



**HAL**  
open science

## Ozone et pollution atmosphérique à grande échelle. Le réseau de surveillance Paes

François Gheusi, Amandine Chevalier, Robert Delmas, Gilles Athier, Paul Bouchou, Jean-Marc Cousin, Yves Meyerfeld, Paolo Laj, Karine Sellegri, Gérard Ancellet

### ► To cite this version:

François Gheusi, Amandine Chevalier, Robert Delmas, Gilles Athier, Paul Bouchou, et al.. Ozone et pollution atmosphérique à grande échelle. Le réseau de surveillance Paes. La Météorologie, 2007, Numéro 58 (Août), pp.30-35. hal-00480639

**HAL Id: hal-00480639**

**<https://hal.science/hal-00480639>**

Submitted on 4 Jun 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Ozone et pollution atmosphérique à grande échelle (1)

## Le réseau de surveillance Paes

*Ndlr* La deuxième partie de cet article paraîtra dans le numéro 59 de *La Météorologie*.

## Résumé

Les problèmes environnementaux liés à l'ozone dépassent les cadres médiatiques habituels, à savoir trou d'ozone (stratosphérique) antarctique et pics de pollution dans les villes. De fortes expositions sont courantes loin des sources directes de pollution, et la concentration troposphérique de fond en ozone a quintuplé en un siècle. En réponse à cet enjeu sur un plan national, les actions de surveillance de l'ozone troposphérique à grande échelle se sont structurées depuis 2004 en réseau : Paes (Pollution atmosphérique à échelle synoptique), labellisé « Service d'observation » par l'Institut national des sciences de l'univers et soutenu par l'Ademe. Les données produites sont librement disponibles en ligne.

## Abstract

### Ozone and atmospheric pollution at synoptic scale: the monitoring network Paes

Ozone as an environmental concern extends beyond the questions usually covered by the media – stratospheric ozone depletion over the Antarctic and urban pollution peaks. Strong exposures to this pollutant are frequent even far from pollution sources, and the background tropospheric content of ozone has been grown fivefold over the last century. In response to this concern at the French national scale, formerly independent monitoring stations have been coordinated since 2004 in a structured network: Paes (French acronym for atmospheric pollution at synoptic scale). The data are put in free access online.

François Gheusi<sup>(1)</sup>, Amandine Chevalier<sup>(1)</sup>, Robert Delmas<sup>(1)</sup>, Gilles Athier<sup>(1)</sup>, Paul Bouchou<sup>(1)</sup>, Jean-Marc Cousin<sup>(1)</sup>, Yves Meyerfeld<sup>(1)</sup>, Paolo Laj<sup>(2)</sup>, Karine Sellegri<sup>(2)</sup> et Gérard Ancellet<sup>(3)</sup>

(1) Laboratoire d'aérodynamique, Observatoire Midi-Pyrénées  
14, avenue Édouard-Belin - 31400 Toulouse.

(2) Laboratoire de météorologie physique, Observatoire de physique du globe, Clermont-Ferrand.

(3) Service d'aéronomie, Institut Pierre-Simon-Laplace, Paris.

Parmi les problèmes que connaît l'environnement terrestre, deux impliquent un même gaz atmosphérique : l'ozone ( $O_3$ ). Ils doivent pourtant être clairement distingués car ils concernent des couches différentes de l'atmosphère, et les solutions pour y remédier n'impliquent pas des enjeux socio-économiques d'égale importance : le premier est celui de la destruction saisonnière de la couche d'ozone stratosphérique par les composés halogénés en Antarctique (le fameux « trou » d'ozone), le second, celui de la pollution par l'ozone troposphérique.

- l'ozone troposphérique est un gaz à effet de serre ;
- cette pollution a une signature très claire à l'échelle globale ;
- son augmentation coïncide avec le développement de l'activité industrielle et humaine ;
- aucune solution pour stopper sa progression, qui soit compatible avec un scénario de développement socio-économique réaliste, n'est encore entrevue.

