Vincent MALFERE PROMOTION X 96

RAPPORT DE STAGE D'OPTION SCIENTIFIQUE

Option: **Sciences de la planète Terre et Environnement**
Département de Mécanique
Directeur de l'Option : **MM. Hervé Le Treut et Frédéric Dias**

UTILISATION DE LMD-Z TRANSPORT SUR LA CAMPAGNE ESQUIF

Organisme d'accueil :
Laboratoire de Météorologie Dynamique, IPSL
5eme étage, Tour 25, Université Pierre et Marie Curie, Paris 5eme

Directeur de stage : **Frédéric HOURDIN**

Stage effectué du **12 avril au 1er juillet 1999**

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement Frédéric Hourdin pour sa disponibilité, sa bonne humeur et sa faculté à trouver les bugs qui n'ont pas manqué pas d'égayer mon stage.

Mes remerciements iront aussi vers Abderrhamane Idelkadi qui a su me donner les clés du fonctionnement de UNIX, du modèle LMDZ, et de Grads, et ainsi me permettre de me lancer dans le stage. Merci aussi à Laurent Menut pour les documents qu'il a bien voulu me faire parvenir, et à Alexandre Armengaud pour ses conseils.

Je ne sais pas si je dois remercier l'arrière de l'équipe de rugby des Ecoles militaires de Coëtquidan, pour m'avoir cassé la clavicule trois semaines avant mon départ en stage, en Floride, et fait rester en France. Par contre, je ne peux qu'exprimer ma gratitude à M.Le Treut, directeur du LMD et directeur d'option, pour m'avoir accueilli, au dernier moment, au LMD Jussieu, et à Pascale Fuseau, du bureau des stages de la Direction des Etudes de l'X, pour s'être adaptée à mes impératifs de santé.

Résumé

Les premières observations relatives au programme d'Etude et Simulation de la QUalité de l'air en Ile-de-France (ESQUIF) ont été obtenues durant l'été 1998. La présente étude s'intéresse, dans un but de validation de modèles et de compréhension d'un épisode de pollution, au pic de pollution à l'ozone qui a eu lieu du 7 au 9 août 1998. L'ozone est un polluant intéressant car il peut être aussi bien produit localement qu'à une échelle continentale. Ces deux régimes de production correspondent à des mesures d'appoint et de prévention de la pollution urbaine différentes, et doivent donc être clairement identifiés.

Le modèle LMD-Z Transport est utilisé pour effectuer des simulations de rétro-transport de traceurs et obtenir des cartes de probabilité de provenance des masses d'air stationnant en un lieu donné et à une date donnée. L'interprétation des différentes cartes obtenues, confrontée à ce qui a déjà pu être fait sur la compréhension de cet épisode de pollution, valide de manière satisfaisante le modèle, celui-ci parvenant bien à rendre compte des différents régimes de pollution observés durant la période considérée. Les simulations effectuées permettent, du reste, d'éclairer certains points restés obscurs dans les interprétations déjà menées.

Une nouvelle paramétrisation du transport convectif dans la couche limite planétaire est ensuite testée, toujours sur la même période de l'été 1998. Il s'avère que cette paramétrisation, basée sur une représentation explicite des thermiques, donne, sur le transport de la vapeur d'eau et des traceurs ESQUIF, des résultats beaucoup plus réalistes que l'ancienne paramétrisation, basée elle sur le concept de viscosité turbulente.

Abstract

The first measurements linked to ESQUIF (program of Study and Simulation of air Quality in Ile-de-France) were obtained during summer '98. The present study deals with the episode of pollution by ozone that took place from 7 to 9 august 1998, with the aim of validating models and understanding this episode. Ozone is an interesting pollutant because it can be produced locally as well as at continental scales. Both regimes correspond to different preventive and alert actions against pollution, and, as such, must be clearly identified.

The transport of trace species by the LMD-Z model is integrated back in time, in order to produce probability maps of the origin of the air masses which are at a given location at a given date. The various maps are compared with previous analysis of this episode of pollution. The model is shown to give a good description of the different pollution systems observed during this episode. Moreover, our simulations enable us to enlighten a few points remained obscure in the previous works.

A new parametrization of convective transport in the planetary boundary layer is afterwards tested on the same period. It turns out that this parametrization, based on a explicit representation of thermic cells, gives far more realistic results on water vapour and ESQUIF's trace species, than the old one, based on the concept of turbulent viscosity.

Table des matières

INTRODUCTION

La qualité de l'air dans les grandes agglomérations françaises est aujourd'hui devenue un problème de premier plan. Non pas parce que celle-ci s'est notablement dégradée, mais plutôt grâce à une prise de conscience collective de ce problème de santé publique. Dernièrement, l'étude du transport et de la dispersion des espèces traces dans l'atmosphère a pris une importance grandissante, en liaison avec ces problèmes d'environnement.

Dans ce contexte, le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD, Paris) joue un rôle moteur dans les études relatives aux négociations CTBT (Comprehensive Test Ban Treaty), d'arrêt complet des essais nucléaires et dans le projet ESQUIF (Etude et Simulation de la QUalité de l'air en Ile-de-France). Il dispose d'un modèle de circulation générale atmosphérique LMD-Z. Ce modèle est traditionnellement utilisé pour étudier le climat et ses possibles évolutions naturelles et anthropogéniques. Plus récemment, le modèle a été enrichi de schémas de transport pour les espèces traces (Hourdin et Armengaud, sous presse 1999) . Il devrait ainsi être capable de décrire suffisamment finement la dispersion des espèces traces sur quelques jours et quelques dizaines de jours et, ce, pour des échelles spatiales allant de la centaine à quelques milliers de kilomètres. Une première validation de ce modèle dans le cadre du transport des espèces traces à l'échelle du continent a été effectuée par Abderrhamane Idelkadi durant le printemps 99.

Ce stage a pour objectifs une nouvelle validation de LMD-Z Traceur dans le cadre du rétro-transport de traceurs à l'échelle continentale, ainsi que l'utilisation de ce modèle dans l'interprétation d'un épisode de polution à l'ozone étudié dans le cadre d'ESQUIF.

Dans la première partie de ce rapport, nous présenterons brièvement ESQUIF et le problème du transport de l'ozone. Ensuite, nous décrirons succintement la version transport du modèle LMD-Z, ainsi que les modifications que nous avons été amenés à y faire. La troisième partie sera consacrée à l'interprétation des simulations effectuées.

Chapitre 1

Le projet d'Etude et Simulation de la QUalité de l'air en Ile-de-France (*ESQUIF*)

Dans cette partie, sont décrits les tenants et les aboutissants de la campagne ESQUIF, ainsi que la période d'observation intensive ayant courru du 7 au 9 août 1998.

1.1 Présentation

ESQUIF est un projet de recherche engageant plusieurs laboratoires, dont le Laboratoire de Météorologie dynamique (IPSL), le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (IPSL), le Service d'Aéronomie (IPSL), et le Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, en collaboration avec AIRPARIF, Météo-France et le Laboratoire d'Aérologie. Le projet s'étale sur plusieurs années, de 1998 à 2000.

Le premier objectif du projet est de mieux comprendre les causes des épisodes de pollution photochimique en Ile-de-France. L'agglomération parisienne est particulièrement intéressante du fait de son ouverture aux masses d'air d'origines diverses, pouvant transporter, à longue distance, polluants primaires et secondaires, en entrée comme en sortie. Mais cette agglomération a aussi une taille suffisante pour que les émissions primaires produisent localement une pollution photo-oxydante, dans certaines conditions météorologiques. Le deuxième élément motivant l'étude de la région Ile-de-France est une meilleure documentation des sources, des concentrations de polluants, et de l'aérologie.

Deux méthodologies complémentaires permettent de comprendre les processus mis en jeu lors d'épisodes de pollution : *l'observation* et *la simulation numérique*. Une approche intégrée de l'étude de la pollution atmosphérique, consistant à mettre en oeuvre à la fois une hiérarchie de modéles et un dispositif expérimental complétant le dispositif de surveillance d'AIRPARIF, permettra de remédier au manque de contraintes dont souffrent les modèles actuels de simulation, et de posséder un modèle de simulation sans lequel on ne peut interpréter les observations.

Le second objectif est de regrouper les différentes méthodologies, tant numériques qu'expérimentales, développées au cours des derniéres années dans les laboratoires sus-cités, afin de pouvoir proposer aux différents organismes concernés par la qualité de l'air en Ile-de-France, une hiérarchie de modèles numériques dont la spécificité sera adaptée au problème posé (prévision, diagnostic, scénarios). Parmi les grandes questions soulevées par ces organismes figurent :

- la sensibilité des pics de pollution aux émissions locales de polluants : cette question est cruciale puisque, de sa réponse dépend l'efficacité des différentes mesures préventives locales "d'appoint" à prendre, pour éviter ces pics,
- la prévisibilité des pics de pollution, à un ou quelques jours d'échéance, qui permet également la mise en place de mesures préventives "d'appoint",
- la sensiblité des pics de pollution urbaine aux émissions à l'échelle nationale ou européenne : cette question indique la stratégie environnementale à adopter pour une amélioration "de fond", à long terme, de la qualité de l'air.

Ces différents objectifs ont conduit les responsables du projet à identifier quatre projets distincts, mais pour lesquels l'interaction est nécessaire :

1. L'étude du rôle des processus naturels dynamiques et physico-chimiques dans la qualité de l'air urbain (structure de la couche limite urbaine, production photochimique de l'agglomération).
2. L'étude du rôle des émissions dans la qualité de l'air urbain et la modélisation inverse. Le but est de mieux connaître les émissions anthropiques urbaines et leur impact.
3. L'interaction entre l'agglomération et le continent.
4. La prévision des pics de pollution en région parisienne.

L'étude présentée ici s'inscrit plus particulièrement dans le cadre du point $n^o 4$, l'interaction agglomération-continent lors des pics de pollution à l'ozone estivaux.

Un document scientifique décrivant le projet dans son ensemble a été rédigé au printemps 1998 . On touvera, à l'adresse :

http://www.lmd.ens.fr/ESQUIF/

une description du projet ainsi que les mesures effectuées dans le cadre de la campagne.

Durant l'été 1998, une première campagne de mesures a été effectuée. Les résultats en sont présentés dans la section 1.3.

1.2 Photochimie de l'ozone

L'étude présentée ici s'inscrit plus particulièrement dans le cadre de l'étude de l'interaction agglomération-continent, intéraction très importante dans le cas de pics estivaux d'ozone. En effet, ce polluant peut être produit localement mais aussi exporté sur des échelles continentales.

1.2.1 Les différents modes de production de l'ozone troposphérique

Une étude détaillée de la formation d'ozone et des photooxydants est nécessaire avant de mettre en place une stratégie efficace de réduction. En effet, si chacune des deux familles de précurseurs (NOx et Composés Organiques Volatils (COV)) est susceptible de permettre une réduction de la production d'ozone, l'effet sera différent suivant le type de régime chimique de production. Si un précurseur favorise la production d'ozone, une réduction de ses émissions reduira effectivement cette production, alors que la réduction de l'émission d'un autre précurseur pourra avoir, dans la même situation, un effet plus limité, voire inverse.

Par exemple, il a été montré que, pour des concentrations de NOx inférieures à 2 ppb (*bas NOx)*, la production d'ozone est quasiment proportionnelle à la concentration de NO et pratiquement indépendante de la concentration de COV. La production d'ozone est alors sensible aux NOx. La production photochimique de l'ozone augmente rapidement en fonction de NOx. Dans ce cas, des valeurs de 10 ppb/hr peuvent être obtenues.

Au contraire, pour des concentrations de NOx supérieures à 5 ppb (*haut NOx)*, la production d'ozone augmente avec une augmentation des COV, et diminue avec une augmentation de NOx. La production d'ozone est alors sensible aux COV. La production photochimique de l'ozone varie, dans ce cas, entre 1 et 2 ppb/hr selon les concentrations d'hydrocarbures.

Entre ces deux régimes se trouve une zone de transition.

1.2.2 Déplacement de masses d'air et différents régimes

Les masses d'air survolant des zones rurales présentent généralement de faibles concentrations de NOx (*bas NOx)* et sont donc, le plus souvent, dans un état sensible aux NOx durant la période estivale.Lorsqu'elles passent au dessus des zones urbaines, les émissions de NOx et COV peuvent faire basculer le système vers un régime de production d'ozone sensible aux COV (*haut NOx)*. En quittant la zone urbaine, la masse d'air voyage au dessus de régions faiblement émettrices en NOx. La dilution au sein de la masse d'air et les réactions chimiques réduisent la concentration des précurseurs de l'ozone. Nous nous trouvons alors dans une *zone de transition.*

L'exemple de ce trajet et des changements qu'il entraîne dans le régime de production de l'ozone, montre qu'il est très important de connaître l'évolution temporelle et l'extension spatiale des différents régimes chimiques (*bas NOx, haut NOx, transition)*, ainsi que les productions d'oxydants correspondantes. Savoir dans quel régime se trouve la masse d'air stationnant sur Paris à un instant t, et savoir s'il s'agit, ou non, d'ozone importé (le but du présent travail), doivent permettre d'adapter les mesures "d'appoint", locales, à la situation de pollution présente. D'autre part, à une échelle plus globale, la sensibilité de la production d'ozone à une variation des concentrations de NOx ou de COV est importante pour la prévision de l'impact des stratégies de réduction des émissions.

