



**HAL**  
open science

## Ozone et pollution atmosphérique à grande échelle (2) La campagne de mesures Pic 2005

François Gheusi, Amandine Chevalier, François Ravetta, Hervé Delbarre,  
Bernard Campistron, Robert Delmas, Paul Bouchou, Gilles Athier, Jérôme  
Brioude, Jean-Pierre Cammas, et al.

► **To cite this version:**

François Gheusi, Amandine Chevalier, François Ravetta, Hervé Delbarre, Bernard Campistron, et al.. Ozone et pollution atmosphérique à grande échelle (2) La campagne de mesures Pic 2005. La Météorologie, 2007, Numéro 59, pp.31-38. insu-02162979

**HAL Id: insu-02162979**

**<https://insu.hal.science/insu-02162979>**

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 (2)

## La campagne de mesures Pic 2005

**François Gheusi<sup>(1)</sup>, Amandine Chevalier<sup>(1)</sup>, François Ravetta<sup>(2)</sup>, Hervé Delbarre<sup>(3)</sup>, Bernard Campistron<sup>(1)</sup>, Robert Delmas<sup>(1)</sup>, Paul Bouchou<sup>(1)</sup>, Gilles Athier<sup>(1)</sup>, Jérôme Brioude<sup>(1)</sup>, Jean-Pierre Cammas<sup>(1)</sup>, Jean-Marc Cousin<sup>(1)</sup>, Juan Escobar<sup>(1)</sup>, Yves Meyerfeld<sup>(1)</sup>, Marc Tressol<sup>(1)</sup>, Gérard Ancellet<sup>(2)</sup>, Augustin Colette<sup>(2)</sup>, Patrick Augustin<sup>(3)</sup>, Marc Fourmentin<sup>(3)</sup> et Céline Leroy<sup>(3)</sup>.**

(1) Laboratoire d'aérodynamique - Observatoire Midi-Pyrénées - Université de Toulouse  
14, rue Édouard-Belin - 31400 Toulouse  
ghef@aero.obs-mip.fr

(2) Service d'aéronomie - Institut Pierre-Simon-Laplace - Paris

(3) Laboratoire de physique et chimie de l'atmosphère - Université de Dunkerque

## Résumé

La campagne de mesures intensives « Pic 2005 », menée en juin et juillet 2005, visait, en premier lieu, une meilleure compréhension de la structure spatio-temporelle du champ d'ozone au niveau du pic du Midi (2 875 m, dans les Pyrénées centrales), station de mesures automatiques du réseau Paes (*La Météorologie*, n° 58). L'article résume le contexte scientifique de la campagne, décrit le dispositif expérimental qui a été déployé, et illustre les observations effectuées ainsi que les axes de recherche poursuivis.

## Abstract

**Ozone and atmospheric pollution at synoptic scale: the Pic 2005 field campaign**

The « Pic 2005 » field experiment took place in June and July 2005 around the Pic du Midi (2 875m asl, in the central Pyrenees). Its main goal was to investigate the spatial and temporal structure of the ozone field around that summit, which is a permanent measurement site of the Paes network (*La Météorologie*, no 58). The article provides a summary of the scientific context, a description of the observation network deployed for the campaign, and an illustrative panel of the collected observations and main lines of research.

## Le pic du Midi de Bigorre, une station du réseau Paes

Dans la première partie de cet article (Gheusi et al., 2007), publié dans *La Météorologie* n° 58, a été présenté en détail le nouveau réseau français d'observation permanente Paes (Pollution atmosphérique à échelle synoptique : <http://paes.aero.obs-mip.fr>), composé de stations de surface implantées sur des sites d'altitude, et mesurant, depuis juillet 2004, les concentrations en ozone, monoxyde de carbone, oxydes d'azote et les paramètres météorologiques principaux (vent, température et humidité de l'air).

Parmi les stations à ce jour opérationnelles, la plus élevée en altitude est celle du pic du Midi de Bigorre (2 875 m, dans les Hautes-Pyrénées). Les observations récentes de Paes, et d'autres plus anciennes au pic du Midi, ont confirmé l'intérêt de ce site pour suivre la composition chimique de fond de la troposphère libre et les transports de polluants qui ont lieu en son sein sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres, voire plus (Chevalier et al., 2007).

Les premières analyses des données Paes font apparaître que, en altitude et à bonne distance des villes, les concentrations mesurées au pic du Midi montrent des composantes traduisant l'influence de l'environnement local : dynamique liée au relief, oscillations diurnes (brises et convection), pollutions proches (par exemple, celles liées aux activités sur la plate-forme même du pic du Midi : restauration, etc.). En particulier, différents paramètres (ozone, monoxyde de carbone, humidité, force et direction du vent) présentent un cycle diurne très marqué. Cette oscillation diurne ne disparaît pas en moyenne pluriannuelle (Chevalier et al., 2006), ce qui traduit une influence dominante du rayonnement solaire sur le phénomène. Elle est d'autant plus marquée que les conditions météorologiques sont chaudes et ensoleillées, l'été étant donc la saison la plus favorable à son observation.

Cette oscillation diurne de l'ozone est en outre d'autant plus intéressante qu'elle est atypique : elle apparaît en opposition de phase par rapport au cycle de production photochimique diurne/destruction chimique nocturne, observé habituellement à basse altitude, en milieu urbain, mais aussi rural. La figure 1 illustre ce phénomène, en moyenne, sur l'été 2005.

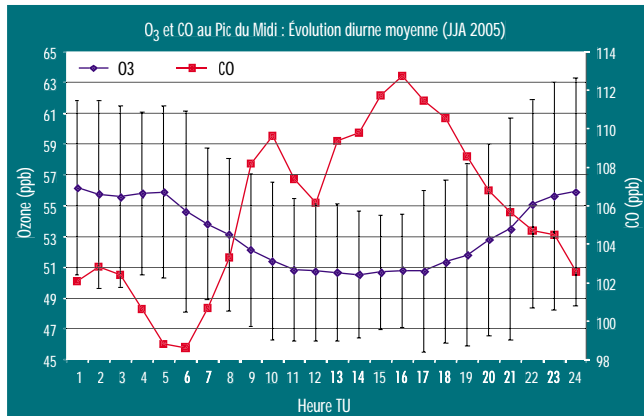


Figure 1 - Évolutions diurnes moyennes de l'ozone ( $O_3$ ) et du monoxyde de carbone (CO) au pic du Midi sur la période 1<sup>er</sup> juin - 31 août 2005 (moyennes sur environ 90 journées pour l'ozone, sur 60 pour le monoxyde de carbone). La variabilité de l'ozone (barres verticales représentant l'écart type) est représentée ici affranchie de sa composante liée aux fluctuations d'un jour sur l'autre du niveau de fond (moyenne journalière).

