs se demander si, dans certaines situations de vent très faible ou variable, les concentrations maximales d'ozone ne seraient pas atteintes en amont des zones rurales, au niveau des zones périurbaines, avec une diminution qui s'amorcerait vers les zones rurales. Un historique plus complet au cours des années permettra de réétudier cette question.

## 6.6 – Pour d'autres polluants, que peut-on dire ?

### 6.6.1 – Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote sont mesurés en continu en zone rurale sur deux stations du réseau AIRPARIF : la zone rurale Sud-Ouest (forêt de Rambouillet) et la zone rurale Sud-Est (forêt de Fontainebleau). Dans le cadre de cette étude, des mesures temporaires ont été effectuées sur la station rurale du secteur Ouest (Prunay-le-Temple).

On a régulièrement constaté, au fil des années, que les maximums et les percentiles 98 de dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) sont plus élevés en zone rurale Sud-Ouest qu'en zone rurale Sud-Est, tandis que les moyennes et les percentiles 50 sont proches. Le tableau 8 ci-dessous regroupe des éléments statistiques pour le dioxyde d'azote pour ces deux stations, de 1991 à 1999.

**Tableau 8 [7]**

#### STATISTIQUES DES NIVEAUX DE DIOXYDE D'AZOTE EN µg/m<sup>3</sup> POUR LES ANNEES 1992 A 1999

Année	Station	Moyenne	Percentile 50 H	Percentile 98 H	Maximum horaire	Date et heure du max. horaire
1992	Forêt de Fontainebleau - Desquinemare	nr	nr	nr	38	8/12 16h
	Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Rambouillet	nr	nr	nr	92	27/07 1h
1993	Forêt de Fontainebleau - Desquinemare	18	14	54	136	6/12 16h
	Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Rambouillet	nr	nr	nr	296	25/11 24h
1994	Forêt de Fontainebleau - Desquinemare	17	15	46	115	1/06 16h
	Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Rambouillet	18	13	63	188	11/10 21h
1995	Forêt de Fontainebleau - Desquinemare	17	14	47	95	25/07 24h
	Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Rambouillet	19	15	61	113	11/10 2h
1996	Forêt de Fontainebleau - Desquinemare	20	17	54	104	2/02 19h
	Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Rambouillet	21	17	61	108	16/01 18h
1997	Forêt de Fontainebleau - Desquinemare	19	15	60	131	10/01 20h
	Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Rambouillet	18	13	70	148	11/03 6h
1998	Forêt de Fontainebleau - Desquinemare	Fermeture définitive le 24 juillet 1998				
	Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Rambouillet	17	11	75	149	2/02 18h
1999	Zone rurale Sud-Est - Forêt de Fontainebleau	nr	nr	nr	93	13/09 22h
	Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Rambouillet	13	8	54	128	12/02 15h

Station rurale Sud-Est : usine des eaux Desquinemare jusqu'en 1997 ; maison forestière du Clos du Roi à partir de 1999

Heures : légales

-- : pas de données, nr : donnée non représentative

Percentile 50 H : percentile 50 des niveaux horaires ; percentile 98 H : percentile 98 des niveaux horaires

Maximum horaire, date et heure du maximum horaire : mesure horaire la plus élevée, date et heure à laquelle a été relevée la mesure horaire la plus élevée

Les principaux éléments statistiques de cette étude sont regroupés dans le tableau 9 ci-dessous :

**Tableau 9**

#### STATISTIQUES DES NIVEAUX DE DIOXYDE D'AZOTE EN µg/m<sup>3</sup> DU 8 JUILLET AU 3 SEPTEMBRE 2000

Station	Typologie	Moyenne	Percentile 50 H	Percentile 98 H	Maximum horaire	Date et heure du maximum horaire	Taux de représentativité (%)
Zone rurale Sud-Ouest Forêt de Rambouillet	Rurale régionale	12	9	38	57	10/08/2000 à 1h	100
Domaine de Pinceloup	Rurale régionale	14	12	37	54	29/08/2000 à 23h	98
Rambouillet centre-ville	Périurbaine	14	10	48	77	29/08/2000 à 24 h	94
Bullion	Rurale régionale	nr	nr	nr	50	21/07/2000 à 11h	67
Zone rurale Sud-Est Forêt de Fontainebleau	Rurale régionale	nr	nr	nr	33	12/07/2000 à 2h	73
Zone rurale Ouest Prunay-le-Temple	Rurale régionale	8	6	25	71	25/08/2000 à 12h	95
Evry	Urbaine	32	29	69	136	31/08/2000 à 22h	99
Cergy-Pontoise	Périurbaine	18	15	53	114	31/08/2000 à 21h	100
Mantes-la-Jolie	Périurbaine	17	14	46	71	12/08/2000 à 23h	94
Melun	Urbaine	21	19	46	111	31/08/2000 à 22h	100
Montgeron	Urbaine	23	20	55	93	19/07/2000 à 11h	98
Tremblay-en-France	Périurbaine	26	23	69	137	31/08/2000 à 22h	100

nr : donnée non représentative

Heures : légales

Percentile 50 H : percentile 50 des niveaux horaires ; percentile 98 H : percentile 98 des niveaux horaires

Maximum horaire, date et heure du maximum horaire : mesure horaire la plus élevée, date et heure à laquelle a été relevée la mesure horaire la plus élevée.

Pendant la période d'étude de l'été 2000, le taux de représentativité du dioxyde d'azote pour la station rurale régionale du secteur Sud-Est (forêt de Fontainebleau) a été inférieur à 75 %. Il ne permet pas d'exploiter tous les résultats statistiques de cette station pour cette période. Toutefois, la valeur du maximum horaire et le suivi journalier des profils horaires permettent de confirmer la constatation faite les années précédentes : les niveaux de NO<sub>2</sub> de la zone rurale Sud-Est (forêt de Fontainebleau) sont de 1,5 à 2 fois inférieurs à ceux de la zone rurale Sud-Ouest. L'étude montre en outre que les trois stations automatiques de la zone Sud-Ouest (zone rurale Sud-Ouest - forêt de Rambouillet, domaine de Pinceloup et centre ville de Rambouillet) sont concordantes, avec des moyennes de dioxyde d'azote de 12 et 14 µg/m<sup>3</sup>. Le percentile 98 et le maximum sont légèrement supérieurs en centre ville en raison d'émissions locales d'oxydes d'azote plus importantes. Les niveaux de dioxyde d'azote observés sur la station rurale de la forêt de Rambouillet ne sont donc pas limités à un faible périmètre autour de cette station, mais sont bien représentatifs, tout comme les niveaux d'ozone, d'un large secteur dans tout le secteur Sud-Ouest de la région. Ils restent toutefois faibles et ne traduisent qu'une observation en période estivale plutôt favorable à la dispersion.