1.3 La Période d'Observation Intensive (POI) du 7, 8 et 9 août 1998

Les mesures de routine (concentrations) effectuées durant toute la durée du projet ESQUIF sont :

- Mesures permanentes de composés chimiques au sol (NOx, ozone, dioxyde de soufre), par le réseau AIRPARIF
- Mesures permanentes au sol d'hydrocarbures par DOAS (*Differential Optical Absorption Spectrometer*)
- Mesures permanentes au sol de rayonnement au sol et photolyse
- Mesures au sol sur alerte de nombreux composés chimiques (stations MILEAGE, mesures Ox)
- Mesures aéroportées d'ozone, d'humidité et de vent, par MOZAIC (programme européen de mesure de l'ozone et de la vapeur d'eau par des avions commerciaux)
- Mesures aéroportées de concentrations de fond

En complément de ces mesures est mis en place un dispositif exceptionnel lors des *périodes d'observation intensive*, périodes favorables aux épisodes de pollution urbaine. Les mesures sur alerte effectuées sont alors :

- Mesures aéroportées d'espèces chimiques avec l'ARAT (2 vols ciblés)
- Mesures aéroportées d'espèces chimiques sur alerte
- Mesures de la structure de la couche limite urbaine (Lidars, radiosondages, etc...)
- Mesures spécifiques de la composition des aérosols sur alerte

Les POI sont déclenchées par un comité de POI, en veille du 15 juillet au 15 août. Une période de pré-POI est posée, trois jours avant le premier jour de POI, sur la base des prévisions météorologiques issues de Météo-France, mais aussi en considérant leur cohérence avec les prévisions météo issues du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (Reading, UK). Le modèle CHIMERE

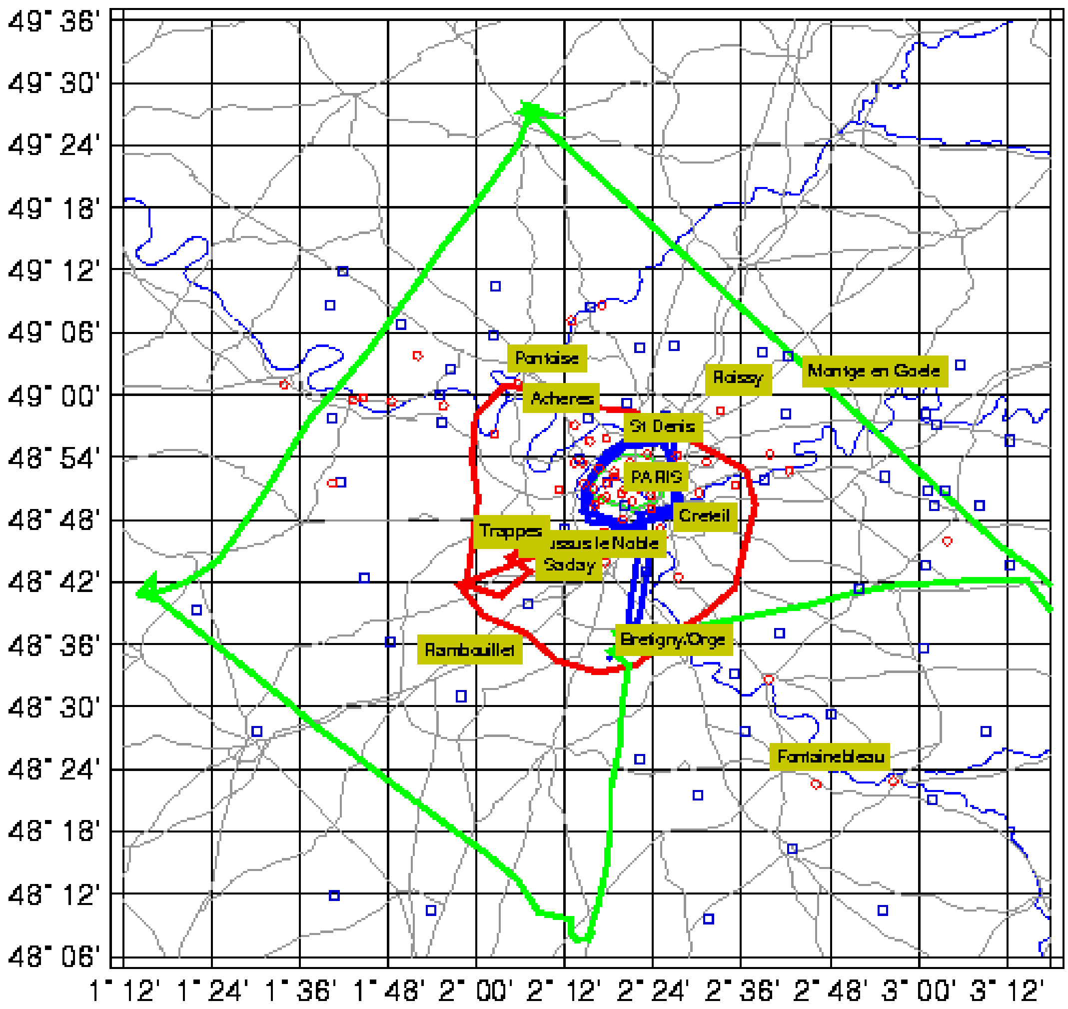

Fig. 1.1 – *Trajectoires des vols effectués sur alerte : vols "périphérique", "agglomération", "Ile-de-France". Des vols méso-échelles Paris - Charleville - Dieppe - Le Mans - Semur-en-Auxois - Paris (voir figure 3.10) sont aussi effectués sur alerte.*

de simulation et de prévision de la qualité de l'air en région parisienne, développé au LMD et au SA, effectuant des prv́isions à J+3, fournit aussi des informations importantes. A la veille de la POI, la prévision effectuée par AIRPARIF permet également de confirmer l'intérêt des expériences menées.

3 POI ont été déclenchées du 15 juillet au 15 août 1998. Nous nous intéresserons uniquement à celle qui a courrue du 7 au 9 août, car elle s'est avérée trés intéressante pour la modélisation, et par sa diversité.

Le début du mois d'août a été favorable à la formation de photo-oxydants, avec, en particulier, 4 jours de canicule (du 8 au 11 août) avec des températures maximales entre 35 et 37 degrés, en région parisienne. Durant ces quatre jours, des dépassements de seuil de Niveau 2 sont observés, avec des concentrations d'ozone battant les records sur pratiquement toutes les stations du réseau au sol le 11 août. La prévision a été bonne pour les premiers jours mais donnait une dégradation des conditions pour les 10 et 11 août. Ainsi, il a été choisi de concentrer les observations sur le début de la période. La figure 1.2 représente l'évolution temporelle de la concentration d'ozone, en différents points de la région parisienne, durant la POI. La figure 1.3 représente les profils de température potentielle pour les 7, 8 et 9 août 1998, ainsi qu'une estimation de la hauteur de la couche limite et de la couche résiduelle.

- <u>le vendredi 7 août</u>
  Les masses d'air sont d'origine océanique (Ouest/Nord-Ouest). Elles sont donc assez propres. Le vent est très faible (tendance Nord-est sur Paris) et l'on peut s'attendre à une forte production locale d'ozone. La couche limite est basse (vers 800m à Trappes). Les concentrations d'ozone restent modérées.
- <u>le samedi 8 août</u>
  L'épisode de pollution s'établit, avec une situation très chaude. Cette journée est caractérisée par une forte inversion radiative en matinée, lente à détruire (destruction vers 12hTU), mais une couche limite haute ensuite (2000-2500m). Le vent est faible de secteur Est. Le pic d'ozone se situe vers 12-13hTU, avec une descente rapide ensuite.
- <u>le dimanche 9 août</u>
  Il connaît à peu près la même évolution de couche limite que son prédecesseur, avec une hauteur encore plus importante en fin d'après-midi(2500-3000m). Le vent est faible de secteur Sud à Est. La montée rapide de la concentration d'ozone durant la matinée est suivie, au contraire de la veille, d'un palier et d'une autre montée, avec les maxima en fin d'après-midi.

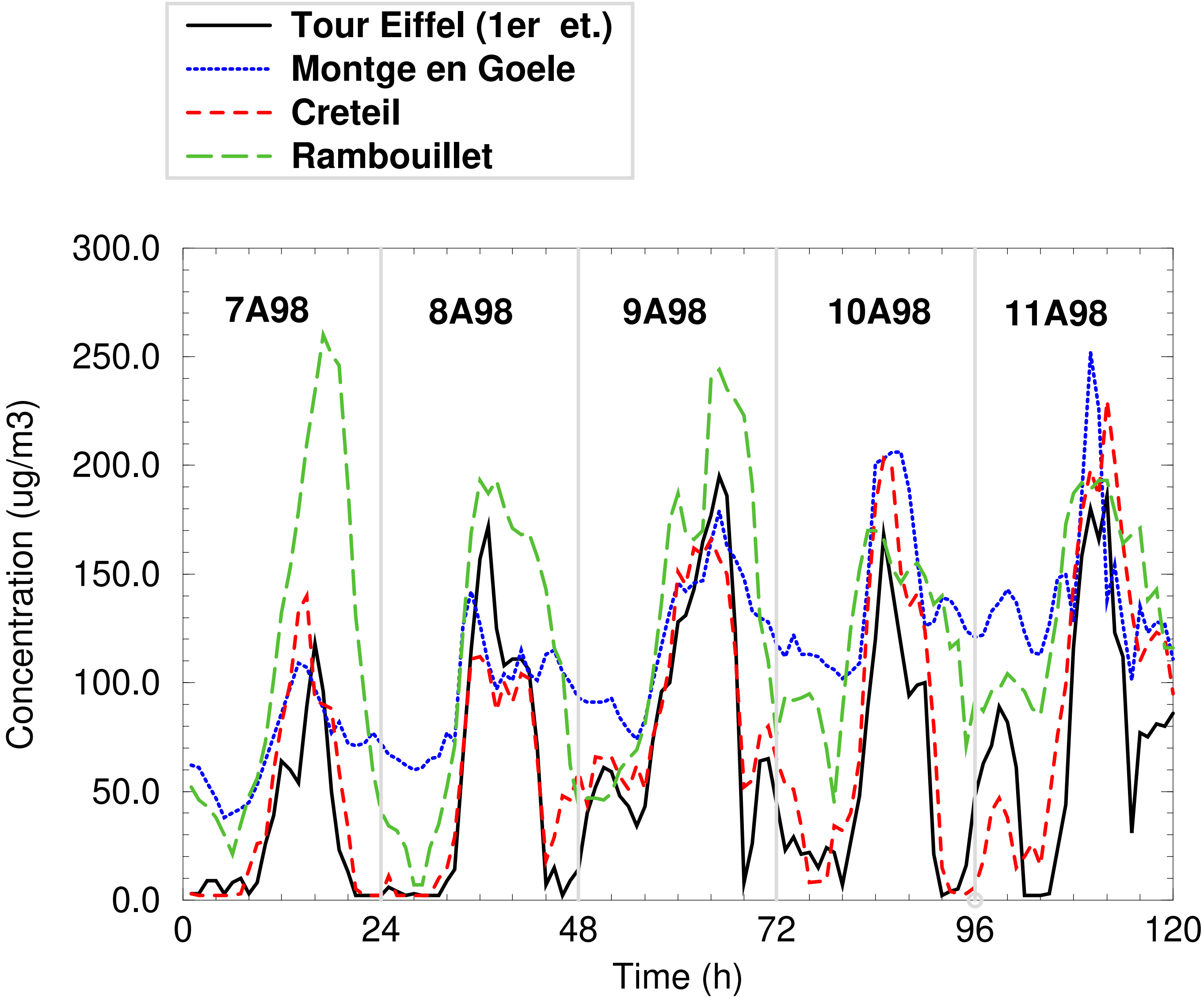

Fig. 1.2 – *Mesures d'ozone effectuées par les stations AIRPARIF du 7 au 11 août 1998. De forts maxima sont observés à Rambouillet, sous le vent de Paris, les 7 et 9.*

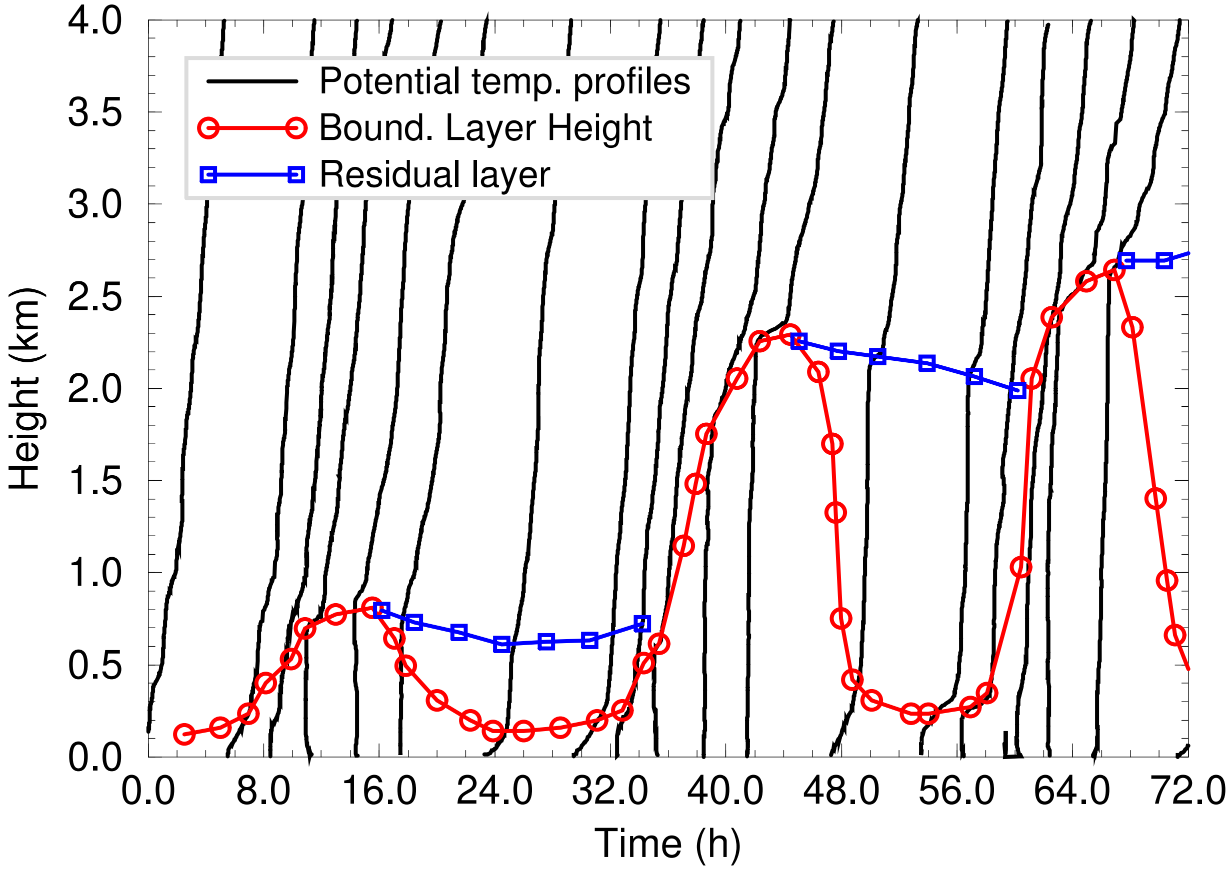

FIG. 1.3 – *Sondages de Trappes (Yvelines) - Profils de température potentielle pour les 7, 8 et 9 août 1998, et estimation de la hauteur de la couche limite et de la couche résiduelle (L.Menut, avril 99).*

Chapitre 2

Description du modèle LMD-Z Transport

2.1 Présentation de LMD-Z

Le modèle LMD-Z est bâti sur la résolution numérique des équations primitives de la météorologie en utilisant la méthode des différences finies.