## Connaître l'environnement des sites Paes

Le rôle du transport vertical lié à l'environnement montagneux est probable pour expliquer cette cyclicité diurne. Les zones montagneuses sont en effet connues comme cause importante de brassage vertical des basses couches atmosphériques, impliquant un transport ascendant des polluants émis en basse couche vers la troposphère libre (cf., par exemple, Henne et al., 2005). Les circulations thermiques de pente (brises) sont particulièrement efficaces pour assurer ce transfert, mais on peut citer aussi des phénomènes d'origine dynamique tels que les rotors, la turbulence de sillage, etc., et également la convection humide (cumulus et cumulonimbus), particulièrement favorisée en montagne.

Il apparaît donc essentiel, si l'on veut savoir interpréter le signal fourni par une station d'altitude et pouvoir distinguer ses différentes composantes (globale, synoptique, régionale, locale), de connaître l'environnement particulier de chaque site et son influence sur les grandeurs mesurées, et ce dans divers types de situa-

tions bien caractérisées : temps anti-cyclonique, où les mouvements de l'air et la chimie sont contrôlés par le rayonnement solaire et tellurique ; flux synoptiques impliquant différents régimes d'écoulement sur le relief et des transports de masses d'air de différentes origines géographiques, etc.

Pour accéder à cette connaissance, il est indispensable de déployer de plus amples moyens d'observation autour du site concerné, au moins dans le cadre d'une campagne de mesures limitée dans le temps. La modélisation numérique peut ensuite, en s'appuyant sur les observations récoltées, venir en complément pour une vision tridimensionnelle plus complète des phénomènes, et la caractérisation des mécanismes à l'œuvre.

C'est dans ce but qu'a démarré, avec la campagne Pic 2005 en juin et juillet 2005, une série d'études pilotes, lesquelles seront menées autour des sites Paes dans les prochaines années. La première d'entre elles s'est intéressée au site du pic du Midi, et s'est déroulée du 17 juin au 6 juillet 2005.

## Le dispositif Pic 2005

Le dispositif expérimental déployé pour Pic 2005 visait à associer à la station Paes du pic du Midi des observations analogues ou complémentaires sur des sites environnants. Parmi eux, on peut distinguer :

- des sites de montagne à proximité immédiate du sommet (moins de 4 km à vol d'oiseau), la vallée de Lesponne et le col de Sencours ;
- le Centre de recherches atmosphériques (CRA) de Lannemezan (Hautes-Pyrénées), situé à 650 m d'altitude dans le piémont pyrénéen, à 28 km au nord-est du pic du Midi.

Les sites de montagne sont indiqués sur la figure 2 présentant la topographie des abords du pic du Midi (PDM). La vallée de Lesponne s'étend au nord-ouest du pic, sur un axe sud-ouest/nord-est. C'est une vallée assez étroite et entièrement boisée (feuillus) sur ses flancs. Au fond, une route à faible trafic longe un ruisseau et se termine en cul-de-sac au niveau du hameau du Chiroulet, à environ 1 100 m d'altitude. La centrale hydroélectrique de l'Aya (1 050 m) se situe à environ 1 km en aval du Chiroulet. Elle se situe à l'entrée d'un vallon tributaire grimpaient directement vers le sud-est au pic du Midi. Ces deux sites, le Chiroulet (CHI) et la centrale de l'Aya (AYA), ont été choisis pour leur situation en fond d'une vallée, proche du pic du Midi et peu polluée par le trafic routier, ainsi que pour leur facilité d'accès.



Figure 2 - Carte topographique des environs du pic du Midi (PDM) et localisation des sites de mesures voisins : AYA, CHI et col de Sencours. Hors de la carte, à 28 km au nord-est du pic du Midi, se situe le Centre de recherches atmosphériques de Lannemezan (CRA), dernier site de mesures et centre des opérations. (Fond de carte : Institut géographique national).

Le col de Sencours (2 380 m) est situé à 500 m en contrebas du sommet du pic du Midi (2 875 m), directement au pied de sa face sud (40-45° de pente). La configuration du terrain est bien visible sur la figure 3. Ce site, à proximité immédiate du sommet, est accessible par une piste carrossable depuis le col du Tourmalet. C'est ce qui a guidé le choix du site. Il est à noter que c'est au col de Sencours que les premières observations atmosphériques au pic du Midi - ozone et météo - ont été réalisées par le général de Nansouty entre 1874 et 1910 (des détails



Figure 3 - Camion lidar Ulco du LPCA installé au col de Sencours (2 380 m), juste sous le sommet du pic du Midi (2 875 m), dont les installations (antenne, bâtiments, téléphérique) sont bien visibles. La photo vise approximativement vers le nord. (Photo Marc Fourmentin)

sur ces observations historiques sont donnés dans Marengo et al., 1994, et références internes).

Le CRA est une antenne permanente de l'observatoire Midi-Pyrénées et de l'université Paul-Sabatier de Toulouse, regroupant des moyens lourds d'observation de l'atmosphère (en particulier un important parc de radars), dont certains ont été mis en œuvre dans le cadre de Pic 2005. Les infrastructures du CRA ont aussi grandement facilité le déploiement de moyens spécifiques à la campagne. Le CRA a, enfin, servi de centre des opérations pour cette campagne de mesures.

Le dispositif de Pic 2005 comprenait :

- des stations supplémentaires de mesures au sol :

- de la composition en  $O_3$  et CO sur les sites CRA et AYA ;

- des paramètres météo principaux (température, pression, humidité relative, vitesse et direction du vent, rayonnement total) sur les sites CRA et CHI ;
- des observations par télédétection (encadré ci-contre) :

- le lidar **Alto**, basé au CRA ;

- le lidar mobile **Ulco** ; installé à bord d'un camion (figure 3), ce lidar était stationné principalement au CRA, sauf pour deux journées d'observation (2 et 3 juillet), où il a été apporté au col de Sencours ;

- les radar profileurs de vent VHF et UHF installés au CRA et fonctionnant en mode de surveillance continue.

|                  | CRA                 | PDM/<br>Sencours | AYA/CHI |
|------------------|---------------------|------------------|---------|
| Analyseur $O_3$  | X                   | X                | X       |
| Analyseur CO     | X                   | X                | X       |
| Analyseur $NO_x$ | -                   | X                | -       |
| Météo            | X                   | X                | X       |
| Lidar Alto       | X                   | -                | -       |
| Lidar Ulco       | Sauf<br>2-3 juillet | 2-3 juillet      | -       |
| Profileur VHF    | X                   | -                | -       |
| Profileur UHF    | > 23 juin           | -                | -       |

Tableau 1 - Moyens d'observation déployés sur les trois principaux sites de mesures.

