



**HAL**  
open science

## **PREV'AIR : un système opérationnel de prévision et de cartographie de la qualité de l'air en France et en Europe**

Laurence Rouil, Cécile Honore, Frédéric Meleux, Laure Malherbe, Bertrand Bessagnet, Robert Vautard, Laurent Menut, Matthias Beekmann, Vincent-Henri Peuch, Anne Dufour, et al.

### ► To cite this version:

Laurence Rouil, Cécile Honore, Frédéric Meleux, Laure Malherbe, Bertrand Bessagnet, et al.. PREV'AIR : un système opérationnel de prévision et de cartographie de la qualité de l'air en France et en Europe. Atelier expérimentation et instrumentation, Jan 2006, Brest, France. pp.NC. ineris-00973248

**HAL Id: ineris-00973248**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00973248>**

Submitted on 4 Apr 2014

**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.

# **PREV'AIR : un système opérationnel de prévision et de cartographie de la qualité de l'air en France et en Europe**

Laurence Rouil, Cécile Honoré, Frédérik Meleux, Laure Malherbe, Bertrand Bessagnet (1)

Robert Vautard (2), Laurent Menut (3), Matthias Beekmann (4)

Vincent-Henri Peuch, Anne Dufour (5)

Nathalie Poisson, Souad Bouallala (6)

(1) INERIS, Parc Technologique Alata, 60550 Verneuil-en-Halatte

(2) Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CNRS/CEA, Orme des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette

(3) Laboratoire de Météorologie Dynamique, CNRS, Ecole Polytechnique, 92128 Palaiseau

(4) Laboratoire Interdisciplinaire des Systèmes Atmosphériques, CNRS, Université des Sciences et Technologies, 94010 Créteil

(5) Météo France, Centre National de Recherches Météorologiques, 42 avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse

(6) ADEME, 27 rue Louis Vicat, 75737 Paris cedex 15

## **1. Introduction**

Le système PREV'AIR de prévision et de surveillance de la qualité de l'air en France et en Europe est mis en œuvre à l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS) depuis le printemps 2003, en coopération avec l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS); Météo France et l'Agence De l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie (ADEME).

Le système a pour objectif de délivrer quotidiennement une information (sous la forme de prévisions et de cartographies) relative à la qualité de l'air en France et en Europe. Il est reconnu comme un complément du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air assurée au niveau local par une quarantaine d'Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQAs). Ce dispositif repose sur plus de 2000 analyseurs dédiés à la mesure d'indicateurs de pollution (SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, particules...), répartis sur plus de 700 sites fixes.

Les modèles déterministes tridimensionnels de simulation de la qualité de l'air, ou modèles de Chimie-Transport (CTM), généralement couplés à un modèle météorologique, permettent désormais de répondre en grande partie aux objectifs de la prévision, grâce à leur fiabilité croissante et aux progrès réalisés dans le domaine de l'informatique scientifique. La diminution des temps de calculs, l'augmentation des capacités de stockage et le développement des technologies de l'information (accès rapide par Internet à de nombreuses bases de données) rendent désormais possible la mise en œuvre quotidienne ("opérationnelle") de ces modèles, et la diffusion de l'information qui en découle.

Le système PREV'AIR s'appuie sur un ensemble d'outils numériques (modèles et post traitement des sorties de modèles; modules d'interface pour la gestion des entrées / sorties de données). Les données numériques générées par le système (concentrations en polluants atmosphériques) sont exploitées afin de 1) réaliser des études spécifiques pour le compte du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable – MEDD- (bilan de qualité de l'air, analyses de tendances et prospectives); 2) fournir des prévisions de concentrations de polluants atmosphériques (ozone, dioxyde d'azote et particules) à trois jours d'échéance; 3) élaborer des "analyses" des concentrations de polluants (ozone) – c'est-à-dire des cartographies réalisées *a posteriori* en intégrant les résultats de modélisation et les observations disponibles.

Les prévisions et les analyses sont délivrées quotidiennement via Internet sous forme de données numériques et de cartes (<http://www.prevoir.org>).

L'objet du présent article est de décrire brièvement le système PREV'AIR tel qu'il fonctionne depuis l'été 2004 ainsi que les produits de sortie délivrés par le système. Un état des performances du système sera également proposé.