Il est composé de deux parties distinctes : d'une part le code hydrodynamique et d'autre part un jeu de paramétrisations physiques avec notamment le calcul du transfert radiatif dans l'atmosphère et du mélange turbulent dans la couche limite. La version actuelle est une évolution du modèle original décrit par Sadourny et Laval (1984) et par Harzallah et Sadourny (1995). Elle a été considérablement améliorée sur le plan informatique et permet aujourd'hui une utilisation beaucoup plus souple.

Dans LMD-Z (Z pour zoom), les coordonnées horizontales peuvent être choisies de manière à permettre un raffinement de la résolution du modèle sur une région du globe particulière. Le zoom permet d'atteindre des échelles spatiales de l'ordre de la cinquantaine de kilomètres sur une région entière.

Une description très complète du code LMD-Z est disponible en ligne sur Internet à l'adresse:
http://www.lmd.jussieu.fr/chourdin/doc/terre/main/main.html.

La répartition des couches verticales est irrégulière de sorte que la première couche décrit les quelques premières dizaines de mètres et les dernières couches décrivent plusieurs kilomètres.

Les calculs concernant la dynamique sont effectués sur une grille 3D avec des échanges horizontaux entre mailles, alors que la partie physique peut être vue comme une juxtaposition de colonnes d'atmosphère n'interagissant pas entre elles (figure 2.1).

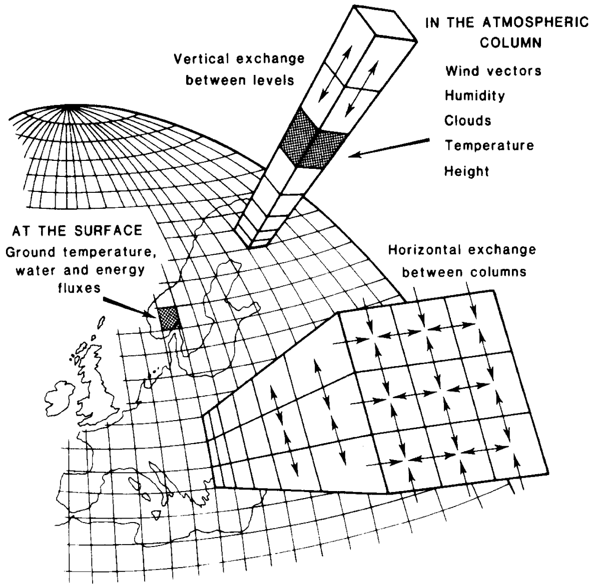

FIG. 2.1 – *Représentation schématique d'une grille d'un MCGA, d'après McGuffie et Henderson-Sellers (1997).*

2.2 Le modèle LMD-Z transport

Ces dernières années, un travail important a été accompli pour développer une version traceur du modèle atmosphèrique (LMD-ZT). Il a fallu ainsi adjoindre au modèle climatique la capacité de représenter le cycle des espèces traces, avec l'inclusion du transport de ces dernières à grande échelle, la paramétrisation du mélange turbulent dans la couche limite et du transport vertical par la convection.

2.2.1 Schémas de transport

L'inclusion du transport à grande échelle des espèces traces est basée sur l'utilisation des schémas en volumes finis.

Les schémas en volumes finis ont tous été proposés initialement par Van Leer (1977). Ils sont construits de manière à être conservatifs et Van Leer a proposé une façon simple d'assurer leur monotonie.

Une étude effectuée au laboratoire (Hourdin et Armengaud, sous presse 1999) pour tester ces schémas avec différentes résolutions spatiales montre que le schéma de Van Leer I est bien adapté pour le transport des traceurs par des vents atmosphériques 3D. Le schémas de Van Leer I, implémenté dans LMD-Z, est conservatif, positif, monotone et ne modifie pas une distribution uniforme de traceur.

2.2.2 Schéma de convection et couche limite

Le schéma de convection utilisé pour LMD-Z est celui de Tiedtke. Il offre la possibilité d'utiliser les flux de masse montants et descendants pour calculer le transport vertical des traceurs. La partie théorique de ce schéma est bien expliquée dans les articles de Tiedtke (1989, 1991, 1993). L'introduction de la composante traceur dans le schéma de convection de Tiedtke est calquée sur la paramétrisation de la vapeur d'eau (cf. note technique de Boucher et al. (1995)).

L'introduction de la composante traceur dans la couche limite dépend du traceur que l'on veut étudier. Andersen (1998), a discuté les différentes possibilités qui existent pour paramétriser dans LMD-Z le soulèvement des poussières d'origine désertique dans les premières couches de l'atmosphère. Dans la couche limite, le mélange turbulent est représenté par une formulation de *diffusivité turbulente*. Les coefficients d'échanges et le coefficient de frottement à la surface sont calculés à l'aide d'une fonction dépendante du nombre de Richardson. Lorsque la condensation survient, le nombre de Richardson est interpolé entre ses valeurs sèches et humides.

La capacité du modèle LMD-ZT à représenter le cycle du randon-222 et du plomb-210 a été évaluée par intercomparaison avec d'autres modèles de grande échelle et à l'aide d'observations (Armengaud, 1999) .

2.2.3 Etat initial et simulations

Pour fonctionner, le modèle a besoin, en entrée, de conditions initiales et de conditions aux limites.

Pour créer l'état initial, on doit disposer de données météorologiques correspondant à l'instant initial de la simulation que l'on désire réaliser. Le modèle est interfacé avec les données ECMWF en utilisant le format NetCdF (figure 2.4). Il s'agit d'analyses effectuées au Centre Européen de Prévision à Moyen Terme : le modèle du Centre permet d'obtenir des champs définis sur toute une grille 3D, en interpolant les observations ponctuelles détenues.

Par la suite, des méthodes d'interpolation propres au LMD-Z permettent d'adapter ces données à la grille du modèle. Ces données permettent, en outre, de contraindre le modèle à suivre une situation réelle (voir section 3.1.3).

Pour modéliser le cycle des traceurs à l'aide de LMD-ZT, deux approches sont généralement utilisées:

- la méthode dite "on line"
  Elle consiste en l'introduction directe de la composante traceur dans le modèle lui-même. Le calcul des différents processus s'effectue simultanément.
- la méthode dite "off-line"

Elle consiste en la création d'un modèle de traceur indépendant qui fonctionne en important les variables dynamiques et physiques préalablement calculées au cours d'une première simulation on-line. Le Laboratoire a développé la capacité à stocker pendant une simulation du modèle "on-line", l'ensemble des champs nécessaires pour recalculer, "off-line", le transport des espèces traces (figure 2.4). Cette potentialité permet, de disposer de simulations beaucoup moins lourdes numériquement. On fait appel ainsi à trois fichiers où sont stockés respectivement les champs dynamiques, les champs météorologiques nécessaires au calcul de la convection et de la couche limite et les variables correspondantes au lessivage. Cette dernière méthode est moins coûteuse en temps de calcul et permet donc un grand nombre d'expériences dès lors que le coût de la partie transport est faible devant le calcul de la météorologie (ce qui est le cas pour une simulation de type ESQUIF). Le modèle off-line a été validé sur la campagne ETEX par Idelkadi (1999). Contrairement à la méthode on-line, la méthode off-line permet des simulations dans le sens chronologique inverse, opération dont le paragraphe suivant montre l'intérêt dans le cadre de notre étude.

2.2.4 Simulation rétro et transport d'espèces traces

2.2.4.1 Principe fondateur

La réciprocité du transport atmosphérique peut être utilisée en suivant une particule d'air particulière, selon l'approche lagrangienne classique en Mécanique des Fluides. De tous les phénomènes entrant en compte dans le transport d'espèces traces, on ne peut ainsi que considérer l'advection de grande échelle.

L'approche utilisée dans le modèle LMD-Z Transport, version "rétro", elle, tire partie de la généralité de cette réciprocité, et tire aussi partie du fait que les mêmes outils peuvent être utilisés dans les versions directe et inverse. Le point essentiel dans la justification de cette approche inverse, eulérienne cette fois, est la symétrie temporelle des équations de transport des espèces traces. On peut alors conserver, dans le transport inverse de traceurs, des paramétrisations de phénomènes sous-mailles, comme le mélange dans la couche limite planétaire.

Hourdin et Issartel ont validé cette approche inverse du transport des traceurs, dans le cadre de l'évaluation du réseau de surveillance du xenon, mis en place à la suite du Traité de Vienne relatif à l'interdiction des essais nucléaires dans le monde.

2.2.4.2 Utilisation dans la campagne ESQUIF

Considérons les masses d'air stationnant au dessus d'un point A, à un instant donné t. Toutes les particules composant ces masses d'air ont eu, a priori, des trajectoires différentes avant d'arriver au point A. Si on avait pu, avant le temps t d'observation, marquer ces particules, on aurait été à même de déterminer d'où elles venaient. Cela aurait alors formellement correspondu à un transport direct de "traceurs".

En injectant au temps t, au point A, et à une altitude donnée, une certaine quantité de "traceur - masse d'air" et en effectuant son transport inverse, on obtient alors, pour un instant t' antérieur à t, une carte de probabilité de provenance de la masse d'air. L'utilisation, dans le cadre de l'interprétation des mesures d'ozone effectuées durant la POI 2 d'août 1998, de LMD-Z Transport rétro est alors claire : en injectant un traceur dans chaque couche verticale de la grille au-dessus d'un point choisi, et à une date donnée (pour nous, des instants caractéristiques de la POI 2), on identifie, qualitativement, les provenances des masses d'air stationnant au point et à la date considérés.

Dans la section 3, les résulats des simulations effectuées sont présentés sous différents formats, chacun correspondant à une caractéristique particulière de la masse d'air que l'on cherche à mettre en évidence. Ces différents formats sont présentés ici sous la forme de mots-clés, repris par la suite en légende de figures.

- *Provenance* (exemple : fig 3.8) : pour chaque niveau d'injection, on trace la moyenne temporelle de la concentration, à ce niveau, du traceur initialement injecté à ce niveau, depuis la date d'injection jusqu'au 1^{er} août. Les traceurs étant plus transportés horizontalement que verticalement, l'intérêt de cette visualisation est de donner qualitativement l'allure de la trajectoire suivie par l'air arrivé au niveau considéré, et donc une idée du transport grande échelle.
- *Echange* (exemple : fig 3.11) : pour chaque niveau, on trace la moyenne temporelle de la concentration dans la première couche du traceur injecté à ce niveau, depuis la date d'injection jusqu'au 1^{er} août. Les sources de polluants émettant dans la plus basse couche de l'atmosphère, on a là, qualitativement, l'intensité de la pollution de la masse d'air terminant sa course au niveau considéré. Plus cette carte des échanges sera continentale, plus on pourra penser que l'air transporté était pollué avant son arrivée sur le lieu d'injection. Inversement, si cette carte des échanges est océanique, l'air considéré arrivera propre.

Les valeurs des concentrations figurées en légende n'ont pas une importance fondamentale, puisqu'elles sont directement reliées à la quantité de traceur injecté initialement, qui a été choisie arbitrairement. Ce qui compte en revanche, ce sont les concentrations relatives, puisqu'on fait figurer des concentrations s'étalant sur trois ordres de grandeur, et que ces concentrations sont le reflet de probabilités de provenance, comme expliqué auparavant.

2.2.5 Réduction de la grille de stockage

La taille des fichiers que l'on pensait obtenir pour nos simulations ESQUIF, ajoutée au fait que la campagne ESQUIF ne concerne pas, par essence, le globe entier, nous a amené à modifier le stockage des paramètres dynamiques et physiques

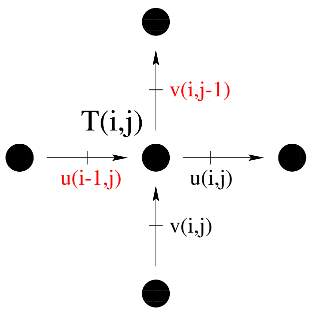

FIG. 2.2 – *Maille (i,j) de la grille dynamique et variables correspondantes*

calculés durant la simulation on-line : on ne stocke plus ces données que sur une *sous-grille* définie au préalable, et dont on pense qu'elle ne constitue pas une perte d'information énorme pour les simulations off-line ultérieures. La figure 2.3 présente la grille physique et la grille scalaire utilisées par le modèle, ainsi que les flux de masse horizontaux stockés.