Le tableau 1 synthétise les moyens d'observation déployés sur les différents sites de mesure. Notons qu'étant donné la grande proximité de certains d'entre eux (moins d'un kilomètre), sont considérés comme colocalisés les sites du pic du Midi et du col de Sencours d'une part, du Chiroulet et de l'Aya d'autre part. Concernant ces deux derniers sites, les mesures météo et chimie n'ont pu être installées exactement au même endroit pour des raisons pratiques : la centrale

## Les instruments de télédétection

Cet encadré fournit quelques détails sur les instruments d'observation par télédétection au sol utilisés pour la campagne Pic 2005. Une description plus générale de ces types d'instruments pourra être trouvée dans les articles de Mauprivez et Sandra, et de Dabas et Flamant, parus dans *La Météorologie* n° 39 (2002), numéro spécialement consacré aux observations.

### Le lidar Alto

C'est un radar optique travaillant dans l'ultraviolet (<http://www.aero.jussieu.fr/themes/PCT/alto.html>). Il mesure le profil vertical de la concentration en ozone par absorption différentielle. Cet instrument a été développé au Service d'aéronomie du CNRS (Ancellet et Ravetta, 1998). Il permet l'étude des distributions d'ozone dans la troposphère à méso échelle lorsqu'il est utilisé sur un avion à rayon d'action limité du type ATR42, à plus grande échelle et dans la basse stratosphère lorsqu'il est monté sur un avion à réaction du type Mystère 20. Depuis plusieurs années déjà, cet instrument est aussi déployé au sol lors de campagnes de mesures du transport des polluants dans les basses couches de l'atmosphère (Ancellet et Ravetta, 2003). On peut citer la campagne Escompte en 2001 (Durand et Cros, 2004), consacrée à l'étude de la pollution photo-oxydante dans la région de Marseille-Berre, ou la campagne Itop en 2004 dédiée à l'étude du transport intercontinental de la pollution entre les États-Unis et l'Europe. Installé au CRA lors de la campagne Pic 2005, ce lidar a permis de documenter la distribution de l'ozone entre 1 et 5 km d'altitude, avec une résolution temporelle de quelques minutes et une résolution verticale de quelques centaines de mètres.

### Le lidar mobile Ulco

Exploité par le Laboratoire de physico-chimie de l'atmosphère (LPCA-UMR CNRS 8101, Dunkerque), c'est un lidar à absorption différentielle dans le domaine ultraviolet, dont le cœur optique est un laser accordable de type titane-saphir. La portée kilométrique et la possibilité de balayer l'espace à l'aide d'un périscope en font un instrument de mesure adapté à l'analyse de la structure et la pollution des basses couches de la troposphère (voir par exemple Delbarre et al., 2005). Dans cette campagne, la distribution verticale d'ozone a pu être réalisée en alternant des impulsions lumineuses de longueur d'onde 282,4 nm et 286,3 nm. Notons cependant que d'autres polluants comme les dioxydes de soufre et d'azote ainsi que quelques composés organiques volatils sont également accessibles.

### Les radars profileurs de vent

Ils peuvent fonctionner en bande VHF (45 MHz) ou UHF (1 280 MHz). Leur utilisation est complémentaire, ce qui permet d'obtenir des profils de vent à cadence rapide entre 80 m et 15 km d'altitude quel que soit le type de conditions météorologiques – air clair ou sous précipitations – (Campistrone et al., 1999 ; Jacoby-Koaly et al., 2002). Les trois composantes du vent sont déduites en combinant les vitesses radiales (déduites par effet Doppler) observées dans plusieurs directions de visée. En outre, la largeur spectrale Doppler contient une information sur la turbulence, et la réflectivité radar est liée à la thermodynamique du milieu. L'origine principale des échos provient en effet des fluctuations spatiales de la vapeur d'eau et de la température. Une autre source importante de rétrodiffusion, surtout en bande UHF, est associée aux précipitations de pluie ou de neige.

Le radar VHF, qui est une composante du réseau Insu/Météo, a été installé au CRA en 1993. Il fonctionne en mode de surveillance continue depuis 2001 dans le cadre du réseau de profileurs européen Cwinda auquel il envoie chaque heure des profils de vent (<http://www.metoffice.com/research/interproj/cwinda/profiler/index.html>). Un profil vertical des paramètres du vent entre 2 et 16 km par pas de 375 m est obtenu toutes les 15 minutes environ.

Les observations par profileurs de vent UHF ont débuté au CRA en 1996 dans le cadre d'un partenariat avec le département de recherche et développement d'EDF. Lors de la campagne Pic 2005, le radar UHF a fonctionné en continu sur un cycle répétitif d'environ 3 minutes, composé d'un mode haut et un mode bas – mais la résolution temporelle réelle due au traitement de données était d'environ 20 minutes. Pour le mode bas les mesures étaient prises avec une résolution de 75 m depuis 70 m jusqu'à près de 3 000 m de hauteur par pas de 40 m. Dans le mode haut, la résolution était de 375 m (suréchantillonnage à 150 m) depuis 370 m jusqu'à près de 6 km.

hydroélectrique de l'Aya s'est révélée être le meilleur site, tant pour l'installation des analyseurs chimiques que par sa situation par rapport au pic du Midi. Mais, en revanche, ce site, situé au milieu des arbres, ne convenait pas à la mesure du vent.

Notons également qu'une mesure du rapport de mélange total en oxydes d'azote (désignés globalement par  $NO_x$ ), prévue dans le dispositif Paes mais pas encore opérationnelle, a été conduite au pic du Midi, en test, durant la campagne Pic 2005.



## Le choix des Périodes d'observation intensive (POI)

Si les stations automatiques au sol (météo et mesures chimiques) ainsi que les radars profilers VHF et UHF ont fonctionné en continu pendant la campagne, cela n'était pas possible avec les lidars, dont le bon fonctionnement nécessite une surveillance active. Un fonctionnement quotidien systématique n'était pas non plus envisageable, car, outre les contraintes humaines et matérielles, les lidars ne peuvent fonctionner utilement qu'en l'absence de nuages.

Pour cette campagne de mesures (comme pour la plupart d'ailleurs), il était donc nécessaire de coordonner les mesures lidar en les concentrant dans quelques Périodes d'observation intensive (POI) – ici d'une journée chacune – planifiées un ou deux jours à l'avance. Cela impliquait un support prévisionnel, non seulement pour la météo – qui conditionnait la possibilité même des mesures lidar – mais aussi pour la composition chimique de l'atmosphère, afin de juger a priori de l'intérêt scientifique des deux ou trois journées à venir.