## Ozone troposphérique et pollution à grande échelle

La première question a défrayé la chronique et marqué les esprits dans les années 1980-1990. Des solutions technologiques alternatives à l'utilisation des composés chlorofluorocarbonés (ou CFC, principaux polluants incriminés dans la destruction de l'ozone stratosphérique) ont pu être trouvées, et un règlement du problème semble s'amorcer. Espérons que ce ne sera plus qu'un mauvais souvenir d'ici à quelques décennies. Cette crise aura au moins eu le mérite d'attirer l'attention sur le fait que l'activité humaine est susceptible de modifier notre environnement à grande échelle.

La pollution par l'ozone troposphérique est une question désormais plus préoccupante, car elle partage avec l'augmentation du  $CO_2$  plusieurs caractéristiques communes :

## L'ozone troposphérique

La troposphère contient environ 10 % de l'ozone atmosphérique (90 % formant la couche d'ozone stratosphérique). Son origine est presque entièrement anthropique et sa concentration moyenne, en augmentation constante, a quintuplé depuis un siècle (Marenco et al., 1994). L'ozone présente une certaine toxicité pour les plantes et les animaux. De façon générale, son augmentation modifie les propriétés oxydantes de l'atmosphère, ce qui peut avoir des conséquences sur certains équilibres chimiques naturels. Ce polluant est qualifié de **secondaire** car il n'est pas directement émis mais se forme, à travers des cycles photochimiques complexes, à partir de composés **précurseurs**, pour l'essentiel issus de combustions de combustibles fossiles : monoxyde de carbone (CO), composés organiques volatils, oxydes d'azotes (NO,  $NO_2$ ,  $N_2O_5$ , etc.). En France, l'émission de ces précurseurs est surtout le fait du trafic automobile, mais dans les pays utilisant davantage les combustibles fossiles, la part des émissions industrielles peut être importante.

L'ozone troposphérique a fait son entrée sur le devant de la scène médiatique depuis quelques années seulement, à travers la sensibilisation du public aux fameux « pics de pollution » dans les grandes villes. Ainsi, à travers le filtre des médias, l'ozone apparaît comme une préoccupation propre au milieu urbain. Cette vision est en réalité réductrice et presque dépassée.

Les concentrations en ozone les plus élevées sont, certes, mesurées en ville ou en proche périphérie. Quoique ressentis par les populations qui y sont concentrées (gènes, voire affections respiratoires), ces pics sont cependant des phénomènes sporadiques. Du reste, leur intensité a plutôt diminué depuis les années 1990 dans les pays développés – en Europe du moins –, du fait de motorisations et de procédés industriels de moins en moins émissifs (par exemple Delmas et al., 2005).

Le caractère local de cette pollution est, de plus, discutable. La chimie de l'ozone étant complexe et non instantanée, il n'est pas évident que l'ozone se forme là où ses précurseurs sont émis. Par exemple, Gregg et al. (2003) ont montré que des plans de coton souffraient d'une exposition cumulée supérieure en milieu rural, à plusieurs dizaines de kilomètres de New York, qu'en plein Manhattan ! Cela illustre que des masses d'air polluées peuvent être transportées et détectées loin des sources d'émission, même sur des distances intercontinentales (par exemple Chatfield et al., 2004). Cette pollution a donc une composante à grande échelle qu'il est tout à fait essentiel de connaître.

Enfin, une dernière idée à retenir est que l'exposition cumulée à ce gaz polluant dépend bien plus de son niveau de fond que de l'occurrence de pics sporadiques. Ainsi, l'étude de Gregg et al. (2003) établit que, paradoxalement, la concentration plus élevée des précurseurs en ville permettait une destruction plus efficace de l'ozone la nuit, et en conséquence un niveau de fond moindre qu'en campagne périurbaine.

## La surveillance de l'ozone en France

Bien que peu médiatisée, la question de la pollution de fond par l'ozone troposphérique et de son transport à grande échelle préoccupe depuis longtemps la communauté scientifique internationale.

Des réseaux de surveillance de la composition de l'atmosphère et de son changement global ont été mis en place dans des coopérations internationales, à l'échelle européenne (Emep – programme concerté de surveillance continue et d'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe) et mondiale (GAW – Global Atmosphere Watch, programme de l'Organisation météorologique mondiale pour la surveillance des changements de l'atmosphère globale).