## 2. Architecture du système PREV'AIR

Le système PREV'AIR repose sur une architecture informatique schématisée dans la **Figure 1**. On peut distinguer trois types d'éléments: le "corps" du système constitué par des modèles numériques de simulation de la météorologie et de la qualité de l'air, les modules de gestion des données d'entrée, les modules de gestion des produits de sortie, y compris le post traitement des sorties de modèles.

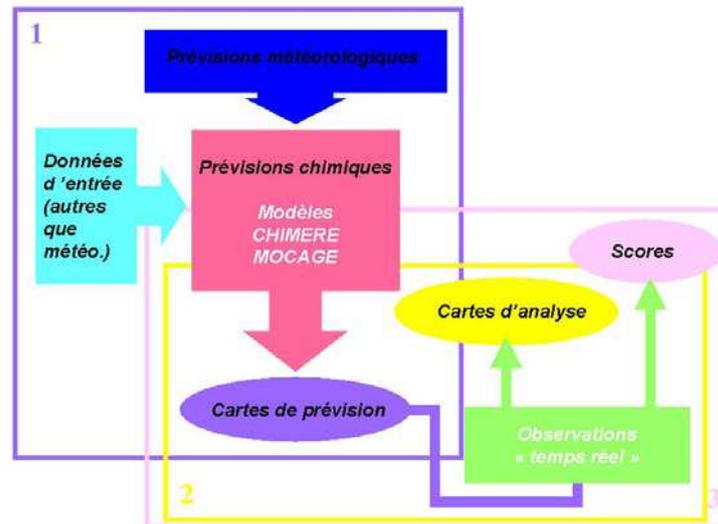


Figure 1. Schéma de principe du système PREV'AIR. Le cadre (1) concerne la partie "prévision" du système, le cadre (2) l'"analyse" et le cadre (3) les "scores".

### 2.1 Modélisation numérique de la qualité de l'air

PREV'AIR fournit, pour trois jours d'échéance, des prévisions à l'échelle européenne des concentrations d'ozone, de dioxyde d'azote et de particules et à l'échelle française des prévisions des concentrations d'ozone et de dioxyde d'azote. Des prévisions globales d'ozone sont également proposées.

Il s'appuie sur la mise en œuvre de deux modèles de Chimie-Transport :

- le modèle CHIMERE, développé depuis 1996 par l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL/CNRS), initialement choisi pour ses performances en terme de simulation des concentrations d'ozone [1] et pour son caractère opérationnel (grande souplesse d'utilisation, temps de calculs en accord avec les objectifs fixés, caractère "open-source" du code). Le modèle est décrit dans ses grandes lignes dans [1]. Un document complet et mis à jour figure à l'adresse <http://euler.lmd.polytechnique.fr/chimere/>. Dans son utilisation au sein du système PREV'AIR, la résolution horizontale du modèle CHIMERE est de 0.5° en longitude et en latitude pour le domaine européen; de 0.15° en longitude et 0.1° en latitude pour le domaine France; il s'étend sur huit niveaux verticaux depuis la surface jusqu'à 500hPa (environ 4500m), ces résolutions verticales et horizontales pouvant être accrues. En ce qui concerne la chimie gazeuse, CHIMERE s'appuie sur le mécanisme chimique MELCHIOR [2], dont un mécanisme réduit a été déduit [3]: en configuration opérationnelle 44 espèces chimiques et 120 réactions sont prises en compte. Depuis l'hiver 2004, la prévision des aérosols a été mise en œuvre dans CHIMERE et dans PREV'AIR. Les particules modélisées dans CHIMERE sont supposées constituées de particules primaires anthropiques, de sulfates, nitrates, ammonium et d'espèces organiques secondaires. Les performances du modèle ont été évaluées dans [4].
- Le modèle MOCAGE développé par le Centre National de Recherches Météorologiques de Météo France (CNRM / Météo France) est mis en œuvre pour des applications opérationnelles comme pour la recherche fondamentale dans le domaine de la modélisation de la composition

chimique de l'atmosphère [5], [6]. MOCAGE décrit l'atmosphère sur une grille de résolution horizontale égale à 4° à l'échelle globale, 0.5° à l'échelle européenne, et 0.1° à l'échelle française. Il comporte 47 niveaux jusqu'à 5 hPa (35 km environ). L'enrichissement en ozone de la troposphère par la stratosphère est ainsi explicitement simulé; d'autre part, ceci permet de prédire l'évolution du profil vertical d'ozone dans la stratosphère, qui conditionne le rayonnement ultra-violet pénétrant dans la troposphère et l'activité des réactions de photochimie. Dans sa configuration opérationnelle, près de 120 espèces gazeuses et plus de 350 réactions sont prises en compte, offrant une description détaillée de la chimie troposphérique et stratosphérique en combinant les mécanismes chimiques RACM et REPROBUS [6].