## Les prévisions météorologiques pour la campagne

Outre les prévisions opérationnelles librement accessibles sur Internet (Météo-France, Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme, etc.), le Laboratoire d'aérodologie a mis au point sa propre chaîne de prévision à haute résolution, avec le modèle MésosNH (modèle de recherche communautaire développé par Météo-France et le Laboratoire d'aérodologie), qui tournait sur les moyens de calculs propres au laboratoire (grappes de PC). Le modèle comprenait deux domaines imbriqués centrés sur le pic du Midi : un domaine extérieur, à 12 km de résolution horizontale, et de surface 600 x 600 km<sup>2</sup> ; un domaine intérieur à 3 km de résolution, de 108 x 108 km<sup>2</sup>. Une telle finesse de résolution était requise pour que la topographie du modèle représente raisonnablement le pic du Midi et les principales vallées voisines (les modèles opérationnels, à des résolutions de l'ordre de 10 km, fournissent une représentation trop lissée du relief, où le pic du Midi n'apparaît même pas en tant que tel). Les conditions aux limites du modèle extérieur étaient alimentées par

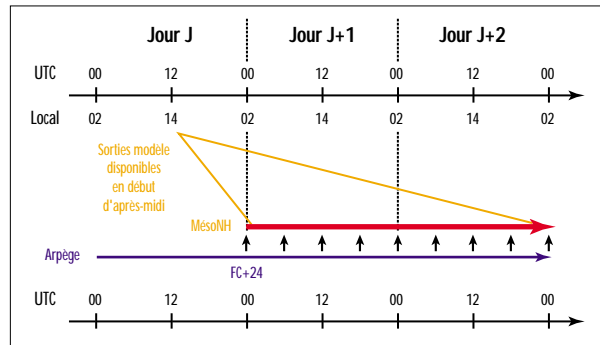


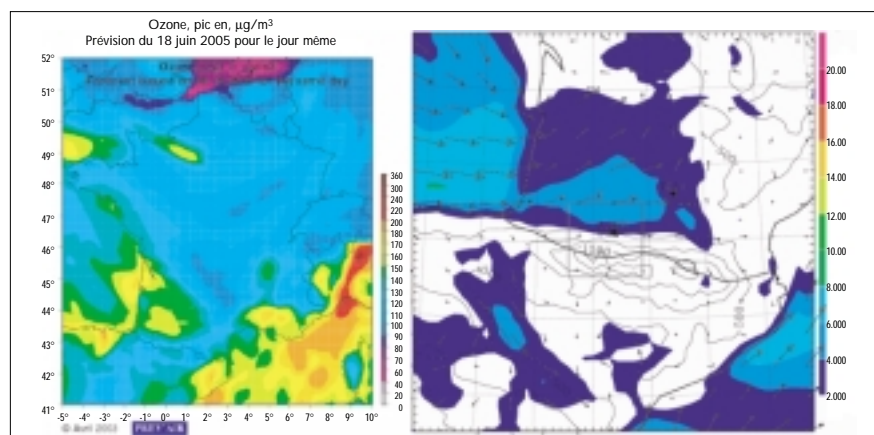
Figure 4 - Échéancier des prévisions MésosNH. Celui-ci démarrait à partir de la prévision Arpège 00 UTC + 24 h. Les prévisions + 30 h à + 72 h servaient au forçage des conditions aux limites de MésosNH toutes les six heures.

le modèle opérationnel de prévision de Météo-France (Arpège). Enfin, les sorties graphiques du modèle incluaient des diagnostics non standard adaptés aux objectifs de la campagne : rétrotrajectoires aboutissant aux sites de mesures (pour connaître l'origine des masses d'air), traceurs de couche limite (pour visualiser les échanges entre la couche limite et la troposphère libre), etc. Les prévisions MésosNH pour les jours J+1 et J+2 étaient disponibles le jour J vers 14 heures locales (figure 4) et étaient consultables en ligne par tous les participants de la campagne.

## Utilisation du système de prévision Prév'air

Le système Prév'air ([www.prevaire.org](http://www.prevaire.org)) de surveillance et de prévision de la qualité de l'air en France et en Europe est mis en œuvre à l'Ineris, depuis le printemps 2003, en coopération avec le CNRS, Météo-France et l'Ademe. Les données numériques générées par le système sont exploitées afin de :  
– fournir des prévisions de concentrations de polluants atmosphériques (ozone, NO<sub>2</sub>, particules) à trois jours d'échéance et à différentes échelles spatiales ;

Figure 5 - À gauche : prévision Prév'air de la concentration maximale d'ozone en surface le 18 juin 2005. À droite : prévision MésosNH du vent à 10 mètres (en m/s), le 19 juin à 6 h UTC. Les deux modèles laissaient prévoir que de l'air pollué en ozone produit le 18 sur la côte nord espagnole serait transporté dans la nuit jusqu'à Lannemezan, par une entrée maritime longeant les Pyrénées. En effet, un coup de vent d'ouest, accompagné d'une montée de l'ozone jusqu'à environ 60 ppb (120 µg/m<sup>3</sup>), a bien été enregistré au CRA le 19 juin vers 3 h UTC.



– élaborer des analyses des concentrations en ozone (cartographies réalisées a posteriori en intégrant les résultats de modélisation et les observations disponibles).

Prév'air délivre également des cartes d'observations en temps réel, présentant les mesures réalisées en France par les agences agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA), avec plusieurs mises à jour quotidiennes. Pendant la campagne Pic 2005, ce sont surtout les cartes de prévision Prév'air qui ont été consultées, mais les cartes d'analyse ont été ensuite très utiles pour l'exploitation scientifique. Un exemple d'utilisation couplée de MésosNH et Prév'air pour la prévision est donné figure 5.

## Utilisation de rétrotrajectoires

La chaîne de prévision MésosNH produisait des (ré)trajectoires aboutissant aux sites de mesure. Cependant, l'extension limitée du modèle ne permettait d'évaluer l'origine des masses d'air qu'à court terme et à l'échelle régionale. C'est pourquoi des rétrotrajectoires à plus longue échéance, et plus grande échelle, ont été calculées en complément, avec le logiciel

Lagranto<sup>(1)</sup>, sur la base des champs de vent prévus par le modèle du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Des exemples sont donnés figure 6.

### Briefing quotidien

Il réunissait tous les participants au CRA et avait lieu le jour J vers 16 heures, après consultation des prévisions météo, chimiques et trajectographiques, avec l'ordre du jour suivant :

- évaluer l'évolution de la situation météo générale pour les prochains jours ;
- poser ou non, compte tenu des prévisions, une préalerte sur le jour J+2 ;
- pour le lendemain (J+1), décider d'une POI si la préalerte éventuellement posée la veille était confirmée.

## Quelques illustrations des résultats obtenus

Dans ce qui suit, sont présentées quelques illustrations des observations effectuées pendant la campagne. Le présent article n'a cependant pas comme objectif d'exposer les résultats scientifiques, lesquels feront l'objet de publications spécifiques, en cours de finalisation.

### Cycle diurne inversé de l'ozone

C'est, le plus souvent, une baisse du rapport de mélange en ozone qui est observée, au pic du Midi, lors d'une journée estivale ensoleillée (voir figure 1). L'explication la plus naturelle est la remontée, par les brises de pente, d'air des basses couches, dont le niveau d'ozone moyen est inférieur à celui du Pic (55 ppb<sup>(2)</sup> en été). En effet, dans les basses couches, le maximum d'ozone diurne n'atteint en général pas cette valeur et, par conséquent, la remontée vers les sommets d'air « propre » se signe par une baisse de la concentration au pic – et cela malgré la production photochimique.