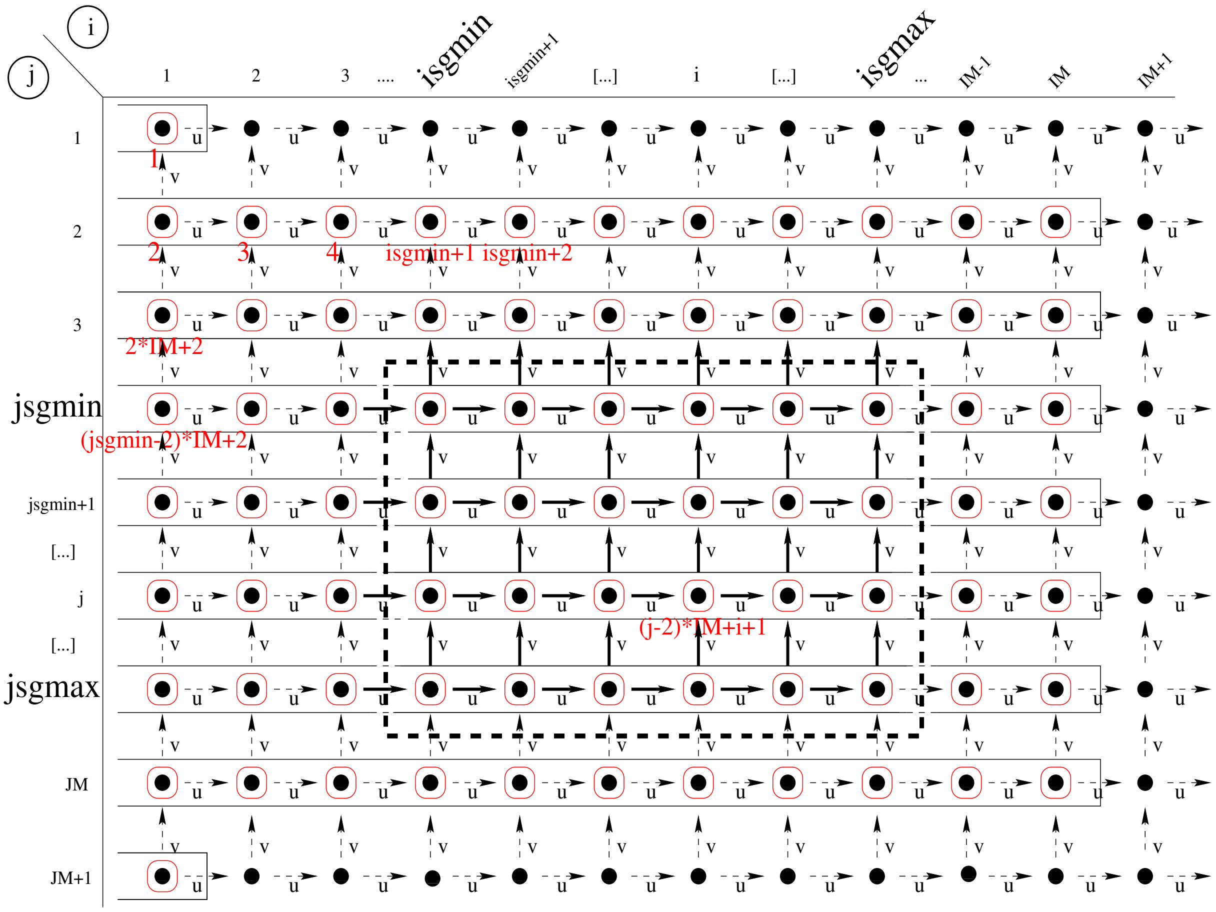

FIG. 2.3 – *Grille physique (points noirs encadrés) et grille scalaire (points noirs). La sous-grille de stockage est également montrée. On figure aussi les flux horizontaux calculés (flêches pointillées), calculés et stockés (flêches pleines) durant la simulation on-line, ainsi que la correspondance (en gris) entre un point (i,j) de la grille scalaire et le point physique associé. La façon dont sont associés, à la maille (i,j) de la grille dynamique, les flux entrant et sortant (figure 2.2) implique que : le flux de masse longitudinal est stocké pour les points (i, j, k), i allant de isgmin-1 à isgmax, j allant de jsgmin à jsgmax, k couvrant toutes les couches verticales du modèle ; le flux de masse méridien est stocké pour les points (i, j, k), i allant de isgmin à isgmax, j allant de jsgmin-1 à jsgmax, k couvrant toutes les couches verticales du modèle ; φ_c, h_c, w_g sont stockés pour les points (i, j, k) de la sous-grille uniquement, pour toutes les couches verticales ; la pression au sol est stockée sur la sous-grille, uniquement pour la première couche.*

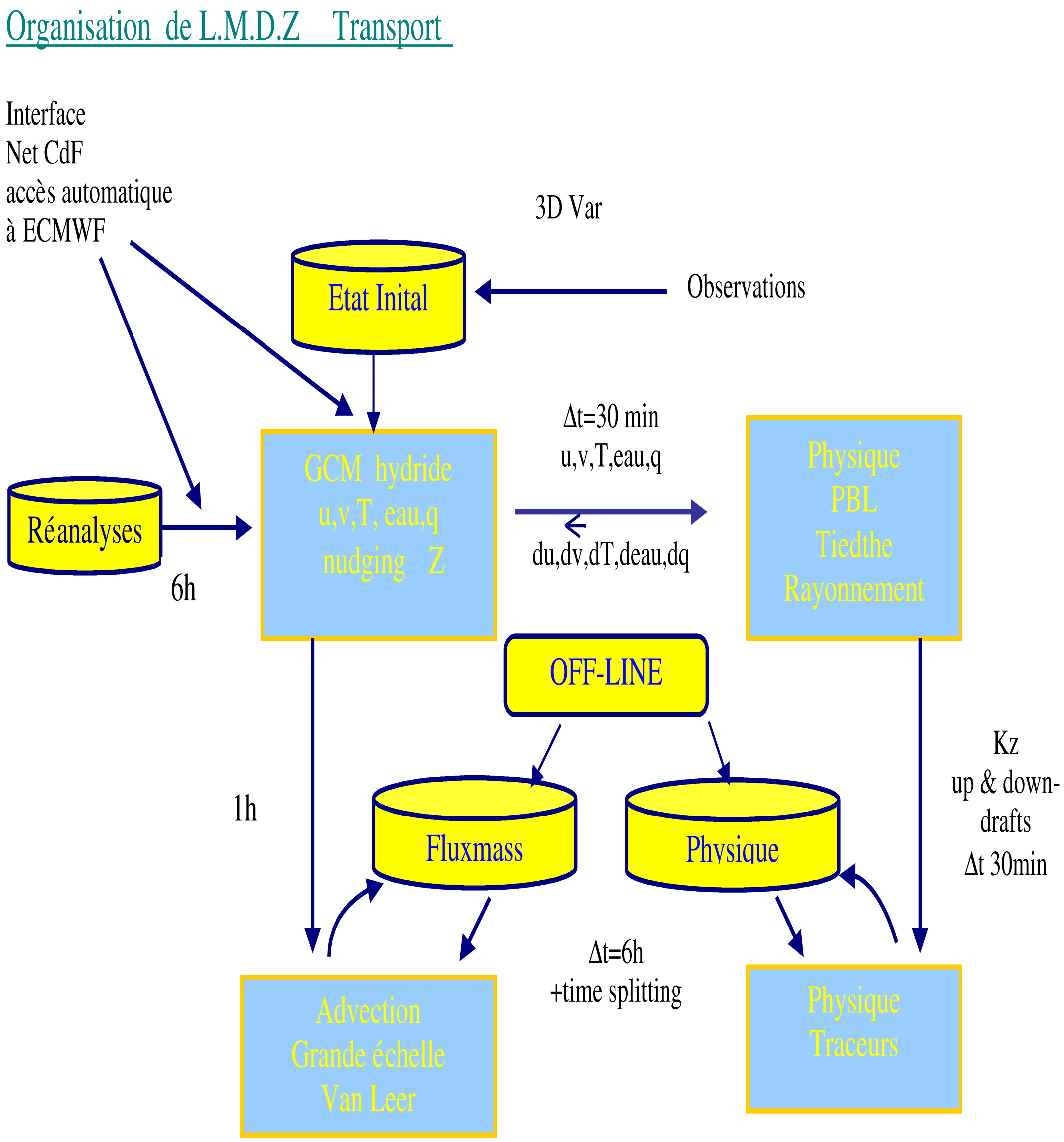

FIG. 2.4 – *Représentation schématique du modèle LMD-ZT. Van Leer: schéma d'advection utilisé. Tiedtke: schéma de convection utilisé. PBL: Planetary Boundary Layer (couche limite). Kz: coefficient d'échange calculé dans la couche limite. Up-downdrafts: panaches ascendants et descendants simulés lors du calcul de la convection. Nudging: "poussé" ou forcé par des réanalyses.*

Chapitre 3

Simulation en mode forcé

Les différentes étapes de cette simulation seront décrites dans ce chapitre. L'analyse des résultats est également présentée.

3.1 Simulation

3.1.1 Grille et Sous-grille

Le premier travail consiste à choisir la grille pour le modèle. Nous avons conservé, pour notre première simulation, le nombre de points de grille standard du modèle climatique non zoomé (96x72x19). Il s'agit aussi de se donner un zoom centré sur la zone que l'on cherche à étudier. Le zoom choisi est donc centré sur Paris ($2.28^o E$, $48.75^o N$), et la résolution est accrue d'un facteur 6, ce qui permet d'atteindre une résolution de 80x80km à Paris. La figure 3.1 présente la grille utilisée dans notre simulation. Ensuite, il faut définir la zone de la grille dont on souhaite stocker les données physiques et météorologiques, en vue des simulations off-line. Le choix a été fait sachant que :

- L'Europe de l'Ouest est sous l'influence des masses d'air venues de l'océan Atlantique
- Lors de la POI du 7 au 9 août 1998, un système anticyclonique se trouvait sur l'Europe du nord, générant de faibles vents d'Est Nord-Est sur Paris.

La figure 3.2 représente la sous-grille de stockage. Les points extrémaux de cette grille sont les points ($50^o W$, $70^o N$) et ($40^o E$, $30^o N$). On fait ainsi une économie d'un facteur 4 dans la taille des fichiers de stockage. La figure 3.3 montre le résultat obtenu pour le stockage du vent, à l'issue de la simulation on-line.

3.1.2 Etat initial

L'état initial est défini à partir de l'importation des données du centre européen de prévision à moyen terme de Reading (Royaume-Uni) pour le 1^{er} août 1998, 0

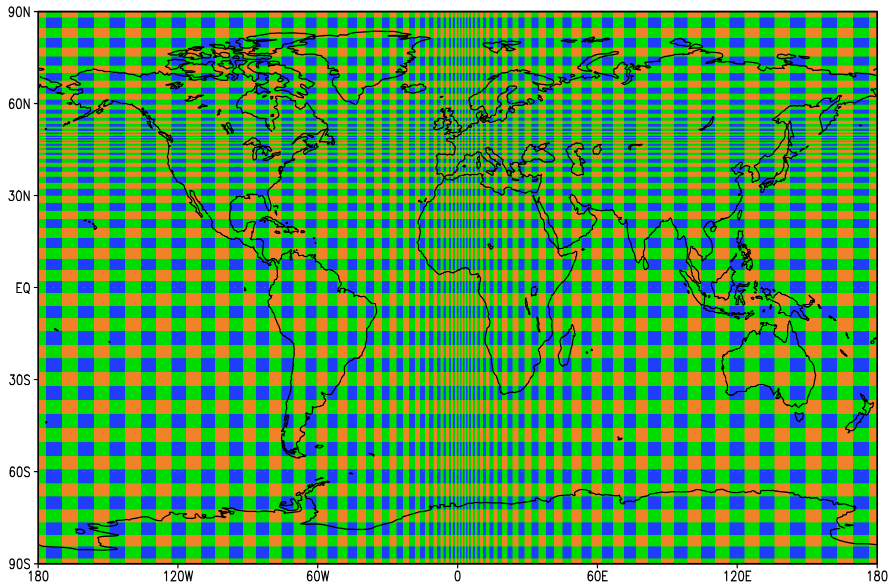

FIG. 3.1 – *Grille obtenue pour 96×72×19 points. Zoom accru d'un facteur 6 sur Paris (2.28°E, 48.75°N).*

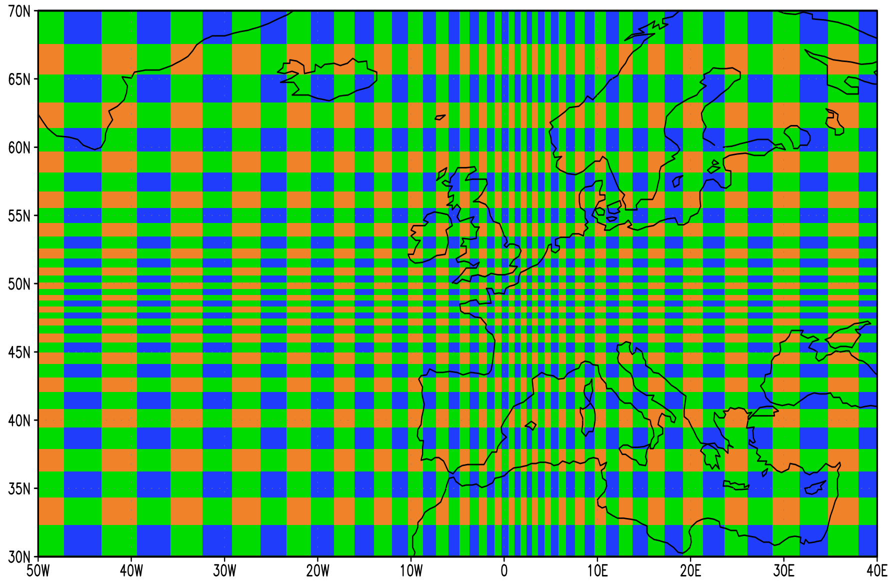

FIG. 3.2 – *Sous-grille de stockage utilisée dans nos simulations.*

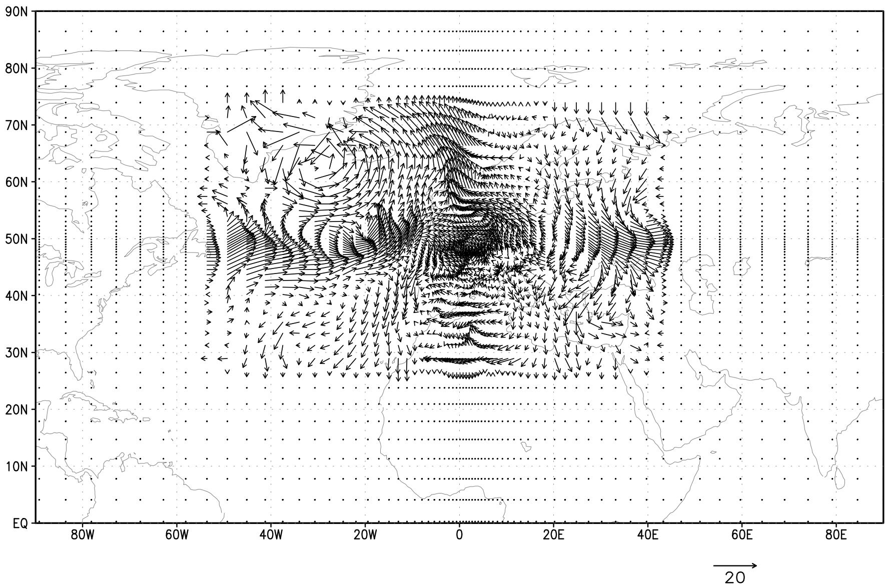

FIG. 3.3 – *Vecteur vent pour le 10 août 24:00. Le stockage n'a été effectué que sur la sous-grille souhaitée.*

heure.