NB : le taux de représentativité inférieur à 75 % de la station de Bullion ne permet pas de prendre en compte ses éléments statistiques, toutefois, le suivi des niveaux et l'observation des profils horaires ont montré que les évolutions des niveaux de NO<sub>2</sub> sont comparables à celles des stations du secteur.

Le secteur rural Ouest ne semble pas concerné par ce phénomène : les niveaux de dioxyde d'azote relevés sur la station rurale de Prunay-le-Temple sont de 1,5 à 2 fois inférieurs à ceux de la zone Sud-Ouest.

Par contre, les niveaux de monoxyde d'azote (NO), sont équivalents dans les trois secteurs ruraux. Ce polluant primaire, dont les émissions sont très faibles en zone rurale, et de plus étant immédiatement titré par l'ozone, ne peut subsister à de fortes concentrations dans ces lieux où les niveaux d'ozone sont importants.

En revanche, les réactions de titrage du NO par l'ozone en excès génèrent du NO<sub>2</sub>. Une source locale d'oxydes d'azote n'est toutefois pas concevable, puisque toutes les stations du secteur Sud-Ouest enregistrent ce phénomène.

Par ailleurs, les moyennes de dioxyde d'azote très similaires entre la station rurale de la forêt de Rambouillet et la ville de Rambouillet montrent que l'impact de cette dernière est vraisemblablement peu significatif. Seuls les niveaux maximums et les percentiles 98 semblent montrer une faible production locale dans le centre ville.

Les augmentations des niveaux de NO<sub>2</sub> des sites considérés sont généralement enregistrées la nuit, et sont plus importantes en semaine. Le maximum de la station rurale de la forêt de Rambouillet, le 10 août à 1h, a été enregistré par vent de secteur Sud-Ouest (établi depuis le 9 août en milieu de journée). Sur les stations du domaine de Pinceloup et de Rambouillet, le premier maximum a été enregistré le 29 août à 23 et 24 heures, par vent de secteur Nord-Est depuis la fin de l'après-midi, précédé par un vent de secteur Sud-Ouest. Aucune explication tangible ne permet à ce jour d'expliquer ce phénomène particulier.

### 6.6.2 – Particules

Les particules en suspension constituent un ensemble très hétérogène et complexe de substances organiques et minérales. Les particules d'un diamètre aérodynamique moyen inférieur à 10 µm (PM10) sont des particules terrigènes ou provenant des chaussées ou d'effluents industriels. Celles d'un diamètre aérodynamique moyen inférieur à 2,5 µm (PM2,5) sont des particules fines comprenant des suies et acides condensés dérivés entre autres des émissions automobiles. Les petites particules peuvent jouer un rôle de vecteur lorsque des métaux ou des composés chimiques sont adsorbés à leur surface. On trouve ainsi des noyaux carbonés issus des processus de combustion liés à des composés organiques comme certains hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), mais également des sulfates ou des nitrates (transformation des oxydes de soufre ou d'azote), ou encore des ions métalliques (cuivre, fer, manganèse, plomb, vanadium, zinc). Les composés adsorbés à la surface des particules forment une pollution secondaire (sulfates et nitrates particulaires). Dans des situations photochimiques (ensoleillées et chaudes), le panache photochimique véhicule entre autres polluants secondaires, dont l'ozone, de la pollution particulaire secondaire.



La mesure des particules PM10 sur le réseau AIRPARIF est actuellement assurée sur des stations urbaines et périurbaines. La mesure de ce polluant en zone rurale est donc une expérience novatrice. Ainsi, ces mesures apporteront des éléments nouveaux en la matière, mais cependant en l'absence de site mesurant les particules en milieu identique, seules les stations de l'agglomération pourront servir de référence. Le tableau 10 regroupe quelques éléments statistiques en comparaison avec trois sites de référence, et le graphique représente les profils journaliers du niveau moyen de particules sur l'agglomération parisienne, au regard des niveaux de particules à Rambouillet et à Bullion.

**Tableau 10**

**STATISTIQUES DES PM10 en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   
du 8 JUILLET AU 3 SEPTEMBRE 2000**

Station	Typologie	Moyenne	P50 J	P98 J	Maximum journalier	Date du max. journalier	TR J (%)
Rambouillet centre-ville	Périurbaine	16	15	26	27	25/08/2000	93
Bullion	Rurale régionale	nr	nr	nr	30	20/07/2000	66
Paris 12ème	Urbaine	20	20	30	31	01/08/2000	100
Paris 18ème	Urbaine	22	20	36	37	19/07/2000	100
Issy-les-Moulineaux	Urbaine	19	17	31	34	19/07/2000	100

nr : donnée non représentative

P50 J : percentile 50 des niveaux journaliers

P98 J : percentile 98 des niveaux journaliers

Maximum journalier : mesure journalière la plus élevée

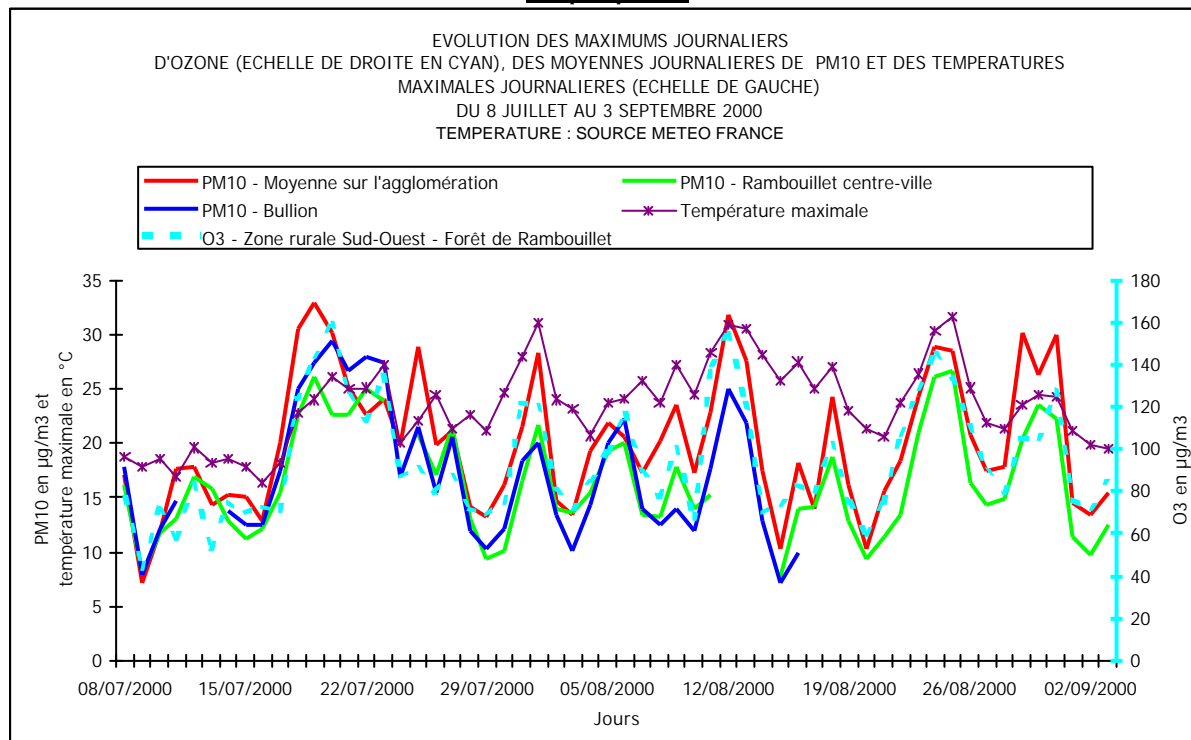
Date du max. journalier : date à laquelle a été relevée la mesure journalière la plus élevée