Une étude numérique menée après la campagne (Chevalier, 2007) confirme ce scénario. Les 21 jours de campagne (17 juin - 6 juillet) ont été à nouveau simulés avec MesoNH, dans une configuration numérique identique à celle utilisée, pendant la campagne, pour la prévision (voir plus haut), mais, cette fois, avec une initialisation et des conditions aux limites reposant sur les analyses

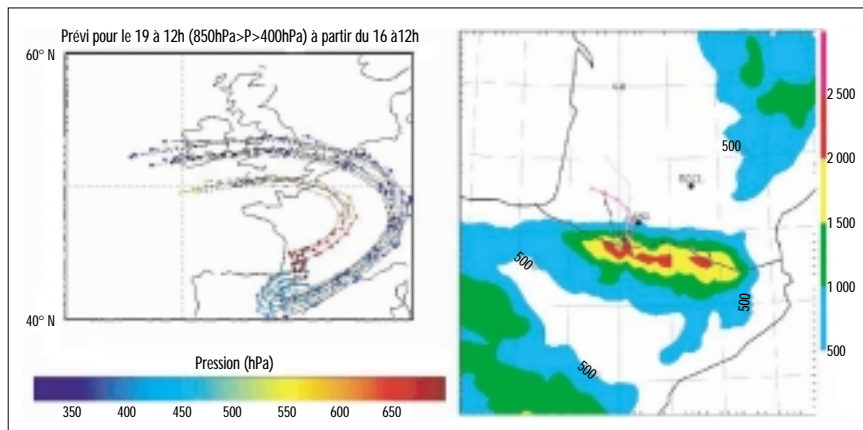


Figure 6 - Exemples de rétrotrajectoires Lagranto sur 72 h (à gauche, altitude de chaque particule colorée suivant la pression) et MesoNH sur 36 h (à droite grand domaine à 12 km de résolution, topographie en m, aboutissant au pic du Midi ou aux alentours - en noir, au CRA - en rose), le 19 juin 2005 à 12 h. Sur la figure de gauche, on voit bien le mouvement lent, et à courbure anticyclonique, de la masse d'air, durant cette période de beau temps. Sur la fin, les particules les plus basses (rouge foncé sur la figure de gauche) prennent une direction NNW-SSE, ce que l'on retrouve sur les trajectoires MesoNH.

Arpège de Météo-France. Cet ensemble de 21 simulations a ensuite été traité de façon statistique, afin d'être confronté aux observations moyennes sur l'ensemble de la campagne.

Dans les simulations, ont été introduits des traceurs spécifiques (polluants virtuels transportés par les mouvements d'air générés par le modèle) pour étudier :

- l'influence de la couche limite de plaine au pic du Midi (traceur de couche limite, « C.L. »),
- la variabilité de l'ozone au Pic induite par le transport d'un champ d'ozone verticalement inhomogène (traceur ozone, « O<sub>3</sub> »).

Le traceur de couche limite était émis à basse altitude (moins de 1 500 m) dans le modèle, avec un rapport de mélange arbitraire de 1 000 unités, et laissé libre de diffuser à plus haute altitude (ainsi, un rapport de mélange de 1 000 observé au pic du Midi correspondrait au transport sans dilu-

tion d'une masse d'air de la plaine vers le sommet). Le traceur ozone était initialisé dans la troposphère libre à un rapport de mélange de 55 ppb (valeur moyenne au pic du Midi et, dans la couche limite, son rapport de mélange était forcé suivant un cycle imitant la production diurne/destruction nocturne observée, en plaine, au CRA).

La figure 7 montre les évolutions diurnes moyennes de l'ozone et du monoxyde de carbone observées au pic du Midi, et des rapports de mélanges en

(1) Lagrangian Analysis Tool, modèle réalisé à l'Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) à Zürich (Wernli et Davies, 1997).

(2) ppb = partie par billion (milliard)

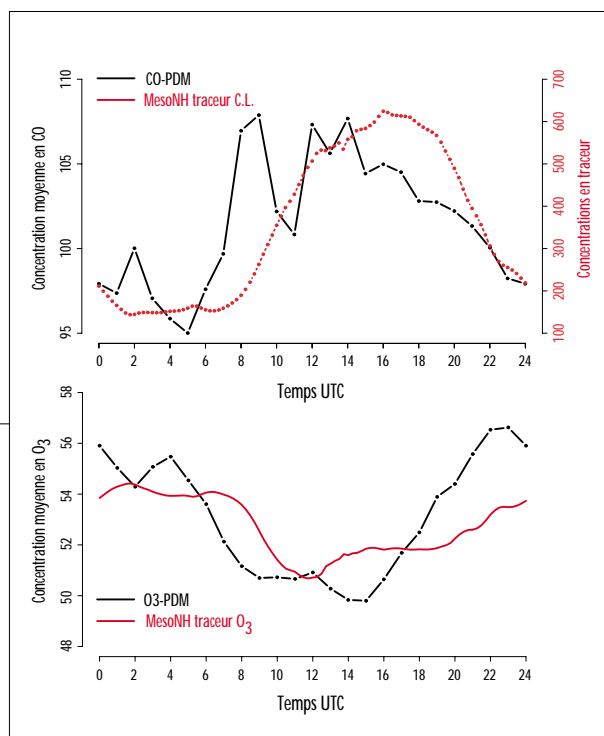


Figure 7 - Évolutions diurnes moyennes (sur la période 17 juin - 6 juillet 2005) des rapports de mélange en monoxyde de carbone et ozone, observés au Pic du Midi (courbes noires), et en traceurs de couche limite (C.L., unité arbitraire sur une échelle de 0 à 1000) et ozone (O<sub>3</sub>, en ppb), obtenus dans les simulations numériques MesoNH (courbes rouges).

traceurs qui y sont simulés. Le traceur C.L. fait apparaître, l'après-midi, une influence très importante des basses couches (à plus de 600 pour mille, contre moins de 200 la nuit). Le rapport de mélange en CO suit une évolution qualitativement comparable, et confirme le résultat du modèle (dans la mesure où, en atmosphère libre, la concentration en CO décroît rapidement dans le premier kilomètre, ce qui fait du CO un bon marqueur des basses couches). Le traceur O<sub>3</sub>, qui peut, lui, être directement comparé à l'observation d'ozone au pic du Midi, montre également un rapport de mélange plus faible l'après-midi, lorsque l'influence des basses couches est forte. L'amplitude du cycle simulé est du même ordre de grandeur que l'observation, démontrant ainsi que le transport vertical d'air depuis les basses couches est un élément suffisant pour expliquer le cycle diurne inversé de l'ozone au pic du Midi.