3.1.3 Simulation on-line

La simulation effectuée s'étend du 1^{er} au 10 août 1998, incluant donc la période de POI. A chaque pas de temps, les champs météorologiques de vitesses du vent u et v, de température T et de pression p_s sont contraints à suivre les analyses du Centre Européen (voir section 2.2.3). En pratique, un terme de relaxation $\frac{X^{rea}-X}{\tau}$ est ajouté dans les équations d'évolutions des différentes variables. Nous avons adopté la même valeur de la constante τ pour tous les champs météorologiques (vents, température et pression), à savoir une demi-heure. Cette valeur correspond à un forçage très fort : nous y avons été contraints par le fait que laisser un peu plus de liberté au modèle le faisait diverger (la raison de ce problème a été depuis identifiée). Dans cette simulation, le calcul de la dynamique s'effectue toutes les six minutes, tandis que les paramètres physiques sont eux calculés toutes les trente minutes. Pour l'utilisation dans les simulations off-line des sorties météorologiques, le stockage des flux de masse horizontaux et verticaux (variables dynamiques) et celui des variables physiques s'effectuent toutes les trois heures. Deux champs particuliers sont aussi stockés : l'eau liquide et la vapeur d'eau.

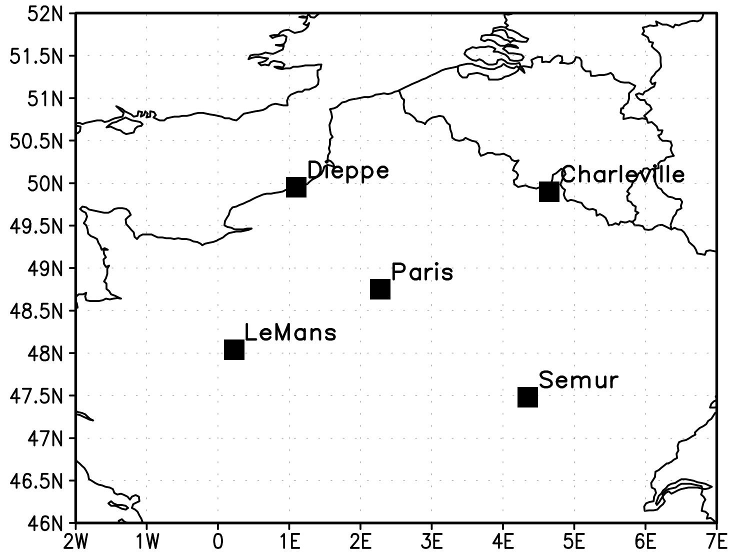

FIG. 3.4 – *Villes où sont injectés les traceurs dans les simulations off-line. Elles ont été choisies par rapport aux vols méso-echelles effectués dans le cadre de la campagne ESQUIF.*

3.1.4 Simulations off-line

Différentes simulations off-line ont été menées. Toutes étaient des simulations retro. Nous pouvons, grossièrement, les subdiviser en deux familles :

- Injection à Paris ($2,28^o E$,$48,75^o N$),à 6 heures, à midi et à minuit, pour chaque jour de la POI
- Injection et le 8 et le 9 août, à 6 heures, en différents points de l'itinéraire des vols méso-échelles effectués à ces dates. Ces points sont :
  - Dieppe ($1,1^0 E$, $49,95^o N$), en Normandie
  - Charleville ($4,65^0 E$, $49,90^o N$) à la frontière belge
  - Semur ($4,35^0 E$, $47,48^o N$) en Bourgogne
  - Le Mans ($0,23^0 E$, $48,04^o N$)

La figure 3.4 présente ces différentes villes.

Pour chaque simulation, il y avait injection d'un traceur différent dans chacune des 12 premières couches verticales au dessus du point considéré. L'injection se faisait en une seule fois. Une date d'injection correspond à une simulation off-line.

3.2 Résultats et analyses

Une analyse de la situation durant les trois jours de la POI a déjà été menée et a fait l'objet d'un "premier bilan", paru en octobre 1998, et d'un "rapport d'éta-

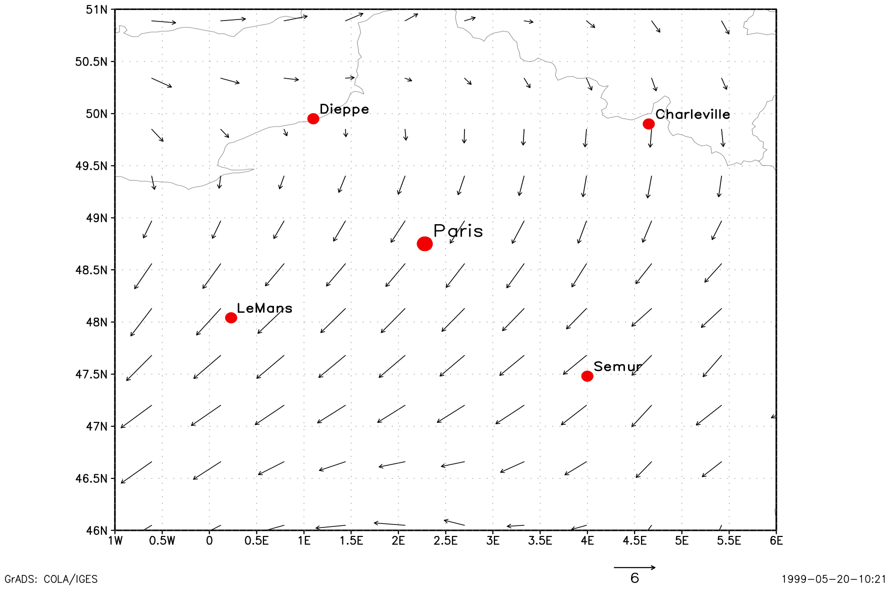

FIG. 3.5 – *vent au sol le 7 août 1998, à 8 heures, sur la région parisienne.*

pe" paru en avril 1999. Nous chercherons à voir en quoi les résultats obtenus par notre simulation confirment et complètent ces analyses. D'autre part, la comparaison (seulement qualitative) des rétropanaches que nous avons obtenus, à ceux obtenus par Robert Vautard, par une autre méthode, permettra, dans une certaine mesure, de valider le modèle rétro off-line de LMD-Z Transport.

Deux facteurs s'avèrent particulièrement importants dans le cas de la pollution urbaine par l'ozone : la *production locale urbaine*, et *l'importation d'ozone* déjà formé à l'arrivée sur la région. La POI étudiée permet de montrer cette diversité de situation.

3.2.1 Vendredi 7 août 1999

C'est un jour de pollution modérée avec une forte production locale : pollution modérée par les valeurs d'ozone enregistrées (sauf à l'ouest de la région) ; production locale par la formation d'un panache fortement anisotrope et par l'origine océanique des masses d'air.

Le vent, très faible, est de tendance NE (figure 3.5). Les mesures du vol MERLIN (figure 3.6) indiquent que le vent forme un panache avec des différences importantes entre l'Est de l'agglomération (65-70 ppb) et l'ouest (jusqu'à 120 ppb), avec un dégradé continu entre ces zones. Les vols au-dessus du périphérique donnent aussi un gradient entre l'Est (60-65 ppb) et l'Ouest de Paris (100 ppb). Le gradient de concentration s'accroît avec le temps dans l'après-midi. L'ozone n'augmente pas, durant la journée au vent de l'agglomération, alors qu'il augmente sous son vent.

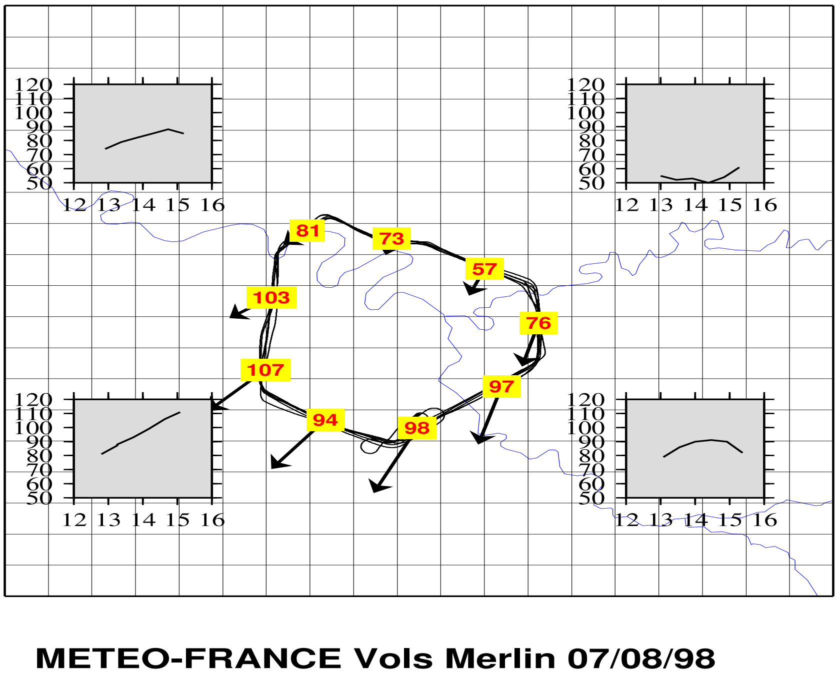

FIG. 3.6 – *Ozone (en ppb) au 5ème tour du vol Ile-de-France du 07/08 après-midi, avec le vent MERLIN. Pour chaque point NE, NW, SW, SE, on trace aussi dans les petits carrés gris l'évolution, à chaque passage, de l'ozone, en fonction de l'heure TU (R. Vautard, avril 99).*

Ceci est clairement la marque d'une production locale d'ozone.

L'origine des masses d'air présentes au dessus de Paris à midi confirme l'hypothèse d'une faible importation de pollution. La figure 3.7 montre cette origine par une approche lagrangienne, consistant à transporter des particules, effectuée par R. Vautard et présentée dans le rapport d'étape. La figure 3.8 montre l'origine des masses d'air calculée avec notre approche, eulérienne. Les masses d'air, venues de l'océan Atlantique, sont passées par le sud de l'Angleterre avant d'arriver directement à Paris. Elles sont donc relativement propres. Par ailleurs, la comparaison des figures 3.7 et 3.8 valident LMD-ZT, puisque l'origine des masses d'air obtenue par la simulation retro lagrangienne est comparable avec l'origine trouvée par notre approche, retro eulérienne.

3.2.2 Samedi 8 août 1998

C'est un jour de pollution forte, avec forte production locale. La figure 3.9 montrant la provenance des masses d'air présentes sur Paris à 6 heures, le 8, indique que celles-ci ne sont pas passées par des régions fortement polluées, ce qui confirme que le pic d'ozone observé est plutôt dû à une production locale, qu'à une importation d'ozone. Ceci est d'autant plus vrai que, pour qu'il y ait importation importante d'ozone, il faut que les jours précédents soient des jours à forte pollution,

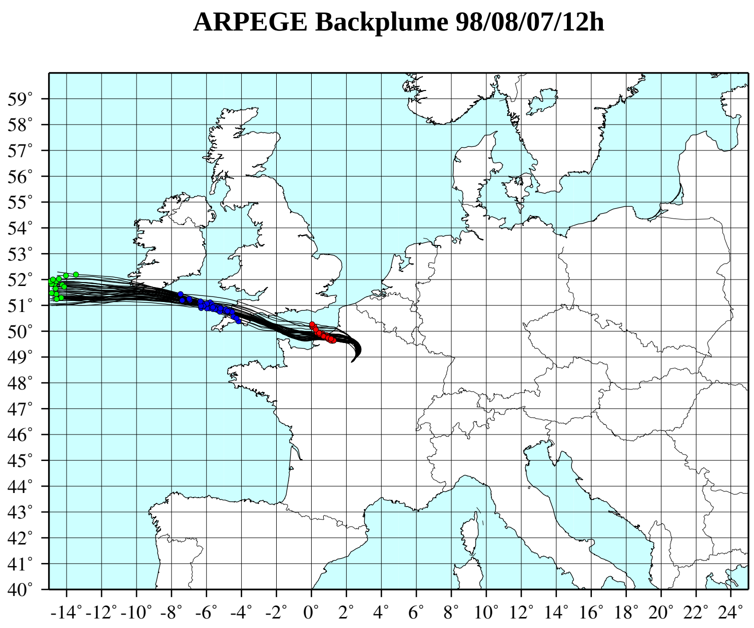

FIG. 3.7 – *Rétropanache du 07 août arrivant à midi (MODELE POLLUX de l'IPSL utilisant les analyses ARPEGE de vent).Les rétropanaches représentent 50 trajectoires en arrière, avec tirage aléatoire de l'altitude durant la période convective (9h-18h), entre 0 et 1500m (R. Vautard, avril 99).*

ce qui n'était pas le cas du 7.

Le vol méso-échelle du matin (figure 3.10) donne des concentrations fortement inhomogènes, minimales à Semur et Charleville, augmentant d'est en ouest sur toute la région considérée, et du nord au sud entre Dieppe et Le Mans. La figure 3.11 montre, pour chacune des villes situées aux points cardinaux du vol, les échanges qu'ont eu avec le sol les masses d'air présentes sur ces villes, à l'altitude du vol, le 8 à 6 heures. Le fait que l'on ne soit pas en situation de forte importation d'ozone, le 8, n'exclue a priori pas l'idée que le transport de polluant soit à l'origine des inhomogénéités observées.