## 2.2 Données d'entrée

En première approche, on peut distinguer les données d'entrée mises à jour quotidiennement (données météorologiques grande échelle, observations) de celles qui font l'objet d'une mise à jour moins fréquente: c'est le cas par exemple des données d'émissions - actualisées annuellement - ou des concentrations aux limites des domaines PREV'AIR – issues de données climatologiques.

### 2.2.1 Données météorologiques

Pour ce qui est de la filière CHIMERE, le modèle ne calcule pas lui-même l'évolution des paramètres météorologiques - vitesse du vent, température, etc... - qui servent à déterminer les flux de polluants liés aux mouvements de l'atmosphère, aux réactions chimiques et photochimiques dans les domaines PREV'AIR ... Ces paramètres sont issus de modèles de prévision météorologique. Concrètement les sorties du modèle mésoéchelle MM5, développé aux Etats-Unis par l'Université de Pennsylvanie (PSU) et le Centre National pour la Recherche Atmosphérique (NCAR) (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html>) sont utilisées en imbrication dans les analyses et prévisions météorologiques globales effectuées avec le modèle ARPEGE (Météo-France).

Pour la filière MOCAGE, les données météorologiques globales sont issues des prévisions effectuées par Météo France de façon opérationnelle, à l'aide du modèle météorologique opérationnel de Météo-France, ARPEGE, qui fournit les conditions de forçage à MOCAGE toutes les 3 ou 6 heures : pression, température, vents, humidité.

L'ensemble de ces modèles (météorologie mésoéchelle / chimie-transport) constitue la clé de voûte de l'architecture du système PREV'AIR.

### 2.2.2 Observations

Ces données permettent (i) d'évaluer les performances du système; (ii) de corriger *a posteriori* les champs de concentrations d'ozone calculés par les modèles, et d'établir ainsi des analyses. Pour la France, les données d'observations sont produites par les AASQAs, et sont collectées toutes les trois heures au niveau national et archivées dans la base de données temps réel, BASTER, développée et gérée par l'ADEME. Le système PREV'AIR télécharge quotidiennement les données d'observations disponibles dans BASTER. Des contacts sont engagés avec des partenaires européens afin de généraliser ces procédures à l'acquisition de données de mesures dans ces pays.

### 2.2.3 Données d'émissions

Elles sont issues du programme EMEP, programme coopératif pour la surveillance et l'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe (<http://www.emep.int>). Il s'agit d'un programme coopératif mené sous l'égide de la Commission Economique pour l'Europe des Nations-Unies (CEE-NU), dans le cadre de la Convention sur la Pollution Atmosphérique Transfrontière à Longue Distance (CLRTAP).

A l'échelle globale, les émissions proviennent des inventaires globaux GEIA et EDGAR [7].

### 2.2.4 Concentrations aux limites des domaines

A l'échelle européenne, le modèle CHIMERE utilise des données climatologiques (moyennes mensuelles), calculées par le modèle global de chimie-transport MOZART [8] pour une douzaine d'espèces chimiques parmi lesquelles l'ozone, le dioxyde d'azote, des composés organiques volatils, etc... A l'échelle de la France, le modèle "fonctionne" en imbrication dans le domaine Europe: les sorties de simulations du modèle CHIMERE à l'échelle européenne sont fournies en entrée au modèle CHIMERE à l'échelle française.

Ce principe vaut également pour les résultats issus du modèle MOCAGE et disponibles pour les différentes échelles spatiales. A l'échelle globale, les conditions au sommet du domaine MOCAGE sont issues de climatologies calculées à l'aide d'une autre version du modèle couvrant toute la stratosphère et la mésosphère, et mise en œuvre en mode climatique.

### 3. Prévision déterministe des concentrations de polluants

Chaque jour, la prévision est délivrée jusqu'à trois jours d'échéance (i.e. de J+0, 00h TU à J+3, 00h TU), vers 01h00 locales (J+0) pour le domaine européen et 06h00 locales (J+0) pour la France. Afin de limiter l'influence des conditions initiales sur les prévisions quotidiennes, le jour J-1 est simulé préalablement aux trois jours de prévision, fournissant ainsi une estimation de la qualité de l'air pour la veille.