### Le cas de la situation du 23 juin 2005

Si l'on en croit le scénario précédent, lorsque la charge d'ozone dans les basses couches est particulièrement forte (épisode de pollution) et dépasse le niveau de fond au Pic du Midi (55 ppb), on devrait au contraire y observer un maximum d'ozone dans l'après-midi. La journée du 23 juin (figure 8) est une illustration de ce cas de figure.

Une analyse détaillée, exploitant l'ensemble des mesures (notamment celles des lidars au CRA) et une modélisation à échelle fine, a permis d'interpréter cette observation (Chevalier, 2007). Des rétrotrajectoires montrent que le pic d'ozone entre 11 h et 14 h correspond à une masse d'air située en fin de nuit dans les basses couches, à proximité du CRA. Les lidars ont révélé que ces couches étaient déjà très chargées en ozone (60-80 ppb). Cette masse d'air est ensuite aspirée par la brise vers les Pyrénées, où elle transite dans des vallées à l'est du pic du Midi, et finalement grimpe vers le sommet, toujours sous l'effet de la brise.

À plus grande échelle, l'analyse montre que la pollution observée en fin de nuit au CRA provient d'Espagne, où la production importante d'ozone de la veille (22 juin) a été exportée vers la France par le flux général de sud-ouest en basse troposphère libre. D'ailleurs, un niveau de fond particulièrement

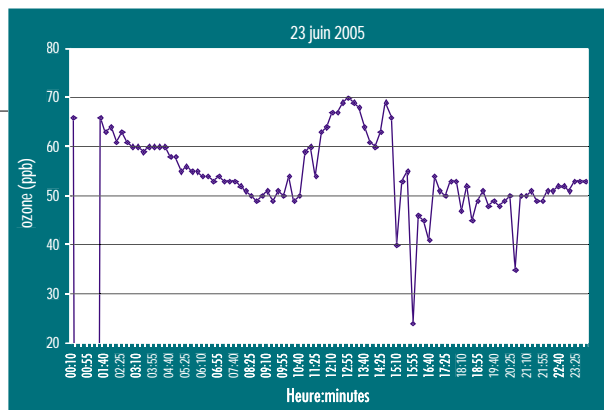
Figure 8 - Rapport de mélange en ozone (ppb) le 23 juin 2005 au pic du Midi, enregistré par la station Paes.

élevé en ozone a été également observé au pic du Midi la nuit précédente (entre 60 et 70 ppb jusqu'au lever du soleil, vers 4 h UTC, figure 8).

Le pic d'ozone observé au pic du Midi le 23 juin 2005 résulte donc de l'intéressante combinaison d'un transport transfrontalier par le flux synoptique, puis à petite échelle par les brises thermiques.

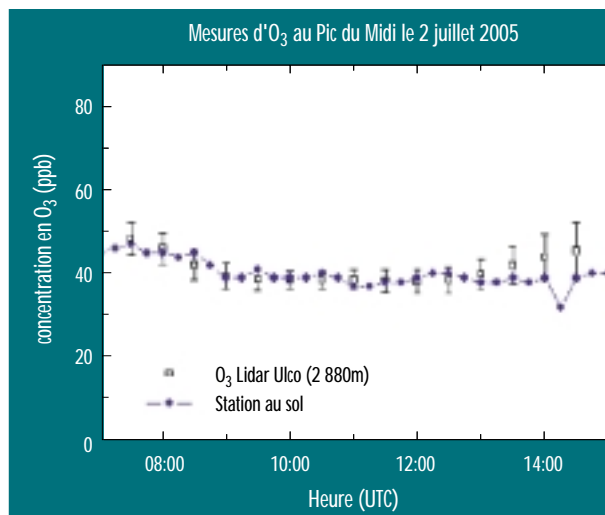
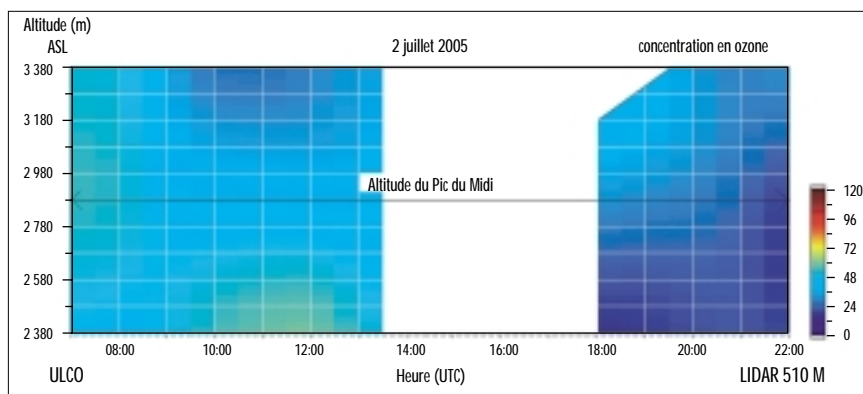
### Les POI lidar des 2 et 3 juillet 2005 au col de Sencours (PDM) et au CRA

Ces journées furent toutes deux caractérisées par un temps anticyclonique calme et ensoleillé favorable aux développements thermiques en montagne (brises et même cumulus assez nombreux l'après-midi du 2 juillet).



Le 2 juillet, le lidar Ulco au col de Sencours (pic du Midi) révèle une concentration de fond en ozone plutôt basse (moins de 50 ppb) à cette altitude pour la saison (figure 9a). La structure spatio-temporelle du champ d'ozone près du sommet est complexe. À l'altitude du sommet et au-dessus, la concentration baisse à partir de 9 h UTC avec le développement des brises ascendantes. La mesure à la station du pic du Midi, en excellent accord avec le lidar (figure 9b, en bas), confirme cette observation.

Le lendemain, 3 juillet, une augmentation notable du rapport de mélange de l'ozone est mesurée l'après-midi en plaine (au CRA) par le lidar Alto (figure 10a) en dessous de 2 000 m d'altitude : moins de



▲ Figure 9 - (a) Rapport de mélange en ozone (en ppb) en fonction de l'altitude et du temps, vu par le lidar Ulco au col de Sencours (PDM).

◀ (b) Comparaison directe du rapport de mélange en ozone (en ppb) entre la mesure lidar correspondant à l'altitude du pic du Midi (2 880 m) et la mesure in situ au Pic. Les différences après 13 h 30 – ainsi que la zone non représentée en (a) – peuvent s'expliquer par la formation de nombreux cumulus qui ont perturbé la mesure lidar.



Figure 10 - Rapport de mélange en ozone (en ppb) en fonction de l'altitude et du temps, vu par les lidars (a) Alto à Lannemezan (CRA) et (b) Ulco au col de Sencours (PDM) le 3 juillet 2005 (les altitudes sont données par rapport au niveau de la mer).

50 ppb le matin, plus de 60 ppb et jusqu'à 80 ppb dans l'après-midi. L'analyseur d'ozone en surface au CRA (données non présentées) a lui aussi enregistré cette production, avec un maximum à 70 ppb vers 17 h UTC, en bon accord avec la variabilité des mesures du lidar les plus proches de la surface.