Les minima observés à Charleville et Le Mans sont ainsi aisément explicables par notre simulation. Que les concentrations à Dieppe soient plus élevées que celles à Charleville se conçoit. Les observations faites à Semur sont, en revanche, assez déroutantes, par rapport à ce que l'on attendait. Le fait qu'il y ait eu de forts échanges avec les régions montagneuses du sud de l'Allemagne, de Suisse et d'Autriche s'explique sans doute par le relief de ces régions, qui fait que le traceur injecté à 1000 mètres d'altitude à Semur a plus d'èchange avec la surface au-dessus de ces régions qu'au dessus des plaines. Le résultat inattendu obtenu pour Semur peut peut-être aussi s'expliquer par les limites de résolution de la grille utilisée. On ne peut attendre d'elle qu'elle rende compte de différences d'échelles spatiales inférieures à la maille du modèle! Il se peut aussi que les données du vol Meso ne soient pas toutes bonnes. La question reste en suspens.

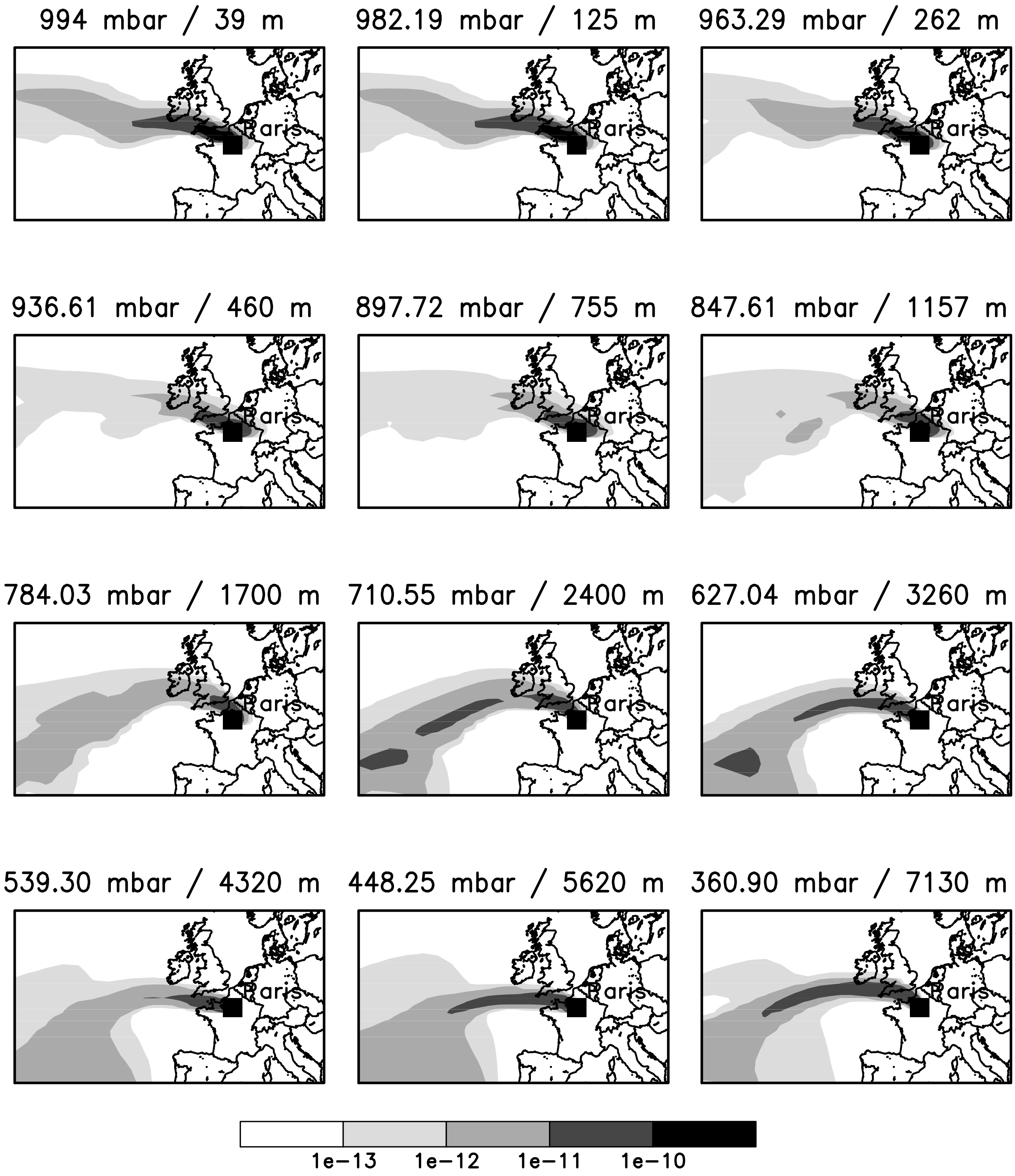

FIG. 3.8 – *Provenance des masses d'air présentes au dessus de Paris le 7 à 12h.*

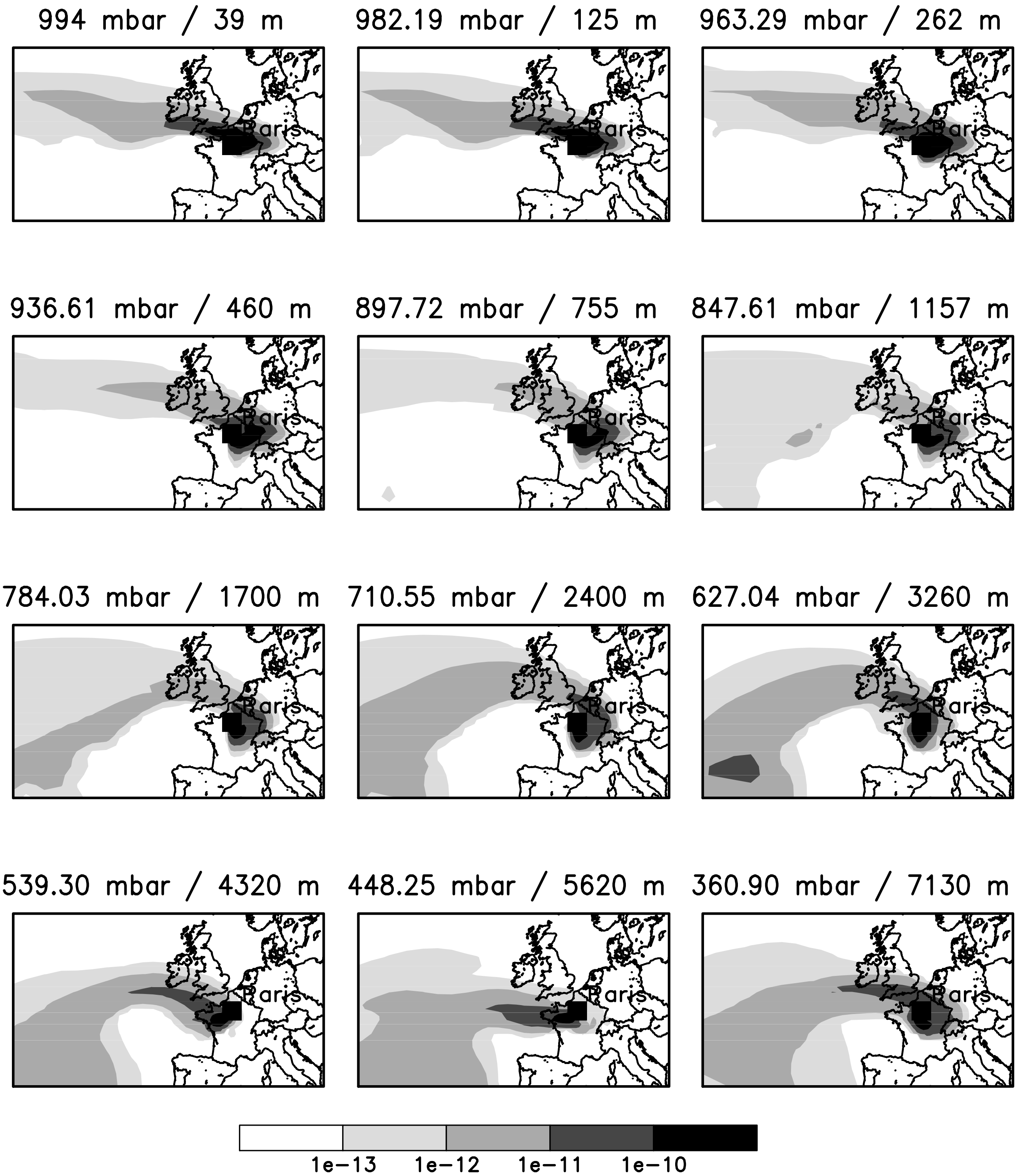

FIG. 3.9 – *Provenance des masses d'air présentes au dessus de Paris le 8 à 6:00.*

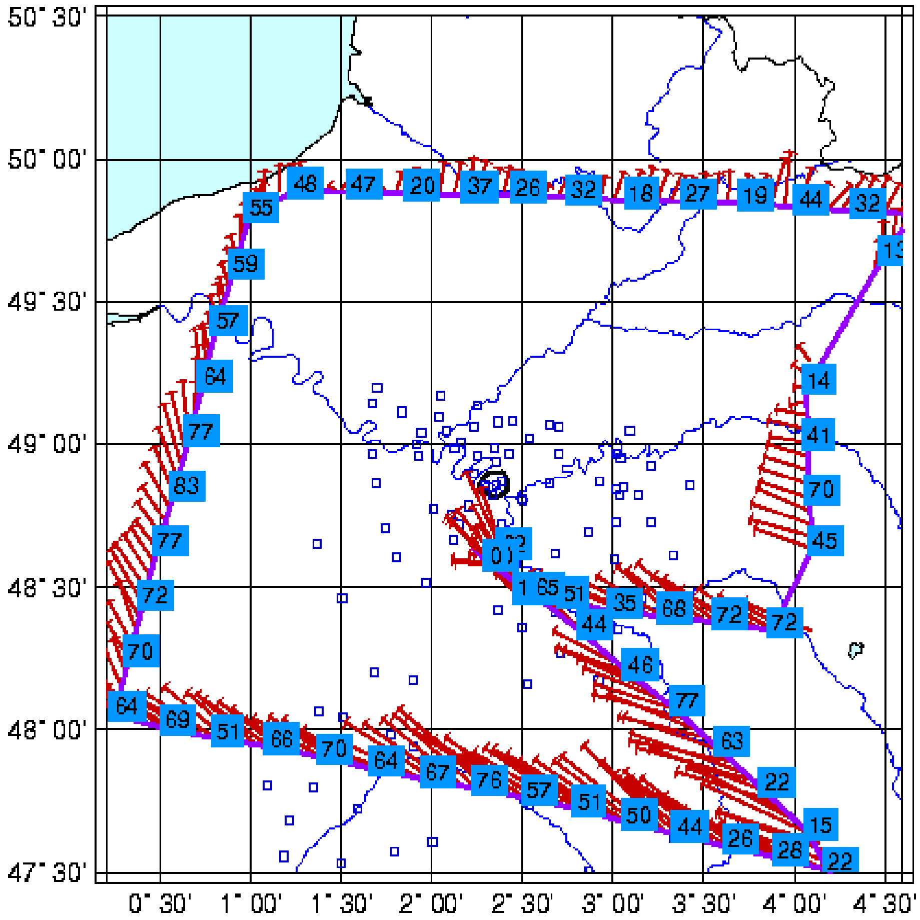

FIG. 3.10 – *Ozone (en ppb) sur le vol MESO 9837 du 8 août au matin, avec le vent observé lors du vol. Dieppe, Charleville, Semur et Le Mans sont les villes aux quatre "angles" du vol (R. Vautard, avril 99).*

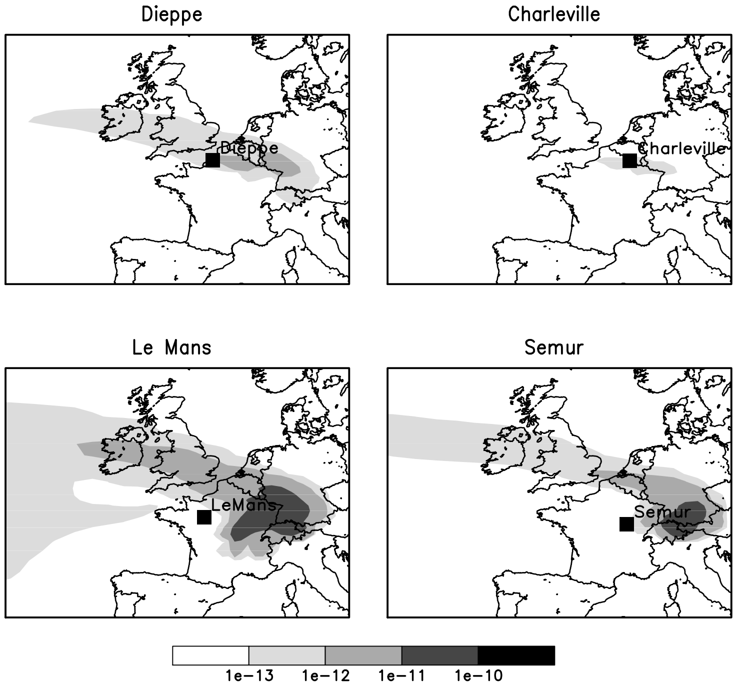

FIG. 3.11 – *Echange avec le sol pour l'air situé aux alentours de 1000m d'altitude au dessus de Dieppe, Charleville, Semur et Le Mans, le 8, à 6h.*

Les observations AIRPARIF indiquent que le pic se produit très tôt, vers 12hTU, et la montée matinale est très forte, puis les concentrations redescendent très vite (figure 1.2). Dans le premier bilan ESQUIF, il est expliqué que ce comportement atypique peut être dû à la combinaison de deux facteurs : des concentrations amont d'ozone faibles (la pollution de la veille sur l'Europe était modérée), et des concentrations en altitude faibles (i.e. au dessus de la couche limite) également. Dès lors, lorsque la couche limite s'est élevée (figure 1.3), l'ozone produit le matin a été fortement dilué.

La figure 3.12 montre les échanges qu'ont eu, avec la surface, les masses d'air présentes sur Paris à 6:00, le 8. Ceux-ci se caractérisent par leur faiblesse, au dessus de 1000 mètres. De plus, la couche limite du 7 était basse (figure 1.3), et l'ozone n'a pas pu monter efficacement en altitude la veille. Les concentrations en altitude sont donc faibles lorsque commence à s'élever la couche limite, au début de la journée du 8. Notre étude semble donc confirmer l'analyse faite dans le premier bilan ESQUIF.