La France est restée curieusement en retrait de ces actions concertées, bien que des séquences plus ou moins longues de mesures de l'ozone sur sites d'altitude aient été menées de façon indépendante (pic du Midi de Bigorre, puy de Dôme, observatoire de Haute-Provence). L'essentiel des moyens au sol de surveillance de l'ozone s'est concentré sur les grandes métropoles régionales en réseaux urbains de surveillance de la qualité de l'air, sous l'impulsion des collectivités locales (plus enclines à s'attaquer à la partie émergée des icebergs médiatiques).

À l'échelle du territoire national néanmoins, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) soutient le réseau Mera (Mesure des retombées atmosphériques), mis en place dans les années 1990 pour répondre à la question des pluies acides, alors sur le devant de l'actualité environnementale. L'ozone fait partie des paramètres mesurés par ce réseau d'une dizaine de stations au sol, réparties sur tout le territoire français, sur des sites ruraux de plaine ou de moyenne montagne (figure 1).

Des études récentes (Sarrat et al., 2003 ; Chevalier et al., 2006), faites à partir des données Mera et de mesures effectuées ces dernières années au pic du Midi, ont montré qu'une corrélation significative du signal d'ozone existe entre les stations, mêmes éloignées de plusieurs centaines de kilomètres ou étagées à différents niveaux d'altitude (de 115 à 2 875 mètres). Cela démontre le caractère synoptique des épisodes de

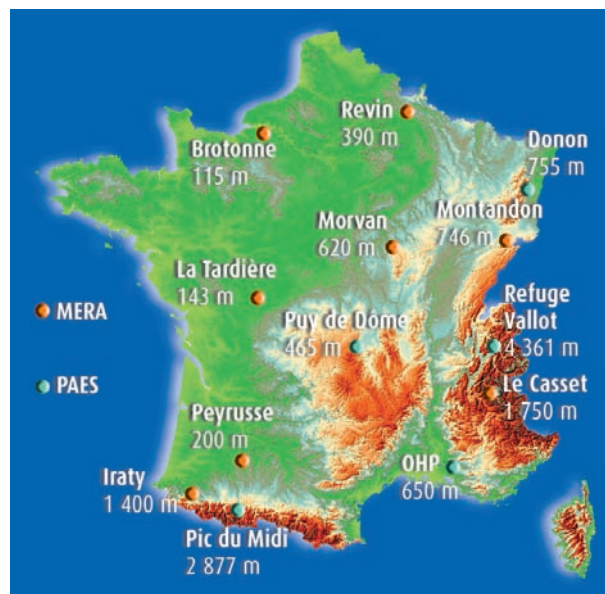


Figure 1 - Implantation géographique des stations des réseaux Mera et Paes. Les stations de l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) et du refuge Vallot ne sont encore que partiellement instrumentées et font partie du projet d'extension de Paes. À ce jour, le réseau officiel est formé par les trois stations du pic du Midi, du puy de Dôme et du col du Donon.

pollution à l'ozone et le rôle fondamental de l'ozone de la troposphère libre (partie de la troposphère au-dessus de la couche limite planétaire) dans ces épisodes.

En revanche, Mera n'opère pas de mesure du monoxyde de carbone (CO). Or ce paramètre est important, car ce gaz atmosphérique à durée de vie moyenne – de l'ordre de deux mois – est émis en grande partie depuis la surface par combustion naturelle ou anthropique, ce qui en fait un traceur typique de la basse troposphère. Ainsi, la mesure du CO est complémentaire de celle de l'ozone car il permet, par exemple, de discriminer l'origine – stratosphère ou basses couches polluées – d'une masse d'air riche en ozone. En outre, le CO intervient dans des cycles chimiques incluant l'ozone troposphérique et les radicaux hydroxyles OH (principaux oxydants atmosphériques).

## Le réseau de surveillance Paes

### Insertion et objectifs

Ce contexte national et international montre la nécessité d'un réseau de stations de mesures sur le territoire français, qui puisse :  
– fournir des mesures continues de monoxyde de carbone hors des zones urbaines ;

– compléter les stations de couche limite Mera par des mesures en altitude, sur des sites se trouvant (au moins une partie du temps) dans la troposphère libre ;

– coordonner et harmoniser des mesures en altitude existant jusque là indépendamment sur certains sites ;

– s'insérer dans les réseaux internationaux de surveillance de la pollution de fond.