TR J : taux de représentativité journalier

Les éléments statistiques montrent que la pollution particulaire est environ 25% plus faible sur le secteur Sud-Ouest que sur l'agglomération parisienne. Le graphique 13 ci-dessous représente les moyennes journalières de PM10 sur les sites de Rambouillet, Bullion, et une moyenne de l'ensemble des sites de l'agglomération. Ont été ajoutés sur ce graphique les maximums journaliers des températures et les concentrations journalières maximales d'ozone de la station rurale de Sonchamp, dont il a été montré qu'elle est représentative du secteur Sud-Ouest.

NB : les concentrations de PM10 et la température sont représentées sur la même échelle de l'axe de gauche, les concentrations d'ozone sont représentées sur l'échelle de l'axe de droite.

**Graphique 13**



Le graphique 13 montre que les niveaux de PM10 dans le secteur Sud-Ouest suivent ceux de l'agglomération parisienne, avec généralement quelques  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de moins. On observe que dans plusieurs cas, les niveaux de PM10 du secteur Sud-Ouest rejoignent, voire dépassent ceux de l'agglomération. C'est le cas par exemple du 20 au 23 juillet à Bullion, par régime de secteur Nord-Est, ou le 6 août, à Rambouillet et à Bullion, par vent de secteur Nord-Ouest à Nord-Nord-Est. Dans les deux cas, le vent était faible à modéré (1 à 5 m/s). La température maximale était supérieure à 25 °C du 20 au 23 juillet, et de 24 °C le 6 août. L'évolution des maximums journaliers d'ozone en forêt de Rambouillet, superposée sur le graphique montre que celle ci suit l'évolution des niveaux de PM10. Ces épisodes semblent illustrer un panache photochimique particulaire secondaire.

Les niveaux de PM10 relevés au cours de l'étude à Rambouillet et à Bullion ont été très inférieurs aux valeurs recommandées par le Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France (CSHPF), soit :

- 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne mobile journalière (\*)
- 125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne mobile journalière (\*)

(\*) : moyenne mobile journalière : moyenne calculée toutes les heures à partir des 24 heures précédentes.

L'objectif de qualité français relatif aux PM10, défini par le décret n° 98-360 du 6 mai 1998, est de 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne sur une année tropique. Les niveaux de PM10 mesurés en zone rurale Sud-Ouest et à Rambouillet étaient environ 25% plus faibles qu'en agglomération parisienne. La moyenne annuelle en agglomération parisienne étant légèrement inférieure (moyenne : 24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en 1999) à l'objectif de qualité, on peut estimer que les niveaux moyens annuels de PM10 en zone rurale Sud-Ouest seraient aussi inférieurs à l'objectif de qualité. Cette déduction est du moins applicable dans les conditions particulières de l'été 2000. En effet, si les niveaux de PM10 en zone rurale Sud-Ouest augmentent proportionnellement avec les niveaux d'ozone comme le montre le graphique 13, il est probable que les niveaux de PM10 auraient été beaucoup plus élevés avec des conditions plus classiques pour un été (températures plus élevées, régimes continentaux persistants...), comme on a pu en observer par le passé : des étés chauds avaient généré des épisodes photochimiques plus nombreux et plus intenses, dont on a pu mesurer l'ampleur par les niveaux d'ozone. La mesure des PM10 serait à renouveler dans de telles situations, au cours des prochains étés, afin de mieux cerner son évolution dans des situations photochimiques durables. L'objectif de qualité ou les valeurs préconisées par le CSHPF seraient alors peut-être davantage approchés.

## 7 - CONCLUSIONS

La représentativité de la station rurale régionale du secteur Sud-Ouest de l'Ile-de-France, implantée à Sonchamp au Sud du massif forestier de Rambouillet fait depuis quelques années l'objet de plusieurs questions : influence de la hauteur du prélèvement, situé à 18 mètres du sol, étendue géographique de la représentativité des mesures, influence du massif forestier sur les mesures.... La présente étude, réalisée du 8 juillet au 3 septembre 2000, a permis d'effectuer des mesures complémentaires au cours de cette période, selon le dispositif suivant : une station automatique dans un local à 250 mètres au Nord de la station, avec un prélèvement à 4 mètres du sol, un camion laboratoire dans le centre ville de Rambouillet, un autre camion laboratoire à Bullion, commune rurale située en amont du massif forestier. Les autres stations du réseau AIRPARIF ont servi de référence. Des mesures complémentaires par tubes à diffusion passive, fournissant une moyenne hebdomadaire, ont été effectuées sur une dizaine de sites, permettant d'établir une cartographie des niveaux d'ozone sur le secteur rural Sud-Ouest de l'Ile-de-France.

Les conditions météorologiques de l'été 2000 ont été peu favorables à l'observation d'épisodes photochimiques : nébulosité importante, d'où faible ensoleillement, températures peu élevées pour la saison, peu de régimes de vents de secteur Nord-Est. De ce fait, il n'y a eu que très peu de situations d'import continental d'ozone, et d'effet d'accumulation.

Quelques rares épisodes de courte durée ont toutefois permis de fournir des réponses aux questions posées :

Les mesures automatiques du site du domaine de Pinceloup montrent que la hauteur du capteur de Sonchamp n'a pas d'influence sur les valeurs maximales de la journée, et a fortiori au cours d'épisodes photochimiques. Seule une influence des niveaux nocturnes est perceptible : le site expérimental, plus près du sol et des structures porteuses, subit un piégeage nocturne des niveaux d'ozone plus sensible.