Des procédures d'adaptation statistique seront mise en œuvre dans le système PREV'AIR en 2006 afin d'améliorer localement la prévision des concentrations d'ozone en ajoutant aux concentrations prévues par le modèle déterministe un champ de corrections. Elles seront déterminées aux stations de mesure, pour un jour et une échéance de prévision donnés, en fonction des conditions météorologiques et de pollution prévues et sur la base des différences entre observations et prévisions enregistrées dans le passé en ces points. Ces méthodes d'adaptation statistique reposent donc sur la notion d'apprentissage ; ainsi, pour mettre en œuvre l'adaptation statistique pendant l'été 2005, on a utilisé les observations des étés 2003 et 2004 et les prévisions correspondantes. Notons que les périodes d'apprentissage et de mise en œuvre de l'adaptation statistique doivent être cohérentes, les « déficiences » des modèles de prévision étant a priori dépendantes de la saison.

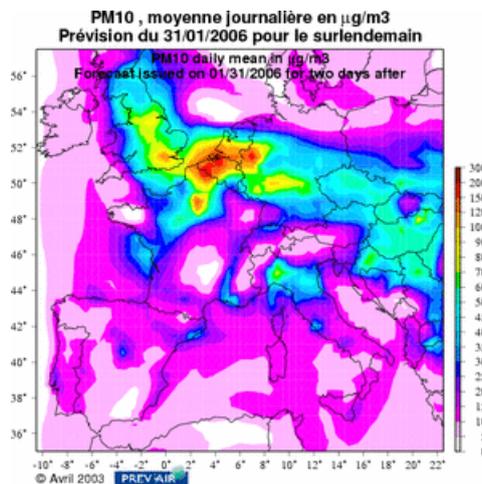


Figure 2. Pic journalier des concentrations de PM10 de surface prévu le 08 juin 2004 pour le lendemain.

Les prévisions sont diffusées chaque jour sur le site <http://www.prevoir.org>, sous la forme de cartes d'iso-contours des moyennes et des maxima journaliers d'ozone, de dioxyde d'azote et de particules. A titre d'exemple, la **Figure 2** présente la carte des pics journaliers de PM10 en µg/m3, prévue le 31 janvier 2006 pour le surlendemain (les concentrations présentées sont calculées dans la couche de surface du modèle). Les données numériques extraites sur des domaines géographiques cibles sont également disponibles pour les différents utilisateurs de PREV'AIR qui disposent d'un compte propre.

### 4. Cartographie des pics d'ozone

Pour améliorer les simulations de qualité de l'air, il est possible de s'appuyer sur d'autres outils, et d'associer à la modélisation déterministe des techniques complémentaires intégrant les observations, par le biais de méthodes de krigeage. Les phénomènes sont alors représentés par les équations qui les régissent et par les observations disponibles, ce qui correspond à l'approximation la plus fine que l'on puisse établir.

Les observations collectées chaque jour par PREV'AIR via la base de données temps réel BASTER sont utilisées pour corriger *a posteriori* sur la France les concentrations maximales d'ozone de la veille et du jour même issues des simulations brutes. A titre d'exemple, la **Figure 3** présente la carte des pics d'ozone dans la couche de surface du modèle, corrigée par les observations disponibles, établie pour le 16 juillet 2005; pour ce jour précis, la correction sur le

champ d'ozone calculé par le système PREV'AIR varie entre -50 et + 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , les écarts les plus forts étant localisés dans le centre, le sud-est et le nord-est de la France. La structure du champ d'ozone simulé est conservée dans la carte analysée.