La mise en place en 2004 du réseau **Paes** (Pollution atmosphérique à échelle synoptique) répond à cette attente. Paes est le fruit d'une collaboration entre l'Ademe, l'Aspa (Agence régionale de la qualité de l'air en Alsace), l'Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand (OPGC) et l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP). C'est un réseau de stations automatiques d'altitude, mesurant l'ozone et ses principaux précurseurs gazeux, ainsi que les paramètres météorologiques de base (température, pression, humidité, vent, radiation solaire), essentiels pour l'analyse et la compréhension des données chimiques. Avec un tel dispositif, Paes permet de couvrir un éventail d'objectifs scientifiques, parmi lesquels :

– le suivi du caractère synoptique (échelle du territoire national) des épisodes de pollution à l'ozone ;

– la surveillance et la caractérisation des transports de pollution transfrontaliers, en environnement de montagne (comme c'est le cas de la plupart des frontières françaises), ainsi qu'entre couche limite et troposphère libre ;

– le suivi à long terme du changement global de l'atmosphère et ses prolongements vers la prévision climatique ;

– la mise à disposition de données pour la validation des observations spatiales et des modèles numériques de chimie-transport.

## Le dispositif présent et futur

Le réseau à ce jour opérationnel est constitué de trois stations couvrant en diagonale le territoire français : la tour instrumentée du col du Donon (DON) dans les Vosges (également une station Mera), l'observatoire du puy de Dôme (PDD) dans le Massif central et la plate-forme scientifique du pic du Midi (PDM) dans les Pyrénées (figure 1 et photos ci-après). Le réseau s'appuie, d'une part, sur des équipements préexistants (des mesures d'ozone, par exemple, étaient déjà faites sur les trois sites depuis quelques années) et, d'autre part, sur des instruments spéci-

Station du réseau Paes : l'observatoire du puy de Dôme. (Photo Gilles Athier)

fiquement installés depuis 2003 pour compléter le dispositif et obtenir un réseau de mesures homogènes, tant par leur nature que par les technologies utilisées.

C'est dans une configuration initiale de trois stations d'analyse de gaz ( $O_3$ ,  $CO$ , oxydes d'azote) et de mesure des paramètres météorologiques, que le réseau Paes a reçu en 2004 une première reconnaissance officielle par l'Institut national des sciences de l'univers (Insu), avec le label « Service d'observation » et le soutien qui l'accompagne. Les perspectives d'élargissement du réseau sont cependant déjà nombreuses, concernant tant la nature des mesures que les sites d'observation.



## Nature des mesures

Certaines mesures des propriétés physico-chimiques des aérosols existent déjà sur différents sites Paes. Elles sont jusqu'à présent gérées et exploitées indépendamment par les laboratoires concernés. À l'instar du réseau d'observation des gaz déjà en place, l'OPGC a entrepris de coordonner d'ici à la fin de 2007 un réseau homogène de surveillance des aérosols qui soit intégré sous l'étiquette Paes (demande de labellisation Insu en cours) et qui constitue la contribution française au projet européen intégré Eusaar (European Supersites for Atmospheric Aerosol Research, [www.eusaar.net](http://www.eusaar.net)). Cette extension répond à un besoin, clairement exprimé par la communauté scientifique internationale, d'un suivi pérenne de la pollution particulière loin des sources urbaines, dans la mesure où l'influence majeure des aérosols sur le changement global de l'atmosphère et l'évolution du climat est reconnue, mais très mal appréhendée sur le plan quantitatif (voir par exemple le rapport du Giec, 2001, [www.ipcc.ch/pub/un/giecgt1.pdf](http://www.ipcc.ch/pub/un/giecgt1.pdf)).