Le site du centre ville de Rambouillet, malgré des émissions locales de réducteurs plus importantes conduisant à des niveaux moyens d'ozone légèrement plus faibles qu'en zone rurale, n'échappe pas au phénomène de panache urbain en cas d'épisode photochimique. Le seuil d'information de  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  n'a été dépassé sur aucune station du secteur Sud-Ouest, mais le nombre de jours de dépassement du seuil de protection de la santé ( $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne 8 heures), bien que sous-estimé d'un ou deux jours à Rambouillet en raison d'une coupure électrique au cours de l'épisode photochimique du 11 au 13 août, a été de 10 jours pour 13 jours en zone rurale Sud-Ouest. La ville de Rambouillet est donc concernée par le panache photochimique, au même titre que la station rurale de Sonchamp, qui constitue alors un indicateur précis à la problématique des niveaux d'ozone dans la ville de Rambouillet.

Le site de mesure installé en amont du massif forestier, à Bullion, confirme par ses niveaux maximums comparables à ceux de la station de Sonchamp, l'étendue géographique de la représentativité de cette dernière. La topographie relativement encaissée de ce site (vallée et environnement boisé) a cependant conduit à des niveaux nocturnes très faibles à nuls, entraînant des valeurs moyennes plus faibles que sur les autres sites du secteur. La présence de la forêt ne semble pas apporter un surplus aux concentrations d'ozone mesurées en aval à Sonchamp, du moins dans les situations rencontrées au cours de l'été 2000, qui n'étaient pas particulièrement favorables à l'observation de fortes pointes photochimiques.

Les mesures d'ozone par tubes à diffusion ont permis d'obtenir des concentrations hebdomadaires sur une dizaine de sites et l'établissement d'une cartographie des niveaux moyens d'ozone sur le secteur. On observe un « puits » autour du site de Bullion, lié à la topographie encaissée du site. On peut supposer que les niveaux enregistrés à Bullion sont représentatifs d'un relief de vallée, ce qui, compte tenu des limites actuelles du logiciel de cartographie utilisé, n'apparaît pas sur la carte d'interpolation.

La mesure des oxydes d'azote à l'aide d'analyseurs automatiques sur le domaine de Pinceloup, à Rambouillet, et à Bullion a fourni des niveaux similaires à ceux de la station rurale de Sonchamp. Les niveaux de  $\text{NO}_2$  augmentent simultanément sur les quatre stations du secteur. Ils confirment le constat fait au cours des années précédentes quant aux niveaux de  $\text{NO}_2$  plus élevés sur la station rurale du secteur Sud-Ouest que sur la station rurale du secteur Sud-Est. Ces augmentations ont souvent lieu la nuit, lorsqu'il a fait chaud dans la journée. Ces niveaux sont faibles en moyenne en comparaison avec ceux observés sur la zone agglomérée.

La mesure des PM10, actuellement assurée sur le réseau uniquement en agglomération parisienne, a montré que les niveaux dans le secteur de Rambouillet sont globalement inférieurs de 25% à ceux de l'agglomération. Dans quelques cas d'épisodes photochimiques, on a pu constater que les niveaux de PM10 dans le secteur de Rambouillet sont équivalents à ceux de l'agglomération, notamment lorsque le secteur se trouve sous le vent de l'agglomération parisienne. Ces niveaux résultent en partie de l'apport de particules secondaires de type nitrates et sulfates dans le panache photochimique.

**ANALYSE DES NIVEAUX D'OZONE  
LORS DE L'EPISODE PHOTOCHEMIQUE  
DU 3 AU 5 SEPTEMBRE 1999**

## ANALYSE DES NIVEAUX D'OZONE LORS DE L'ÉPISODE PHOTOCHIMIQUE DU 3 AU 5 SEPTEMBRE 1999

Le 4 septembre 1999, les conditions nécessaires à un épisode photochimique d'ozone étaient réunies.

**Situation météorologique le 4 septembre 1999 à Paris (source données : Météo France),**

Situation générale : tendance anticyclonique

Pression : 1015 à 1020 hPa

Température minimale : 15°C à 7h légales

Température maximale : 27,5°C à 16 h légales

Vent : le matin, de secteur Nord-Est dominant 1 à 2 m/s  
l'après-midi, de secteur Nord-Est dominant, 1 à 3 m/s

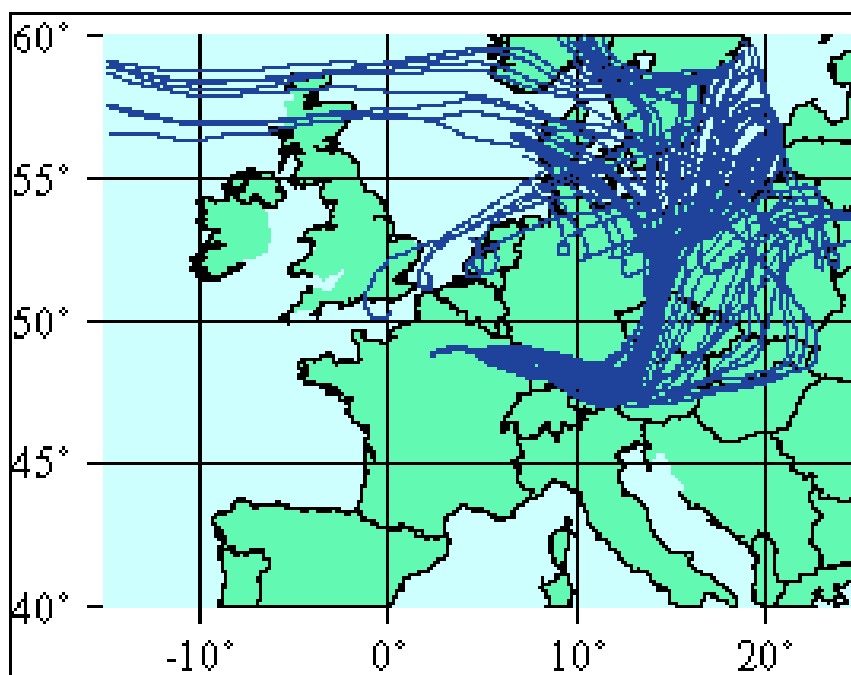
Ciel : dégagé en matinée, se voilant en fin d'après-midi.

Durée d'insolation : 8 à 9 heures

Informations issues de la rétrotrajectoire du 04/09/99 (source LMD) : masse d'air continentale à l'échelle des derniers jours, en provenance de l'Europe centrale puis du Sud de l'Allemagne, arrivée sur l'Île-de-France par l'Est Nord-Est (cf. carte 1).