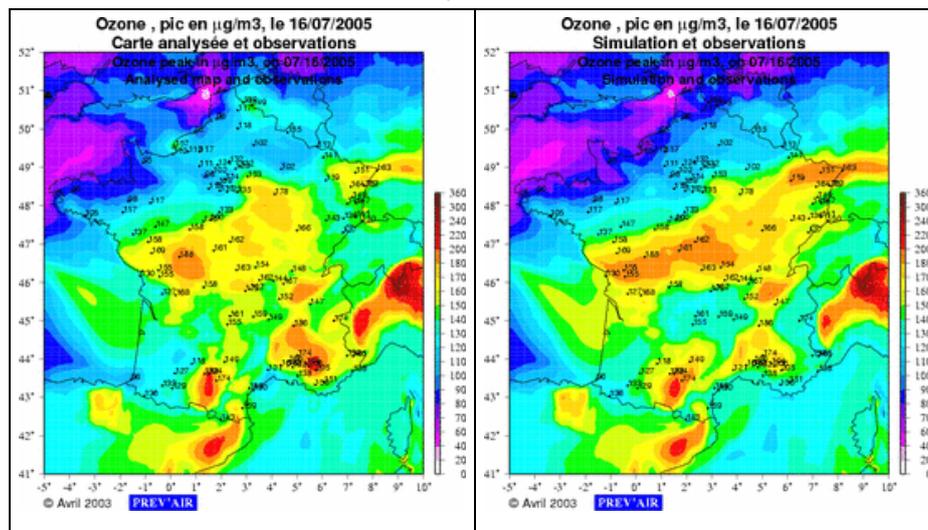


Figure 3. En haut à gauche, carte analysée des pics d'ozone de surface et observations pour le 16 juillet 2005. En haut à droite, carte des pics d'ozone de surface simulés pour le même jour.

La méthode de correction utilisée est une méthode géostatistique, dite de "krigeage des innovations". Elle s'appuie sur les outils disponibles dans le logiciel R (<http://www.r-project.org>). La méthode de krigage des innovations mise en œuvre depuis l'été 2003 dans le système PREV'AIR a été développée dans le cadre d'une étude du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) menée en collaboration avec l'Université de Paris Sud et le Laboratoire de Météorologie Dynamique [9]. Elle consiste à estimer les concentrations d'ozone - vraies mais inconnues - en ajoutant à la sortie du modèle un champ de corrections. Ainsi, la variable que l'on cherche à interpoler spatialement est l'erreur du modèle  $Z_t(s) - Z_b(s)$ , où  $Z_t(s)$  désigne la valeur réelle de la concentration d'ozone au point  $s$  et  $Z_b(s)$  sa valeur simulée. Pour cela, on dispose de  $p$  réalisations dans l'espace de cette quantité:  $Y_o(s_k) - Z_b(s_k)$ ,  $k=1, \dots, p$ , où  $s_k$  représente la position géographique de la station de mesure  $k$ ,  $Y_o(s_k)$  désigne la valeur mesurée par cette station de la concentration d'ozone au point  $s_k$ . Ces différences sont désignées sous le terme d'"innovations". L'estimation en un point  $s$ , notée  $Z_a(s) - Z_b(s)$ , de l'erreur modèle  $Z_t(s) - Z_b(s)$  est obtenue par une combinaison linéaire des innovations, dont les poids sont choisis de telle façon que la variance de l'estimation est minimale.

### 5. Performances du système PREV'AIR

A l'issue de chaque période estivale (du 15 juin au 15 septembre) et hivernale (du 15 octobre au 15 mars), les performances du système sont évaluées à l'aide des observations collectées chaque jour par PREV'AIR via la base de données temps réel BASTER: les maxima journaliers d'ozone et les moyennes journalières de dioxyde d'azote et de PM10 simulés par le modèle CHIMERE sont comparés aux pics et moyennes observés, à l'aide d'indicateurs statistiques, et ceci pour chaque échéance de la prévision (J-1, J+0, J+1, J+2).

Les indicateurs statistiques calculés sont: le biais et l'erreur quadratique moyenne, la corrélation, le pourcentage d'erreurs relatives inférieures à 20% (50% pour le dioxyde d'azote et les particules) et le percentile 90 des erreurs relatives sur le pic d'ozone (le percentile 50 pour le dioxyde d'azote et les particules). Pour calculer ces quantités, les observations horaires utilisées sont celles fournies par les stations de mesure pour lesquelles au moins 75% des mesures du jour sont effectivement disponibles. On distingue stations rurales, périurbaines et urbaines.

Le tableau 1 fournit, pour l'été 2005, les scores obtenus pour l'ozone pour la prévision établie pour le jour même. Ces performances sont peu dégradées pour les échéances suivantes.