Dans la troposphère libre, une couche riche en ozone est visible toute la journée entre 3 000 et 3 500 m d'altitude (figure 10a). Son épaisseur et les concentrations augmentent dans l'après-midi. Ces altitudes correspondent au sommet de la barrière pyrénéenne. Le flux de moyenne troposphère étant de SSW ce jour-là et la production d'ozone forte du côté espagnol (comme le montre l'analyse Prév'air disponible en ligne - [www.prevoir.org/fr/analyse\\_o3.php](http://www.prevoir.org/fr/analyse_o3.php)), il est probable qu'Alto a échantillonné de l'air de couche limite pompé en altitude par le relief côté espagnol, puis transporté ensuite par-dessus la barrière montagneuse par le flux synoptique.

Au pic du Midi, le lidar Ulco (figure 10b) enregistre en journée des valeurs moins élevées qu'Alto dans la plage d'altitudes communes. Mais, à cet endroit, l'air échantillonné provient du côté français, transporté par les brises ascendantes affectant le versant nord de la chaîne. Les données de l'anémomètre de la station Paes du pic du Midi montrent en outre que le flux synoptique n'est à nouveau sensible au Pic qu'à partir de 21 h UTC, heure à partir de laquelle Ulco enregistre une augmentation importante de l'ozone (en accord avec l'analyseur d'ozone du pic du Midi). Cela corrobore le scénario d'un transport d'air pollué depuis l'Espagne vers la France par le flux synoptique, comme dans le cas du 23 juin.

### Stratification de la couche limite au CRA le 5 juillet 2005

Cette dernière POI a été consacrée à la couche limite sous l'angle de la dynamique, Ulco ayant fonctionné en mode « stratification » (mesure du coefficient d'extinction à une seule longueur d'onde) en parallèle avec le radar UHF. La figure 11 montre une comparaison des deux instruments, où une même structure, visible sur la réflectivité

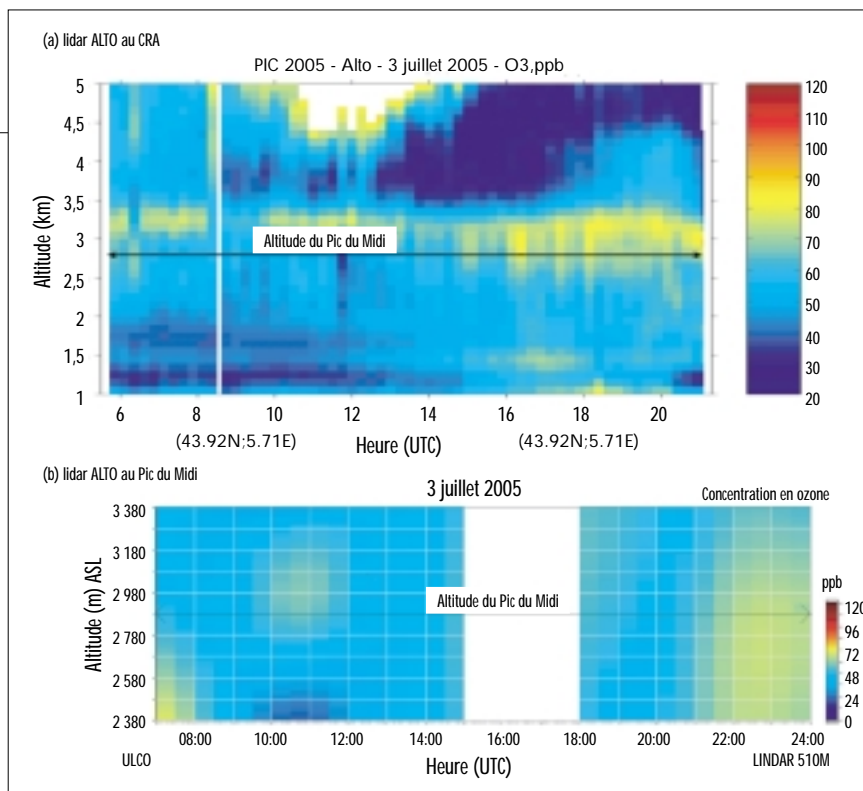
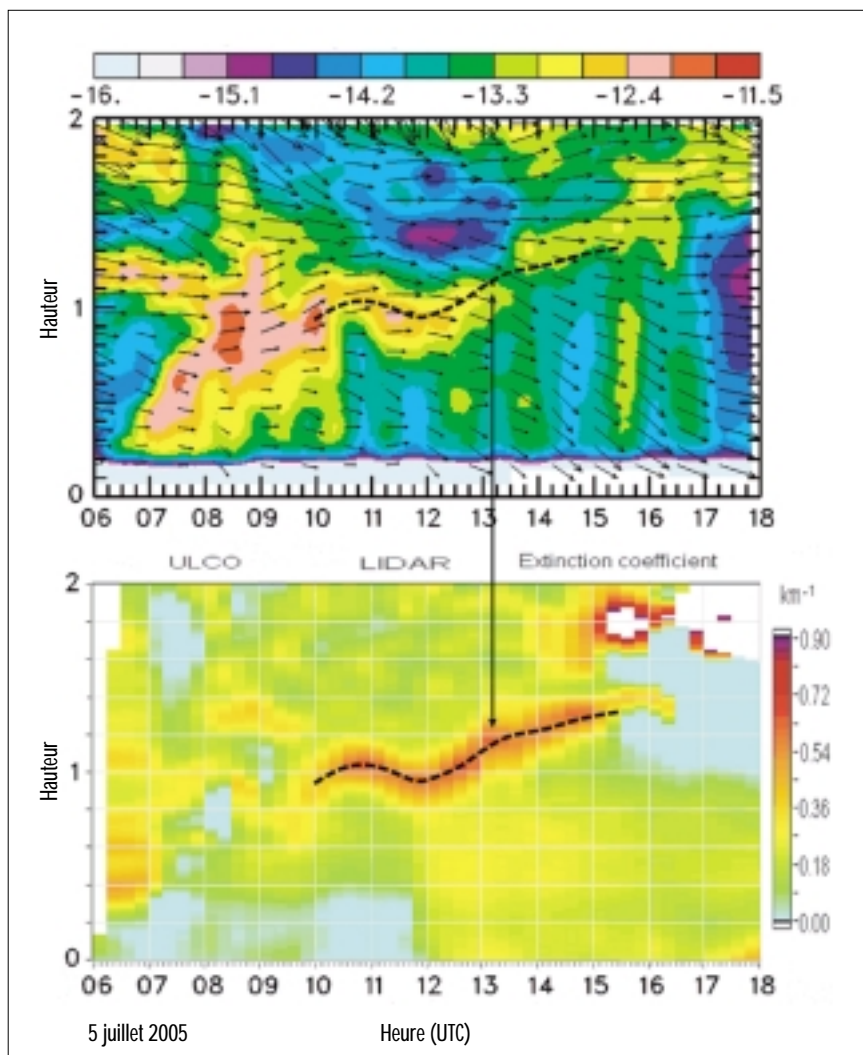


Figure 11 - Diagrammes hauteur (au-dessus du sol, en m) - temps (UTC) de la réflectivité donnée par le radar UHF (dBZ, en haut, échelle de couleur croissante de gauche à droite) et du coefficient d'absorption (en km<sup>-1</sup>, en bas) mesuré par le lidar Ulco le 5 juillet 2005 au CRA. Les flèches indiquent la direction et la force du vent.





radar et sur le coefficient d'absorption lidar, marque très clairement le sommet de la couche limite et son ondulation.