### Carte 1

Rétrotrajectoire des masses d'air le 4 septembre 1999 (Source LMD)



Niveaux de fond d'ozone entrant : ils peuvent être estimés par les concentrations relevées au Nord-Est de la région : station de la zone rurale Nord-Est Montgé-en-Goële = 115 µg/m<sup>3</sup> en valeur maximale horaire.

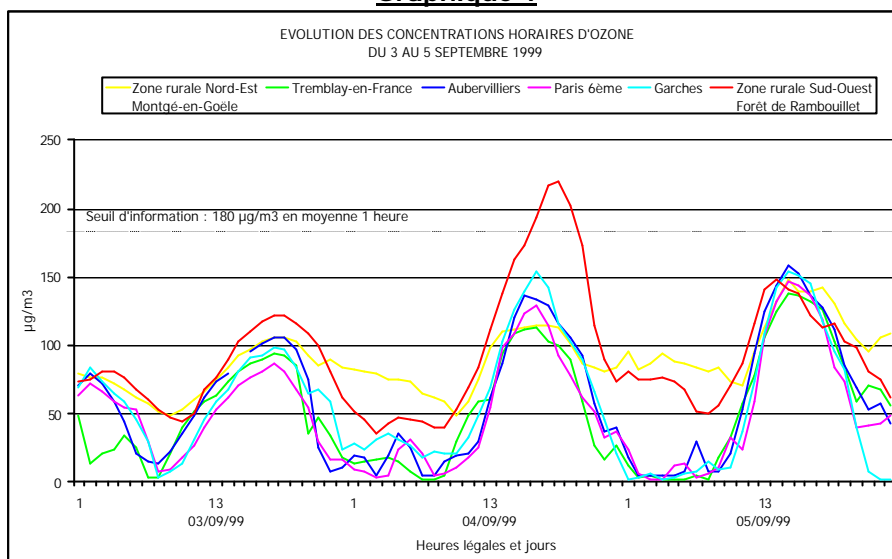
De nombreux précurseurs ont pu être émis par un trafic dense dû aux derniers retours avant la rentrée.

Le graphique 4 présente les concentrations horaires d'ozone du 3 au 5 septembre 1999 sur six stations du réseau AIRPARIF proches d'un axe Nord-Est / Sud-Ouest :

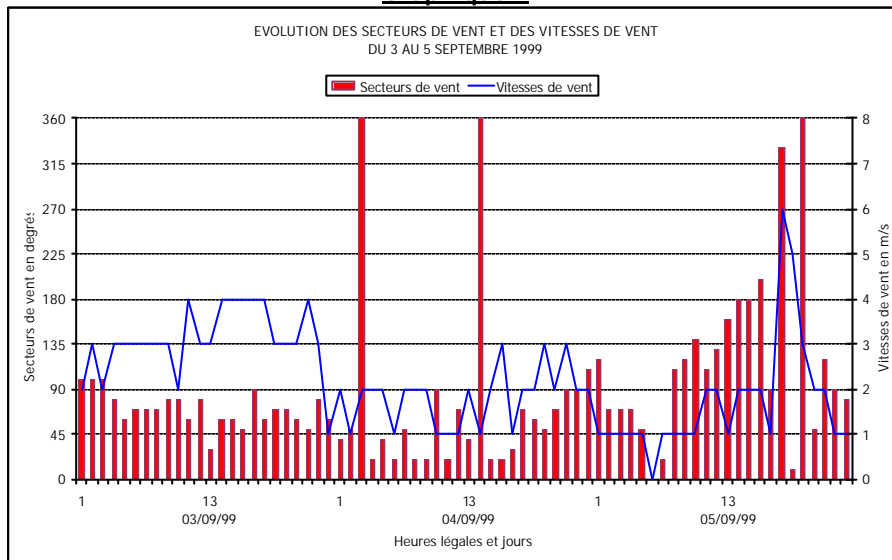
- Zone rurale Nord-Est – Montgé-en-Goële (station rurale régionale)
- Tremblay-en-France (station périurbaine en périphérie Nord-Est de l'agglomération)
- Aubervilliers (station urbaine au Nord-Est de Paris)
- Paris 6<sup>ème</sup> (station urbaine du centre de l'agglomération)
- Garches (station urbaine du Sud-Ouest de l'agglomération)
- Zone rurale Sud-Ouest – Forêt de Rambouillet (station rurale régionale)

Les graphiques d'évolution des secteurs et vitesses de vent et de la température (graphiques 2 et 3) sont alignés sous le graphique des niveaux d'ozone.

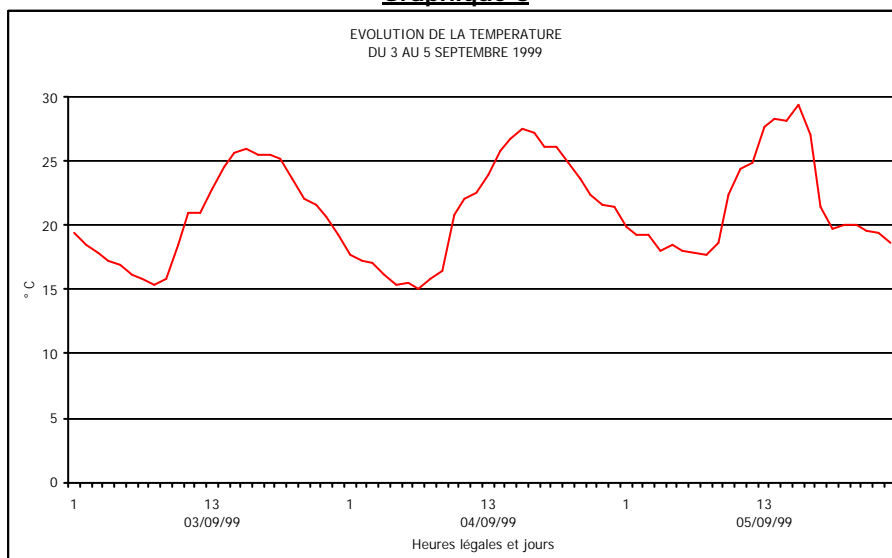
**Graphique 1**



**Graphique 2**



**Graphique 3**



Le 3 septembre, un vent de secteur Nord-Est plaçait déjà le site de la zone rurale Sud-Ouest sous le vent de l'agglomération. Toutefois, un vent modéré, de l'ordre de 3 à 4 m/s, a permis une assez bonne dispersion, ce qui a conduit à une augmentation limitée des niveaux d'ozone. Le tableau 1 (maximums horaires du 3 au 5 septembre) montre que les maximums ont varié sur l'ensemble du réseau AIRPARIF de 67 µg/m<sup>3</sup> à Neuilly-sur-Seine à 121 µg/m<sup>3</sup> en forêt de Rambouillet (zone rurale Sud-Ouest).