Pour les PM10 le modèle a généralement tendance à sous-estimer les moyennes journalières. La RMSE est de l'ordre de 45-50% selon le type de stations et l'échéance de prévision, selon ces mêmes variables, la corrélation varie entre 0,50 et 0,65. Les concentrations en dioxyde d'azote sont systématiquement sous-estimées du fait de la résolution spatiale des modèles. La RMSE est de l'ordre de 65-70% et la corrélation varie entre 0,45 et 0,70 selon le type de stations.

A noter que ces performances sont calculées chaque jour et diffusées sur le site PREV'air ([www.prevoir.org/fr/statistiques03.php](http://www.prevoir.org/fr/statistiques03.php) par exemple).

Les performances sont satisfaisantes, et conformes à l'état de l'art européen (Roemer *et al.*, 2003).

Type de station	Rural	Périurbain	Urbain
Moyenne Observée	105.7	102.7	99.6
Moyenne Modélisée	106.0	105.5	104.7
Biais (%)	3.6	6.1	8.0
NMSE	21.4	22.4	23.3
Corrélation	0.82	0.84	0.83
E-20% (%)	77.	78.	73.
E-90% (%)	29.17	31.67	35.00

Tableau 1 : performances de PREV'AIR pour la prévision de l'ozone pour le jour même (été 2005)

## 6. Applications du système PREV'AIR

Les AASQA sont les principaux utilisateurs du système, mais également des laboratoires de recherche, l'Institut de Veille Sanitaire. Le système connaît un certain succès à l'étranger, des comptes utilisateurs anglais, italiens et autrichiens ont été ouverts en 2006. Enfin un accord de partenariat signé en 2005 entre le Ministère de l'Ecologie et France Télévision prévoit la transmission des cartes de prévision pour le lendemain, à France 2 et France3 pour une large diffusion auprès du public lors du bulletin météo. Cette procédure est activée en situation d'épisode de pollution à l'ozone de grande ampleur géographique et persistant.

Ces exemples démontrent bien tout l'intérêt de disposer d'un système opérationnel de prévision d'un point de vue scientifique (meilleure compréhension des phénomènes), politique (évaluation de l'impact de politiques de contrôle de la pollution) mais aussi social (information du public, gestion des aspects sanitaires).

## 7. Références

- [1] Schmidt, H., Derognat, C., Vautard, R. and Beekmann, M. A comparison of simulated and observed ozone mixing ratios for the summer of 1998 in Western Europe. *Atmospheric Environment* 2001; 35: 6277-6297.
- [2] Lattuati, M., Contribution à l'étude du bilan de l'ozone troposphérique à l'interface de l'Europe et de l'Atlantique nord: modélisation lagrangienne et mesures en altitude, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, 1997.
- [3] Derognat, C, Pollution photooxydante à l'échelle urbaine et interaction avec l'échelle régionale, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, 2002.
- [4] Bessagnet B., Hodzic A., Vautard R., Beekmann M., Cheinet S., Honoré C., Liousse C., Rouil L., Aerosol modeling with CHIMERE - Preliminary evaluation at the continental scale. *Atmospheric Environment* 2004; 38, 2803-2817.
- [5] Peuch V.-H., M. Amodei, T. Barthet, M.-L. Cathala, B. Josse, M. Michou and P. Simon, MOCAGE, MOdèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle, Proceedings of Météo-France Workshop on Atmospheric Modelling, December 1999, 33-36, 1999.
- [6] Dufour, A., M. Amodei, G. Ancellet and V.-H. Peuch, Observed and modelled "chemical weather" during ESCOMPTE, en révision, *Atmos. Res.* 2004; 74 (1-4), 161-189, doi:10.1016/j.atmosres.2004.04.013.
- [7] Michou, M. and V.-H. Peuch, Surface exchanges in the multiscale chemistry and transport model MOCAGE, *Water Res.* 2002; n°15 special issue, 173-203.
- [8] Hauglustaine, D.A., Brasseur, G.P., Walters, S. *et al.* MOZART: a global chemical transport model for ozone and related chemical tracers, Part 2. Model results and evaluation. *J Geophys Res* 1998; 103: 28291-28335.
- [9] Grancher, D., Bel, L. et Vautard, R. Cartographie et prévision des champs de pollution à l'échelle locale à partir des résultats de simulation d'un modèle continental. Etude LCSQA 2003.
- [10] Roemer, M., Beekmann, M., Bergstrom, R. *et al.* Ozone trends according to ten dispersion models. Special report EUROTRAC-2 2003