## De nouveaux sites

Le réseau de surveillance des polluants gazeux va s'étendre géographiquement avec l'implantation et l'équipement de nouvelles stations. La mesure de l'ozone est depuis longtemps ancrée dans la culture de l'Observatoire de Haute-Provence (OHP), déjà équipé d'un analyseur d'ozone (les données depuis 2003

Station du réseau Paes : la tour instrumentée du col du Donon, dans le Bas-Rhin. (Photo Gilles Athier)



Station du réseau Paes :  
la plate-forme scientifique du pic du Midi  
de Bigorre, dans les Hautes-Pyrénées.  
(Photo Gilles Athier)

figurent d'ailleurs déjà dans la base de données Paes), et qui réalise également des mesures par ballon-sonde et lidar (système de télédétection reposant sur le même principe que le radar, mais utilisant un faisceau laser plutôt que micro-ondes). La station OHP a en outre été équipée d'un analyseur de CO à l'automne 2005.

Par ailleurs, étant donné la grande importance du bassin méditerranéen sur la production photochimique d'ozone en Europe du Sud, et la quasi-absence de mesures dans cette zone, l'installation d'une station complète en Corse dans un délai de deux à trois ans sera d'un intérêt majeur. Par sa situation, l'île de Beauté est en effet un observatoire de choix pour surveiller la pollution exportée depuis les régions d'émission et de production intenses que sont la région Berre-Marseille, la plaine du Pô ainsi que les agglomérations des côtes françaises (Nice, etc.) et italiennes (Gênes, Pise, etc.). Une première expérience test de mesures en altitude d'ozone et monoxyde de carbone a été menée de juin à octobre 2006 sur l'île, en collaboration avec le Service d'aéronomie et la nouvelle agence agréée de surveillance de la qualité de l'air, Qualitair Corse. L'implantation d'une station définitive se fera progressivement à partir de 2007.

Enfin, un site de très haute altitude, l'observatoire Vallot-Cosmiques dans le massif du mont Blanc (géré par le Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement de Grenoble), est prévu au dispositif Paes, mais les difficultés techniques liées à l'environnement de haute montagne ne permettent pas encore de prévoir le développement de cette station dans un futur proche.

### Des développements permanents

L'état actuel et les perspectives d'équipement et d'extension du réseau, en ce qui concerne la mesure des gaz, sont résumés dans le tableau 1.

Il est à noter que l'équipement des stations n'a pu se faire, et ne peut être poursuivi, sans un effort préalable de



développement instrumental spécifique, mené à l'OMP et à l'OPGC depuis plusieurs années. En effet, les analyseurs de gaz et de particules que l'on trouve dans le commerce sont généralement adaptés à la mesure de la pollution urbaine, où les concentrations rencontrées sont élevées. Mais la dilution des panaches urbains dans l'atmosphère implique, loin des sources, des niveaux de pollution beaucoup plus faibles, parfois en limite de sensibilité des appareils commerciaux. C'est le cas pour le monoxyde de carbone, par exemple ; une modification d'analyseurs de CO commerciaux a donc dû être réalisée pour permettre une mesure fiable à bas niveau de pollution. Certains appareils n'étaient pas non plus conçus pour une utilisation permanente et à long terme ; là aussi des améliorations ont dû être apportées. Enfin, étant

donné la relative difficulté d'accès aux sites d'altitude, des procédures automatiques, notamment d'étalonnage et de transfert des données, ont également dû être imaginées.

À terme, Paes a l'ambition d'atteindre un standard qualité (couverture temporelle des mesures, procédures et fréquence d'étalonnage, etc.) permettant de contribuer aux bases de données Mera, au niveau national, et Emep, au niveau européen.

### La base de données

Les données récoltées par le réseau Paes sont destinées à la recherche scientifique – en dehors de toute utilisation commerciale – et par conséquent laissées en libre

Tableau 1 - État de fonctionnement du réseau Paes et des futures stations. Les millésimes indiquent les dates prévues de mise en service. La colonne de droite (« → B.D. ») indique les procédures de transfert vers la base de données.