**Tableau 1**

**Maximums des moyennes horaires et des moyennes 8 heures d'ozone (en µg/m<sup>3</sup>) atteints sur les stations de fond du réseau AIRPARIF du 3 au 5 septembre 1999**

Station	Typologie de la station	03/09/1999				04/09/1999				05/09/1999				
		Max h	Heure max h	Max 8h	Heure max 8h	Max h	Heure max h	Max 8h	Heure max 8h	Max h	Heure légale	Heure max h	Max 8h	Heure max 8h
Zone rurale Sud-Ouest - Forêt de Rambouillet	Rurale régionale	121	19	112	15-22h	220	19	185	14-21h	148	108	14	129	12-19h
Zone rurale Sud-Est - Forêt de Fontainebleau	Rurale régionale	114	18	101	14-21h	145	18	132	13-20h	132	111	15	124	12-19h
Zone rurale Nord-Est - Montgé-en-Goële	Rurale régionale	105	18	98	14-21h	115	17	110	13-20h	148	112	15	133	13-20h
Zone rurale Nord-Ouest - Frémenville	Rurale régionale	111	19	100	14-21h	137	18	125	13-20h	152	114	15	122	12-19h
Zone rurale Est - Saints	Rurale régionale	108	19	95	13-20h	131	16	114	12-19h	139	108	16	124	13-20h
Zone rurale Ouest - Prunay-le-Temple	Rurale régionale	106	17	96	14-21h	150	17	133	13-20h	141	96	14	110	12-19h
Paris 6ème	Urbaine	86	18	72	13-20h	129	17	101	14-21h	147	95	15	118	12-19h
Paris 7ème	Urbaine	86	18	71	14-21h	115	17	80	14-21h	153	86	15	109	12-19h
Paris 13ème	Urbaine	103	18	91	14-21h	137	17	117	14-21h	157	90	16	122	12-19h
Paris 18ème	Urbaine	87	18	70	13-20h	116	16	93	14-21h	152	90	15	118	12-19h
Garches	Urbaine	99	18	84	13-20h	154	17	121	14-21h	154	94	15	124	13-20h
Gennevilliers	Urbaine	nr	nr	nr	nr	nr	nr	nr	nr	nr	nr	nr	nr	nr
Neuilly-sur-Seine	Urbaine	67	18	58	13-20h	125	16	96	14-21h	138	77	15	108	12-19h
Aubervilliers	Urbaine	106	18	94	13-20h	136	16	115	14-21h	158	85	15	131	12-19h
Tremblay-en-France	Périurbaine	94	18	83	13-20h	113	17	97	13-20h	138	93	15	118	12-19h
Vitry-sur-Seine	Urbaine	95	19	87	14-21h	141	17	120	14-21h	145	87	15	122	12-19h
Melun	Urbaine	110	19	96	14-21h	146	18	130	13-20h	139	88	15	122	13-20h
Mantes-la-Jolie	Périurbaine	108	19	99	15-22h	131	17	124	13-20h	159	109	15	112	12-19h
Montgeron	Urbaine	95	19	87	13-20h	147	17	121	13-20h	137	91	15	121	12-19h

Heures exprimées en heures légales

nr : donnée non représentative

Max h : maximum des moyennes horaires de la journée

Max 8h : maximum des moyennes 8 heures de la journée

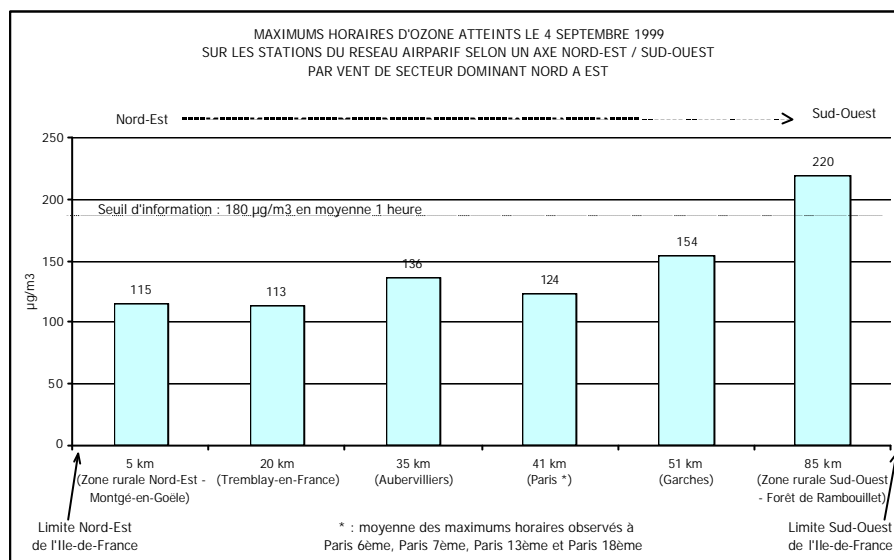
Le 4 septembre, le vent, de secteur dominant Nord à Est s'étant atténué en matinée, a conduit à un déplacement de la masse d'air plus lent que la veille, vers le Sud-Ouest de la région. L'ensoleillement important a contribué à l'activation des réactions photochimiques. La production d'ozone issue de ces dernières, cumulée aux niveaux d'ozone de la veille, a induit une augmentation conséquente des niveaux d'ozone, particulièrement en zone rurale Sud-Ouest, où le maximum a atteint 220 µg/m<sup>3</sup> à 19 heures. Le second maximum d'ozone sur le réseau AIRPARIF a été observé à Garches (154 µg/m<sup>3</sup>) à 17 heures, également placée au Sud-Ouest de l'agglomération, à une distance de 12 kilomètres du centre de Paris. Ce maximum est plus élevé que sur les autres zones rurales de l'Île-de-France, où les maximums ont été compris entre 115 µg/m<sup>3</sup> à Montgé-en-Goële (zone rurale Nord-Est) et 150 µg/m<sup>3</sup> à Prunay-le-Temple (zone rurale Ouest). La valeur de 154 µg/m<sup>3</sup> atteinte à Garches illustre bien le déplacement et le chargement en ozone de la masse d'air lors de son déplacement dans une direction distincte, avec une avance de 2 heures sur la zone rurale. Au niveau de Garches, la photochimie n'a pas atteint son effet maximum, où les réactions de titration avec les polluants primaires émis en agglomération sont encore sensibles.