## Conclusions et perspectives

La campagne Pic 2005 visait en premier lieu une meilleure compréhension de la structure spatio-temporelle du champ d'ozone sur le site Paes du pic du Midi, et des mesures continues qui y sont faites. Au-delà du contexte de Paes, l'exploitation de la campagne poursuit aussi des objectifs scientifiques propres :

- étude de la variabilité à petite échelle de l'ozone dans la basse troposphère en terrain complexe et de l'origine des masses d'air correspondantes ;
- étude de la stratification et de la dynamique de la couche limite sous brises à la transition jour / nuit ;

- mécanismes de transport en environnement alpin ;
- caractérisation et quantification de transferts verticaux entre la couche limite et la troposphère libre.

Des travaux de recherche selon ces axes sont en cours de finalisation par les équipes du Service d'aéronomie, du Laboratoire de physico-chimie de l'atmosphère de Dunkerque et du Laboratoire d'aéologie de Toulouse.

Malgré la simplicité du dispositif expérimental, les observations ont suggéré des scénarios physiques, étayés et précisés depuis la campagne par les travaux réalisés, qui allient une analyse détaillée de l'ensemble des données – notamment celles des lidars – à l'utilisation de l'outil numérique (modèle numérique à haute résolution et trajectoires). La stratégie adoptée repose sur des études de cas, mais aussi sur une approche plus statistique, utilisant les mesures conti-

nues (en particulier des stations de surface) et la modélisation.

Enfin, dans la même optique que Pic 2005, une campagne analogue est envisagée dans les prochaines années autour du site Paes du puy de Dôme.

## Remerciements

La campagne Pic 2005 était soutenue par l'Insu, l'Ademe, le PNCA, et l'université Paul-Sabatier. Nous remercions la régie du pic du Midi, la commune de Beaudéan (Hautes-Pyrénées), le Sivu de l'Aya, et plus personnellement Jean-Marc Abbadie, René Dorignac et Laurent Bérot pour avoir permis et facilité la mise en œuvre des moyens d'observation. Nous remercions également le personnel du CRA de Lannemezan pour son accueil et les moyens logistiques mis à notre disposition pendant Pic 2005.

## Bibliographie

- Ancelet G. et F. Ravetta, 1998 : Compact Airborne Lidar for Tropospheric Ozone: description and field measurements. *Appl. Opt.*, 37, 5509-5521.
- Ancelet G. et F. Ravetta, 2003 : On the usefulness of an airborne lidar for ozone layer analysis in the free troposphere and the planetary boundary layer. *J. Environ. Monit.*, 5, 47-56.
- Campistron B., Y. B. Pointin, F. Lohou et J.-P. Pagès, 1999 : Aspect sensitivity of VHF radar echoes observed in the middle and upper troposphere during the passage of a cut-off low. *Radio Sci.*, 34, 667-679.
- 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.
- Chevalier A., 2007 : Développement du Service d'observation Paes : pollution atmosphérique à l'échelle synoptique, bilan de l'ozone dans la troposphère libre. Thèse de doctorat, Université Toulouse III.
- Chevalier A, F. Gheusi, R. Delmas, C. Ordoñez, C. Sarrat, R. Zbinden, V. Thouret, G. Athier et J.-M. Cousin, 2007 : Influence of altitude on ozone levels and variability in the lower troposphere: a ground-based study for western Europe over the period 2001-2004. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 4311-4326.
- Delbarre H., P. Augustin, F. Said, B. Campistron, B. Benech, F. Lohou, V. Puygrenier, C. Moppert, F. Cousin, P. Freville et E. Frejafon, 2005 : Ground-based remote sensing observation of the complex behaviour of the Marseille boundary layer during Escompte. *Atmospheric Research*, 74, 403-433.
- Dabas A. et C. Flamant, 2002 : Les instruments de télédétection au sol. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 39, 76-82.
- Durand P. et B. Cros, 2004 : Une expérience d'étude de la pollution atmosphérique à l'échelle régionale : le programme Escompte. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 44, 16-27.
- Gheusi F., A. Chevalier, R. Delmas, G. Athier, P. Bouchou, J.-M. Cousin, Y. Meyerfeld, P. Laj, K. Sellegri et G. Ancelet, 2007 : Ozone et pollution atmosphérique à grande échelle (1): le réseau de surveillance Paes. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 58, 30-35.
- Henne S., J. Dommen, B. Neiningner, S. Reimann, J. Stähelin et A. S. H. Prévôt, 2005 : Influence of mountain venting in the Alps on the ozone chemistry of the lower free troposphere and the European pollution export. *J. Geophys. Res.*, 110, D22307.
- Jacoby-Koaly S., B. Campistron, S. Bernard, B. Bénech, F. Girard, J. Dessens, E. Dupont et B. Carissimo, 2002 : Turbulent dissipation rate in the boundary layer via UHF wind profiler Doppler spectral width measurement. *Bound. Layer Meteorol.*, 103, 361-389.
- Marengo A., H. Gouget, P. Nédélec et J.-P. Pagès, 1994 : Evidence of a long-term increase in tropospheric ozone from Pic du Midi data series. Consequences: Positive radiative forcing. *J. Geophys. Res.*, 99(D8), 16617-16632.
- Mauprivez M. et J.-P. Sandra, 2002 : Les profileurs de vent à vocation opérationnelle. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 39, 71-75.
- Wernli H. et H. C. Davies, 1997 : A lagrangian-based analysis of extratropical cyclones: The method and some applications. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 123, 467-489.

Tableau 2 - 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  | -               | à l'étude       | Oui   | Automatique |
|                 | Puy de Dôme    | Oui   | Oui  | Oui             | à l'étude       | Oui   | Automatique |
| Futurs sites    | Obs. Hte-Prov. | Oui   | Oui  | -               | ?               | Oui   | Automatique |
|                 | Corse          | 2008  | 2008 | -               | ?               | 2008  | ?           |

## Erratum

Quelques inexactitudes figurent dans le tableau 2 de l'article associé, « Ozone et pollution atmosphérique à grande échelle. Le réseau de surveillance Paes », paru dans le numéro 58 de *La Météorologie*. Ci-contre, le tableau (page 33 du n°58) rectifié.