Un fait marquant de cette journée est que l'on observe aussi une formation "régionale" d'ozone, puisque les concentrations en entrée de l'agglomération parisienne ,vers l'Est, l'après-midi (non montrées), sont nettement plus fortes que celles observées dans le vol meso-échelle du matin. Deux causes sont possibles : des re-circulations

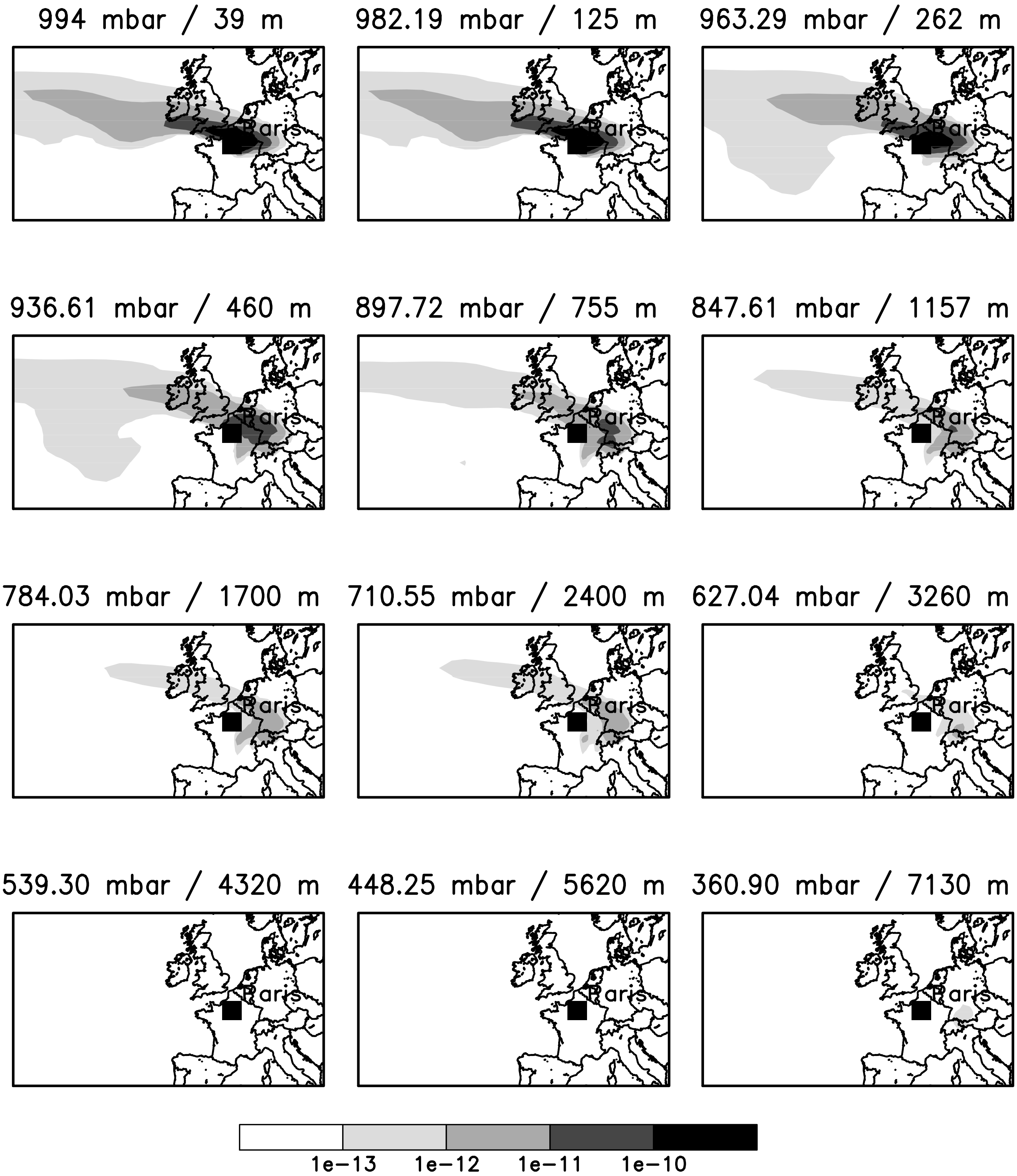

FIG. 3.12 – *Echange avec le sol pour chaque niveau de l'air au dessus de Paris, pour le 8, 6:00.*

de masses d'air venant de régions polluées, ou la formation d'ozone dans une couronne externe à l'agglomération, plus rurale (aux températures élevées rencontrées ce jour-là, il est possible que les émissions biogéniques participent de façon importante, en combinaison avec les émissions péri-urbaines de NOx, à cette formation complémentaire, d'après le rapport d'étape).

La deuxième hypothèse doit être étudiée l'été prochain. Pour ce qui est de la première hypothèse, la figure 3.13 montre que les masses d'air présentes à l'altitude où les mesures ont été effectuées, ont toutes eu des échanges avec l'Ile de France, l'Est de la France, la Belgique, et le sud de l'Angleterre les jours précédents, qui sont des jours de faible pollution. Ces échanges ne peuvent sans doute pas expliquer totalement la production d'ozone observée le 8, dans la journée.

3.2.3 Dimanche 9 août 1998

C'est un jour de forte pollution, avec production locale modérée et ozone importé. Les panaches que nous avons obtenus (figure 3.20) sont fortement continentaux (comme pour le 8), mais le jour précédent a été un jour de forte pollution (à la différence du 8), ce qui fait pencher pour une forte importation d'ozone.

La simulation donne que le vent est de tendance Sud, mais désorganisé (figure 3.14). Les observations donnent, elles, dans toute la partie Sud et Ouest, des concentrations matinales d'ozone fortes (80 à 90 ppb). Des concentrations similaires sont observées sur le vol Ile-de-France du matin.

Les différences de concentration observées lors du vol meso-échelle du matin (figure 3.15) sont explicables par les simulations effectuées avec injection de traceurs au dessus de Charleville, Dieppe, Le Mans et Semur. Ceci constitue un apport de notre étude, par rapport au rapport d'étape.

Lorsque l'on regarde les échanges qu'a eu le traceur 4 (correspondant à l'altitude du vol méso-échelle, i.e. 500 m), avec le sol, on s'aperçoit que les différences de concentration peuvent être expliquées par des origines de masses d'air diverses. Il est ici légitime de penser que les masses d'air ayant stationné sur des zones potentiellement polluées ont effectivement été polluées, vu que le 8 et, dans une moindre mesure, le 7, ont été des jours à pollution. La figure 3.16 montre ces échanges.

Alors que les masses d'air présentes sur Dieppe et Charleville ont eu des échanges, faibles, avec, essentiellement, le sud de l'Angleterre, celles presentes sur Le Mans et Semur ont eu de forts échanges avec, respectivement, le bassin parisien, et la vallée du Rhône et du Rhin. L'intensité des échanges avec le sol, et leur localisation peuvent donc expliquer les mesures obtenues lors du vol meso-échelle du matin.

Alors que les concentrations d'ozone à Paris se situent en moyenne vers 90-100 ppb, les vols Ile-de-France de l'après-midi donnent des concentrations partout supérieures à 80-85 ppb. Il n'y a donc pas de grandes différences de concentration d'ozone entre zones sources (la ville de Paris), et les zones périphériques : on peut

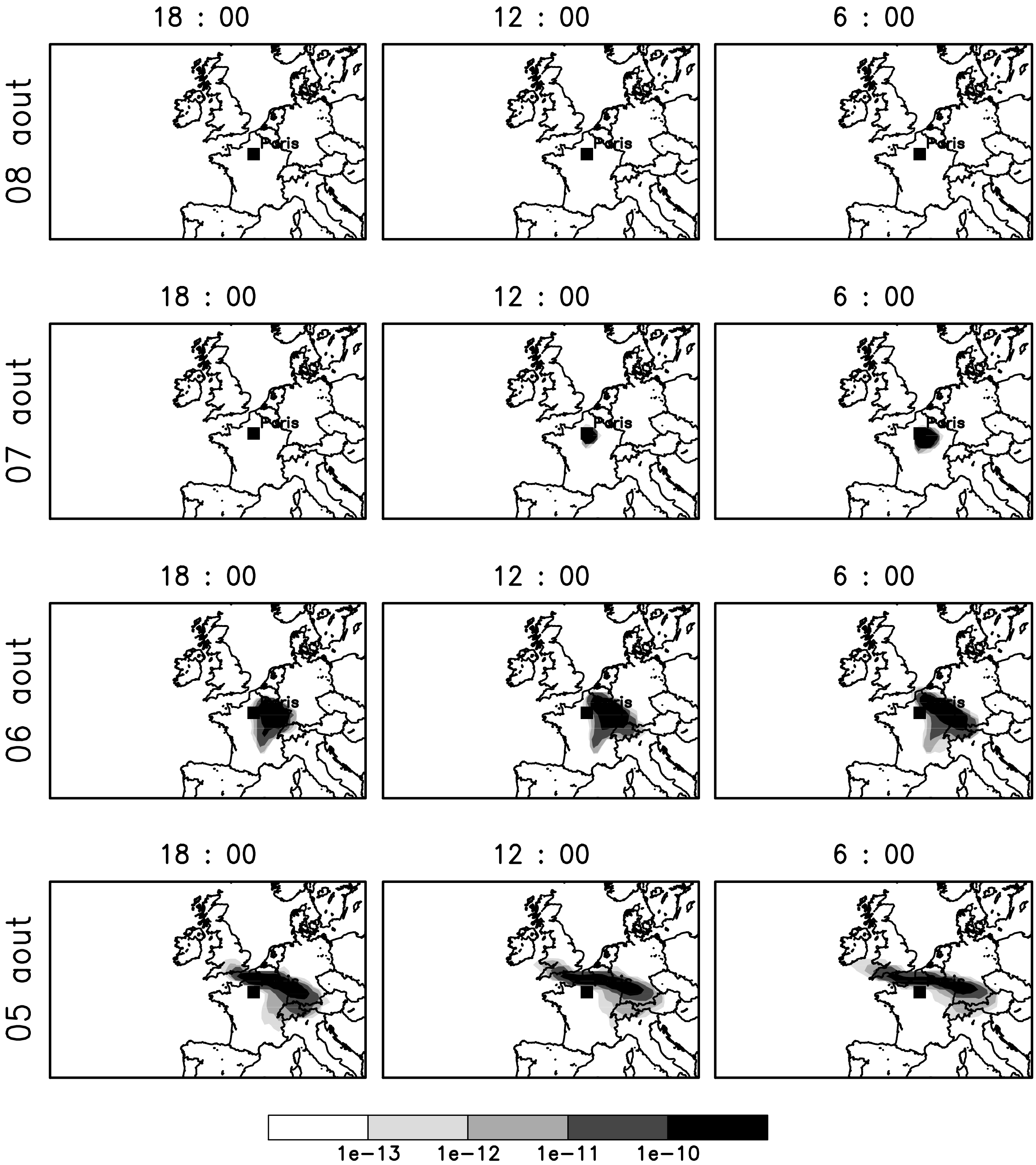

FIG. 3.13 – *Evolution des échanges avec le sol du traceur injecté le 8 à midi à l'altitude du vol meso-échelle (500m), au dessus de Paris.*

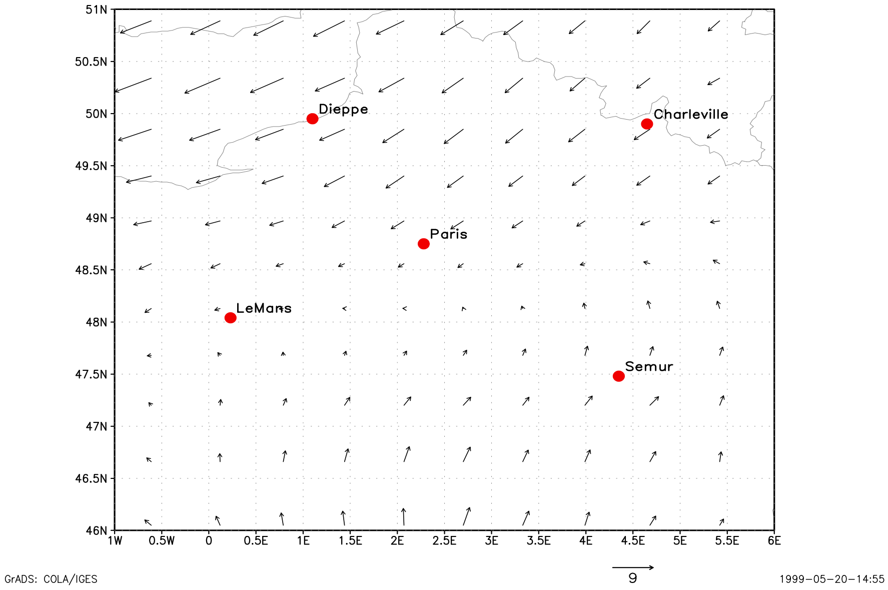

FIG. 3.14 – *Vent au sol le 9 août 1998, à 6 heures, sur la région parisienne.*

parler de production locale modérée.

Contrairement à la veille, on n'observe pas de décroissance des concentrations d'ozone dans l'après-midi. Les deux facteurs qui nous ont permis d'expliquer, dans le cas de la veille, la décroissance, sont, le 9, inversés : nos simulations tendent à montrer qu'il y a forte concentration amont (surtout pour l'air venant du sud, comme on vient de le voir), et, sans doute, forte concentration en altitude.

Pourquoi penser qu'on a une forte concentration en altitude ? Premièrement, parce que la couche limite de la veille est montée haut (2500m) (figure 1.3) et a pu apporter de l'ozone en altitude. Deuxièmement parce que l'air sur Paris, le 9 à 6 heures, sur une couche importante, a stationné sur des régions industrielles, polluées, la veille (figure 3.17). La décroissance de l'après-midi, observée le 8, ne s'est pas reproduite aussi parce que l'air stationnant sur Paris à midi vient également de régions polluées la veille (figure 3.16). On a donc de fortes concentrations au dessus et en amont de la région parisienne, et cela, toute la journée. La dilution de l'ozone, provoquée par la montée de la couche limite, n'a alors plus d'effet décisif.