	Station	Ozone	CO	NO <sub>x</sub>	NO <sub>y</sub>	Météo	→ B.D.
Sites officiels	Col du Donon	Oui	Oui	Oui	-	Oui	Automatique
	Pic du Midi	Oui	Oui	-	Fin 2006	Oui	Automatique
	Puy de Dôme	Oui	Oui	Oui	Fin 2006	Oui	Automatique
Futurs sites	Obs.Hte-Prov.	Oui	Oui		?	Oui	Manuel
	Corse		2007	2007		?	?

accès en ligne, sur le site <http://Paes.aero.obs-mip.fr>, ou également à travers le portail Ether : <http://ether.ipsl.jussieu.fr/public/expeth.F.html>. La base de données et le site Internet Paes sont hébergés et gérés par l'Observatoire Midi-Pyrénées. Ce site permet l'extraction de tableaux de valeurs à l'aide d'une interface web simple d'utilisation. Un outil graphique de prévisualisation rapide est également proposé pour guider l'utilisateur dans le choix des données qu'il souhaite extraire pour son traitement personnel.

À ce jour, un peu plus de deux ans de mesures d'ozone et de monoxyde de carbone sont disponibles sur la base de données pour les trois sites, avec un taux de couverture temporelle d'environ 90 % pour l'ozone et 70 % pour le CO. Les différents paramètres disponibles sont détaillés dans le tableau 2.

Le pas d'échantillonnage temporel nominal des données de la base est de cinq minutes – chaque quantité fournie dans la base représentant la mesure moyenne sur cette durée. Cependant, ce pas diffère pour la station du Donon, du fait de contraintes inhérentes au fonctionnement de cette tour instrumentée. Les durées d'échantillonnage sont consignées dans le tableau 3.

À côté de cette base de données officielle, correspondant au Service d'observation labellisé, est proposée une base de données étendue intégrant d'autres sites de mesure – notamment les sites pressentis pour intégrer le réseau Paes dans les prochaines années – et d'autres paramètres mesurés – par exemple, le nombre de particules solides par unité de volume, préfigurant le réseau Paes-Aérosols. La disponibilité, la continuité temporelle et la validation de ces données supplémentaires ne sont cependant pas garanties. La base de données étendue est consultable sur <http://paes.aero.obs-mip.fr/paes+.html>.

## Quelques premiers résultats

Sur l'année 2005, les stations rendent bien compte de résultats attendus concernant l'ozone (figure 2a). Elles montrent toutes nettement son cycle saisonnier, avec une concentration de fond minimale en hiver, puis remontant au printemps pour atteindre une valeur de 15 à 30 ppb (partie par milliard) plus élevée à partir du mois d'avril ou de mai. À cette variation saisonnière s'ajoute une variabilité (représentée ici par l'écart type) due aux conditions météorologiques changeantes et à la photochimie de

	Catégorie	Stations	Instrument	Unité	Sensibilité
Rapport de mélange en O <sub>3</sub>	Gaz	3	Absorption des UV	ppb	1 ppb
Rapport de mélange en CO	Gaz	3	Chromatographe	ppb	5 ppb
Rapport de mélange en NO + NO <sub>2</sub>	Gaz	PDD DON	Chimiluminescence	ppb	0,1 ppb
Rapport de mélange de tous oxydes de N	Gaz	PDM PDD	Chimiluminescence	ppb	0,1 ppb
Température	Météo	3	Capteur PT100	°C	0,1 °C
Pression	Météo	3	Capteur de pression	hPa	0,1 hPa
Direction du vent	Météo	3	Capteur à ultrasons	degré d'angle (°)	4 °
Vitesse du vent instantané	Météo	3	Capteur à ultrasons	m/s	0,1 m/s
Vitesse moyenne du vent	Météo	3	Capteur à ultrasons	m/s	-
Humidité relative	Météo	3	Capteur d'humidité	%	1 %
Rayonnement solaire diffus	Météo	PDD	Pyranomètre	W/m <sup>2</sup>	
Rayonnement UV global	Météo	PDD	Radiomètre	W/m <sup>2</sup>	
Rayonnement solaire global	Météo	PDM PDD	Pyranomètre	W/m <sup>2</sup>	1 W/m <sup>2</sup>
Précipitations	Météo	PDD	Pluviomètre	mm/h	

Tableau 2 - Paramètres disponibles dans la base de données Paes.

l'ozone. Cette variabilité apparaît de plus grande amplitude en été, du fait d'une activité photochimique plus intense. L'amplitude de cette variabilité est cependant moindre au pic du Midi, situé à une altitude plus élevée et moins influencé par la photochimie, active surtout dans les basses couches. En ce sens, la station du pic du Midi apparaît comme la plus représentative de la troposphère libre pour la mesure de l'ozone (pour plus de précision, voir la conclusion de cet article, ainsi que Gheusi et al., 2006b, à paraître). Enfin, la concentration de fond au pic