A l'opposé, à Montgé-en-Goële, les niveaux observés sont parmi les plus faibles et correspondent à un niveau de fond entrant sur la région. Ces concentrations sont 2 fois plus faibles qu'en zone rurale Sud-Ouest, ce qui montre le développement du processus photochimique dans la masse d'air au cours de son transfert entre les extrémités Nord-Est et Sud-Ouest de la région.

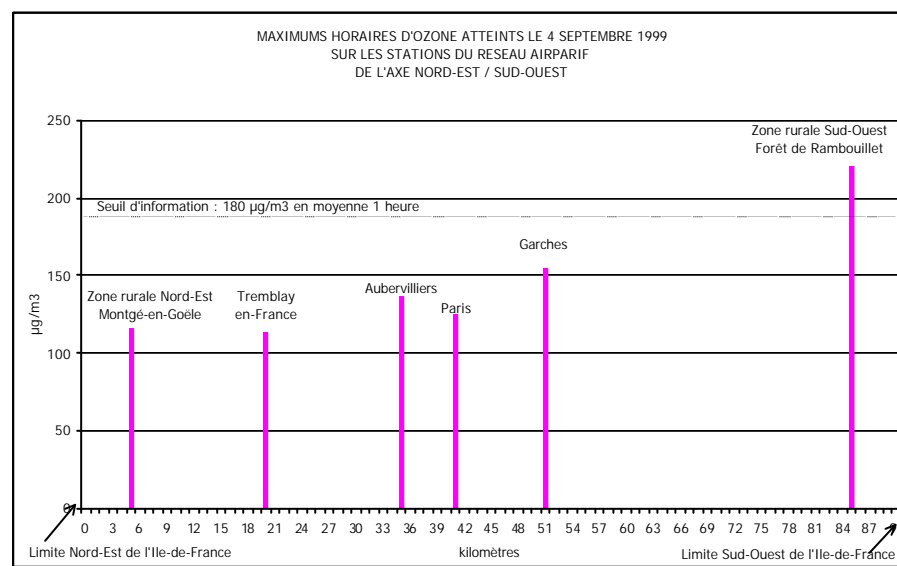


Les graphiques 4 et 5 ci-dessous représentent les valeurs maximales observées le 4 septembre 1999 sur les stations de l'axe Nord-Est / Sud-Ouest, ainsi que leur évolution sur une échelle kilométrique démarrant au point d'entrée Nord-Est de l'Ile-de-France (fixé à 5 kilomètres au Nord-Est de Montgé-en-Goële). On remarque bien le développement de la réaction, notamment sur la distance de 34 km séparant Garches de la forêt de Rambouillet. On note également le « puits » d'ozone au niveau de Paris, où les émissions plus intenses de réducteurs contribuent à une titration plus importante de l'ozone. On notera également le cas d'Aubervilliers, où des niveaux d'ozone légèrement plus importants qu'en amont à Tremblay-en-France, laissent supposer une source de précurseurs au niveau de l'aéroport Roissy-Charles-de-Gaulle par vent de secteur Nord-Est.

**Graphique 4**



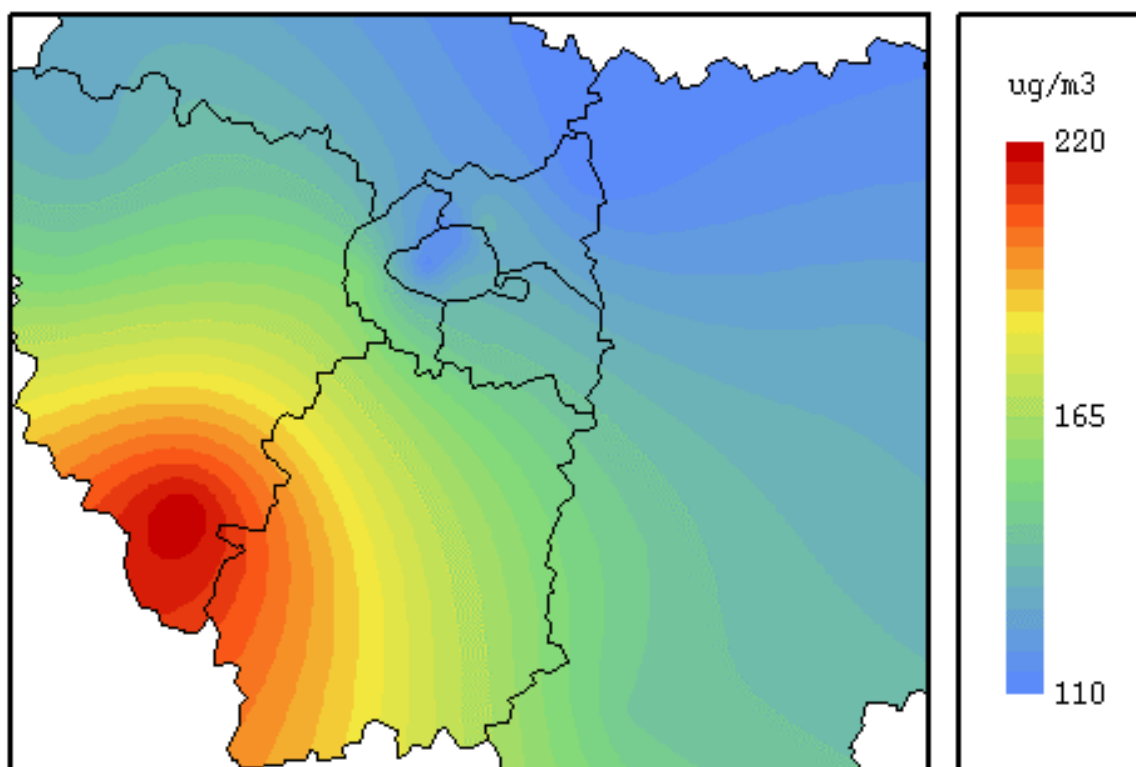
**Graphique 5**



La carte d'interpolation ci-dessous illustre la répartition des valeurs maximales observées en Ile-de-France le 4 septembre 1999, ces maximums ayant été observés entre 16 et 19 heures.

### Carte 2

#### **CARTE D'INTERPOLATION DES MAXIMUMS HORAIRES D'OZONE SUR LES STATIONS DE FOND DE L'ILE-DE-FRANCE LE 4 SEPTEMBRE 1999**



Le 5 septembre, une augmentation de la température de près de 2 °C par rapport à la veille a conduit à une hausse des niveaux sur certaines stations du réseau. Toutefois, un changement de régime de vent de secteur Sud-Est le matin, puis variable à dominante Sud l'après midi a induit l'augmentation des niveaux essentiellement sur le centre de l'agglomération et le Nord de la région, tandis que le Sud n'était plus sous le vent. Vers 18 heures, l'apparition d'une brusque rafale de vent et la chute de la température de plus de 5 °C étaient vraisemblablement liées à un passage orageux annoncé par Météo France (serveur spécial). On observe qu'en pareil cas, la diminution des niveaux d'ozone est progressive.