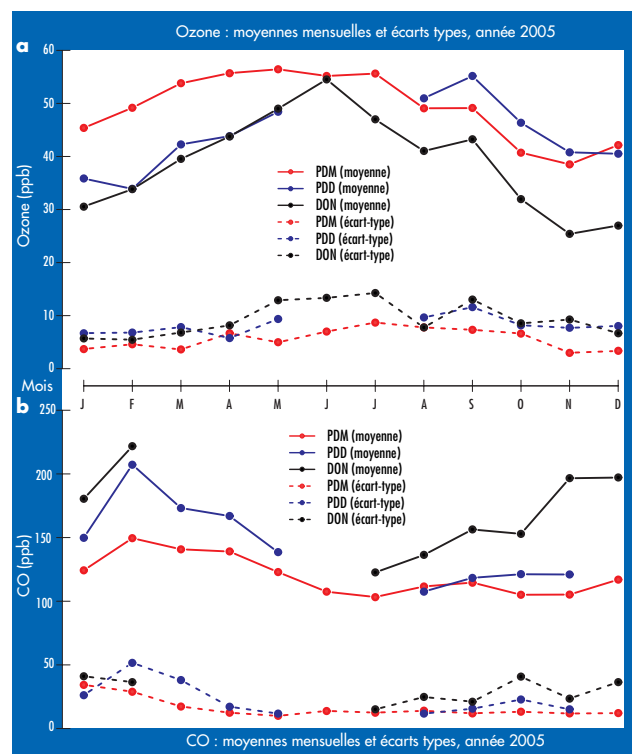


Figure 2 - Moyennes mensuelles et écarts types des niveaux d'ozone et de CO aux stations Paes pour l'année 2005 ; statistiques calculées sur la base de moyennes journalières.

	O <sub>3</sub>	CO	NOx/y	Météo
<b>Donon</b>	60 min	15 min	60 min	15 min
<b>Pic du Midi</b>	5 min	5 min	5 min	5 min
<b>Puy de Dôme</b>	5 min	5 min	5 min	5 min

Tableau 3 - Périodes d'échantillonnage des données Paes.

du Midi est, la majeure partie du temps, supérieure à celle des autres stations, traduisant l'augmentation de la concentration moyenne en ozone dans les premiers kilomètres de la troposphère.

Quant au monoxyde de carbone (CO), sa concentration à toutes les stations est minimale en été, et augmente en fin d'automne pour atteindre un maximum en fin d'hiver et en début de printemps (figure 2b). Le CO est un gaz essentiellement produit par combustion de matière organique, et faiblement réactif. Il n'est donc pas étonnant que sa concentration soit globalement plus élevée aux deux stations les plus basses (PDD et DON), plus directement sous l'influence des émissions en surface. En outre, la concentration en CO (forme plus réduite que le CO<sub>2</sub>) est contrôlée par les espèces les plus oxydantes dans l'atmosphère : l'ozone et les radicaux OH, présents surtout quand la photolyse est intense (printemps et été). Ainsi, le CO s'accumule durant les mois d'automne et d'hiver tant que l'atmosphère reste faiblement oxydante,

mais l'augmentation de l'ozone au printemps s'accompagne d'une destruction progressive du CO jusqu'aux mois d'été.

L'examen des cycles diurnes, d'ozone et de monoxyde de carbone, en moyenne sur l'été 2005, au pic du Midi (figure 3) révèle un résultat moins classique : l'ozone est minimal le jour et maximal la nuit, ce qui est l'inverse de ce qui est en général observé à basse altitude (par exemple au Donon ou par les stations Mera) où la concentration est pilotée par la production photochimique diurne et la destruction nocturne. Ce cycle inversé est particulièrement bien marqué les jours ensoleillés (une dizaine de ppb d'amplitude), mais reste nettement détectable en moyenne sur une saison (figure 3) et même sur plusieurs années complètes (Chevalier et al., 2006) ; en outre, il a été observé sur d'autres sites d'altitude (par exemple Naja et al., 2004). Quant au CO, il évolue en opposition de phase, ce qui laisse penser que le pic du Midi est soumis à l'influence de la couche limite en journée (cette hypothèse est renforcée par l'évolution de l'humidité relative et de la concentration en particules solides, toutes deux en phase avec le CO). Il est

donc probable que les plus faibles concentrations d'ozone en journée résultent d'un transport d'air « propre » des basses couches vers le sommet. En effet, même au maximum diurne de production photochimique, la concentration d'ozone dans les basses couches reste en général inférieure à la concentration moyenne à l'altitude du pic du Midi, du fait du profil d'ozone moyen fortement croissant dans les premiers kilomètres de la troposphère.

## Conclusion

S'il est encore en phase de développement et d'extension, le dispositif Paes a déjà fourni un jeu de données faisant la preuve de son adéquation à ses objectifs scientifiques et de son potentiel d'intégration aux bases de données nationales et internationales par la qualité des données et de la couverture temporelle. Les premiers résultats montrent cependant que l'observation de la troposphère libre à partir de stations de surface, même très élevées en altitude, ne va pas immédiatement de soi et que ces stations subissent parfois l'influence de la surface et de leur proche environnement. Cette influence est à priori propre à chaque site, et il convient de l'étudier au cas par cas. C'est en partie dans cet objectif que s'est déroulée, durant l'été 2005, la campagne de mesures Pic 2005 dans la région du pic du Midi, qui sera présentée dans un article associé à celui-ci (Gheusi et al., 2006b, à paraître).

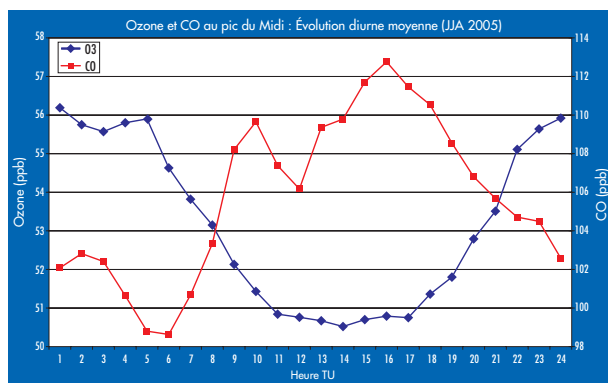


Figure 3 - Evolutions diurnes moyennes de l'ozone et du CO au pic du Midi sur la période 1<sup>er</sup> juin - 31 août 2005 (moyennes sur environ 90 journées pour l'ozone, 60 pour le CO).

## Remerciements

Le Service d'observation Paes reçoit le soutien récurrent de l'Insu et de l'Ademe.

## Bibliographie

- Chevalier A., C. Sarrat, F. Gheusi, R. Delmas, V. Thouret et R. Zbinden, 2006 : *Ozone observation in France and Switzerland by Mera and Paes surface station networks between 2001 and 2004*. European Geosciences Union General Assembly, 2-7 avril 2006, Vienne, Autriche.
- Delmas R., G. Mégie et V. H. Peuch, 2005 : *Physique et chimie de l'atmosphère*, chap. 3, Belin, Paris, 639 p.
- Gheusi F., B. Campistron, R. Delmas, A. Chevalier, P. Bouchou, G. Athier, J. Brioude, J.-P. Cammas, J.-M. Cousin, J. Escobar, Y. Meyerfeld et M. Tressol, 2006 (b) : Ozone et pollution atmosphérique à grande échelle (2) : la campagne de mesures Pic 2005. Soumis à *La Météorologie*.
- Gregg J. W., C. G. Jones et T. E. Dawson, 2003 : Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature*, 424, 183-187.
- Naja M., S. Lal et D. Chand, 2003 : Diurnal and seasonal variabilities in surface ozone at a high altitude site Mt Abu (24.6°N, 72.7°E, 1680 m asl) in India. *Atmospheric Environment*, 37, 4205-4215.
- Sarrat C., R. Delmas et V. Thouret, 2003 : *Mise en place d'un réseau d'altitude pour l'étude de la pollution à l'échelle synoptique*. Rapport final, convention Ademe-UPS n° 0362C0041.