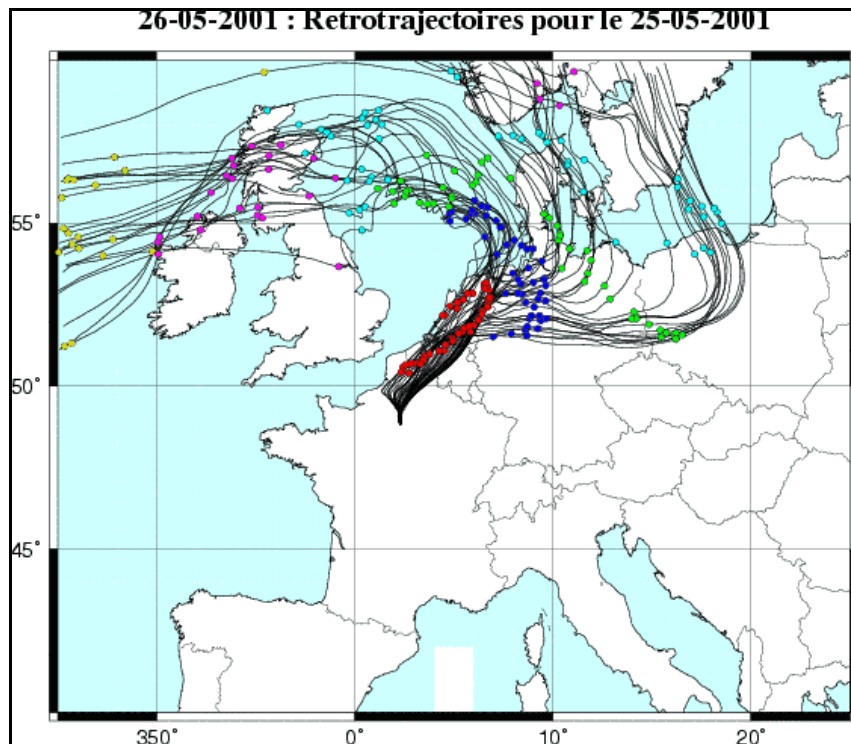
#### Niveaux de fond nocturnes

Le graphique 1 montre que des niveaux d'ozone de 50 à 100 µg/m<sup>3</sup> ont subsisté la nuit sur les deux stations rurales (Nord-Est et Sud-Ouest). Le profil peu marqué de la station rurale Nord-Est montre que la photochimie n'a pas été le phénomène dominant sur cette zone (absence de précurseurs), puisque les niveaux de la journée sont peu élevés par rapport au niveau de fond nocturne. En zone urbaine, l'ozone piégé par les précurseurs émis dans la journée au niveau du sol (et restés bloqués dans la couche de mélange de faible épaisseur), diminue de façon plus significative la nuit.

**RETROTRAJECTOIRE DES MASSES D'AIR  
LORS DE L'EPISODE PHOTOCHEMIQUE  
DU 25 MAI 2001**

**Carte 3**

Rétrotrajectoire des masses d'air le 25 mai 2001 (Source Météo France / IPSL)



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

[1] – Rapport n° 30 de l'Académie des Sciences  
« Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère » - Octobre 1993  
Composition du groupe de travail :

Le groupe est animé par :

G. MEGIE  
Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie  
Service d'Aéronomie du CNRS – Paris  
Correspondant de l'Académie des Sciences

Membres :

J. BONTE  
Directeur du Centre Départemental d'Etudes et de Recherche sur l'Environnement  
des Pyrénées Atlantiques

P. CARLIER  
Directeur de Recherche au CNRS  
Laboratoire Inter universitaire des Systèmes Atmosphériques  
Créteil

J. CHAUDAUDRA  
Professeur à l'Institut Gustave Roussy  
Service de Physique - Villejuif

P. DIZENGREMEL  
Professeur à l'Université de Nancy I  
Laboratoire de Physiologie Végétale et Forestière – Nancy

A. FEUGIER  
Directeur, Coordonnateur Environnement et Sécurité  
Institut Français du Pétrole

C. GRANIER  
Chargée de Recherche au CNRS  
National Center for Atmospheric Research – Boulder, Etats-Unis

D. HAUGLUSTAINE  
Chargé de Recherche au CNRS  
Service d'Aéronomie du CNRS - Paris

M. KANAKIDOU  
Chargée de Recherche au CNRS  
Centre des Faibles Radioactivités CNRS – Gif-sur-Yvette

G. LE BRAS  
Directeur de Recherche au CNRS  
Laboratoire de Chimie des Systèmes Réactifs - Orléans

A. MARENCO  
Directeur de Recherche au CNRS  
Laboratoire d'Aérodologie - Toulouse

G. MOUVIER  
Professeur à l'Université Paris VII  
Laboratoire Inter Universitaire des Systèmes Atmosphériques – Créteil

B. TISSOT  
Correspondant de l'Académie des Sciences  
Directeur Adjoint de l'Institut Français du Pétrole

G. TOUPANCE  
Professeur à l'Université Paris XII  
Laboratoire Inter Universitaire des Systèmes Atmosphériques – Créteil

R. TRUHAUT  
Professeur à l'Université Paris V  
Membre de l'Institut

[2] – Cours de pollution atmosphérique  
G. Mouvier - Professeur à l'Université Paris VII  
Laboratoire Inter Universitaire des Systèmes Atmosphériques – Créteil.

[3] – Rapport d'activité AIRPARIF, 1999 ; AIRPARIF Actualité n° 9, Novembre 1999, « La qualité de l'air en Ile-de-France : été 1999 ».

[4] – Décret n° 98-360 du 6 mai 1998 relatif à la surveillance de la qualité de l'air, de ses effets sur la santé et l'environnement, aux objectifs de qualité de l'air, aux seuils d'alerte et aux valeurs limites.

[5] – Arrêté du 17 août 1998 relatif aux seuils de recommandation et aux conditions de déclenchement de la procédure d'information et d'alerte

[6] – Arrêté interpréfectoral n° 99-10762 du 24 juin 1999 relatif à la procédure d'information et d'alerte du public en cas de pointe de pollution atmosphérique en région Ile-de-France.

[7] – Editions statistiques annuelles d'AIRPARIF.