Dans le rapport d'étape, le rétropanache (dans la couche limite) sur les 10 jours précédents, obtenu par Chimère, se scinde en deux parties, l'une provenant du Sud, après un passage par l'Est de la France, l'Allemagne du Sud-Ouest, le Bénélux et l'Angleterre centrale, l'autre n'effectuant pas le passage par le Sud, mais allant directement vers l'Est (figure 3.19). On retrouve ces deux tendances par l'approche eulérienne, la première tendance pour les couches au dessus 300m, la deuxième pour celles entre 0 et 300m (figure 3.20). A la lumière de la section 4, on peut penser

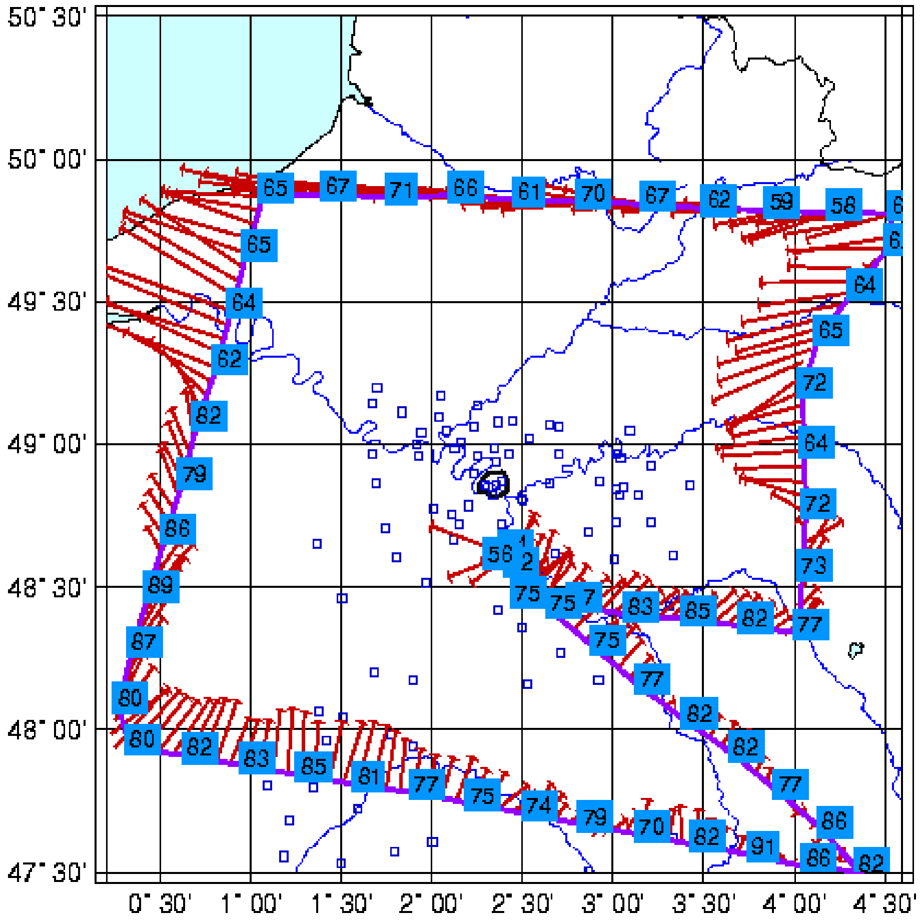

FIG. 3.15 – *Ozone sur le vol MESO 9839 du 9 août au matin, avec le vent observé par le MERLIN et le vent observé lors du vol. Dieppe, Charleville, Semur et Le Mans sont les villes aux quatre "angles" du vol (R. Vautard, avril 99).*

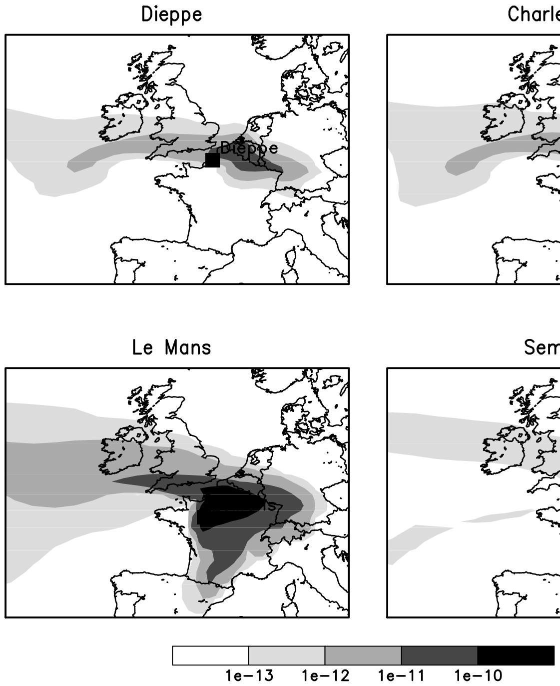

FIG. 3.16 – *Echange avec le sol pour l'air situé aux alentours de 500m d'altitude au dessus de Dieppe, Charleville, Semur et Le Mans, le 9, à 6h.*

que cette limite de 300 mètres apparaît plus comme la conséquence d'un mélange insuffisant dans la couche limite que comme quelque chose qui s'est réellement produit. En faisant abstraction de ce découpage en altitude, on peut quand même dire que l'approche eulérienne rend bien compte des différentes trajectoires obtenues par l'approche lagrangienne. Ceci constitue, de nouveau, une validation de LMD-Z Transport.

Les figures 3.22, 3.23 et 3.24 présentent l'évolution temporelle, pour chaque injection, et au dessus d'un point particulier du traceur correspondant à la couche la plus basse (principal lieu de pollution atmosphérique). Londres, Mannheim, à l'entrée de la Ruhr, et Vlissingen, à la frontière Belgique-Pays-Bas, ont été choisies pour leur position géographique intéressante (figure 3.21). Cette approche est nouvelle par rapport à ce qui a pu être présenté dans le rapport d'étape.

Ce qui importe sur ces graphiques n'est pas les valeurs numériques mais plutôt les tendances relatives des différents jours étudiés. On retrouve, concernant l'importation d'ozone, les grandes lignes de ce que l'on a décrit précédemment : le 7, les masses d'air ont évité le Bénélux et l'Allemagne, ce qui n'est pas le cas pour le 8 et 9, la différence de caractère de la pollution entre ces deux dates étant certainement dûe à la situation ayant eu cours la veille.

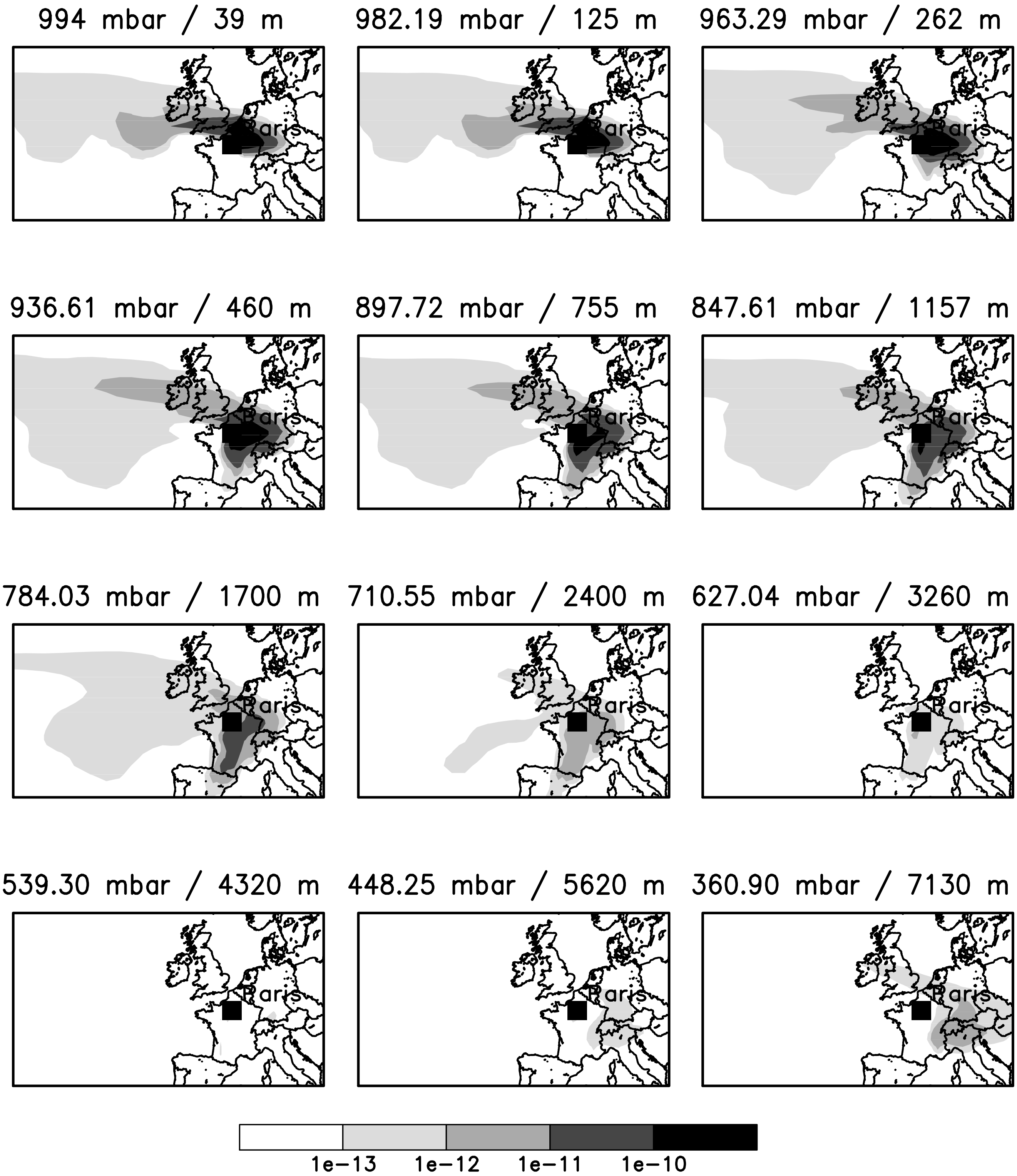

FIG. 3.17 – *Echange avec le sol pour chaque niveau de l'air au dessus de Paris, pour le 9, 6h.*

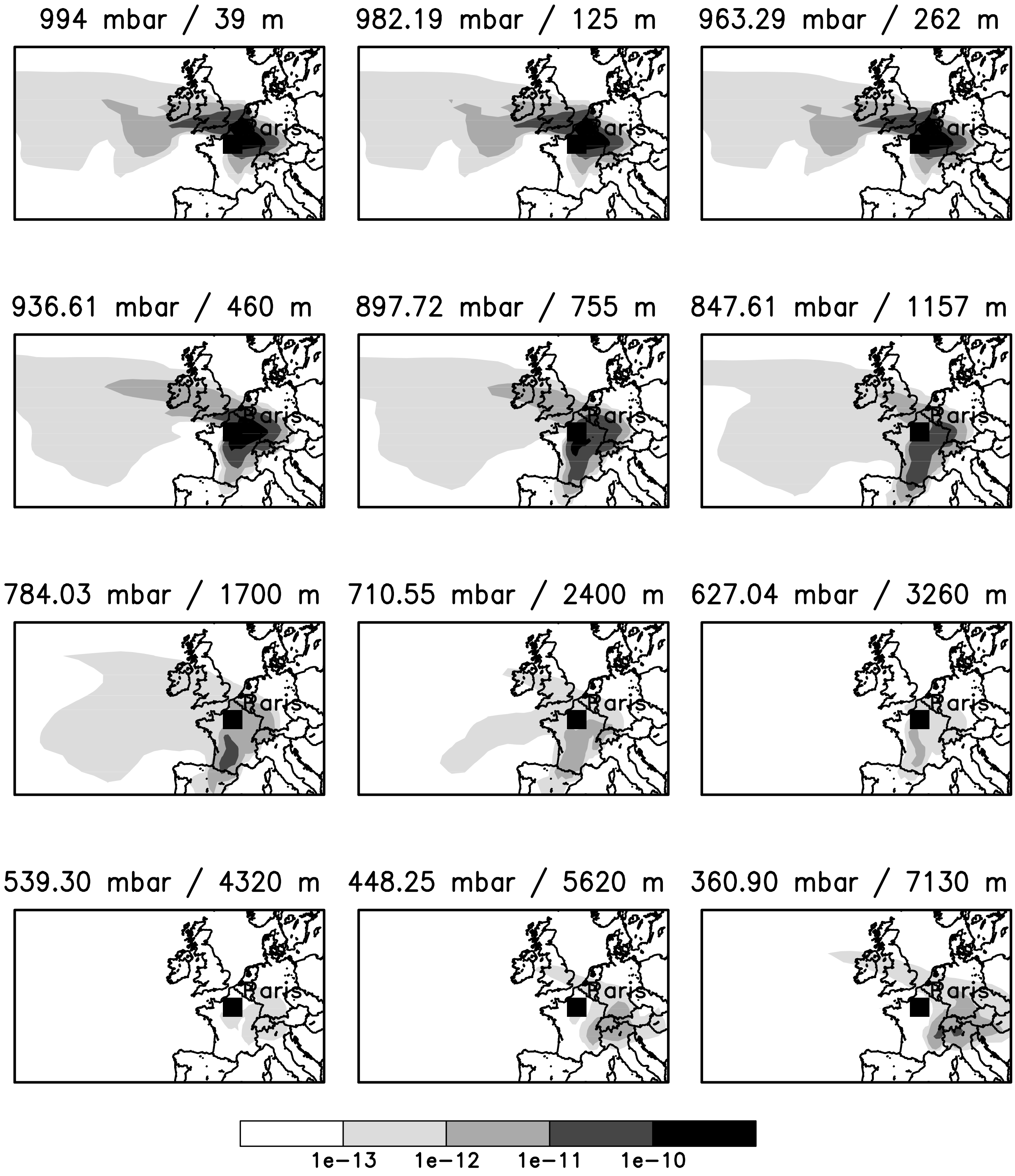

FIG. 3.18 – *Echange avec le sol pour chaque niveau de l'air au dessus de Paris, pour le 9, midi.*

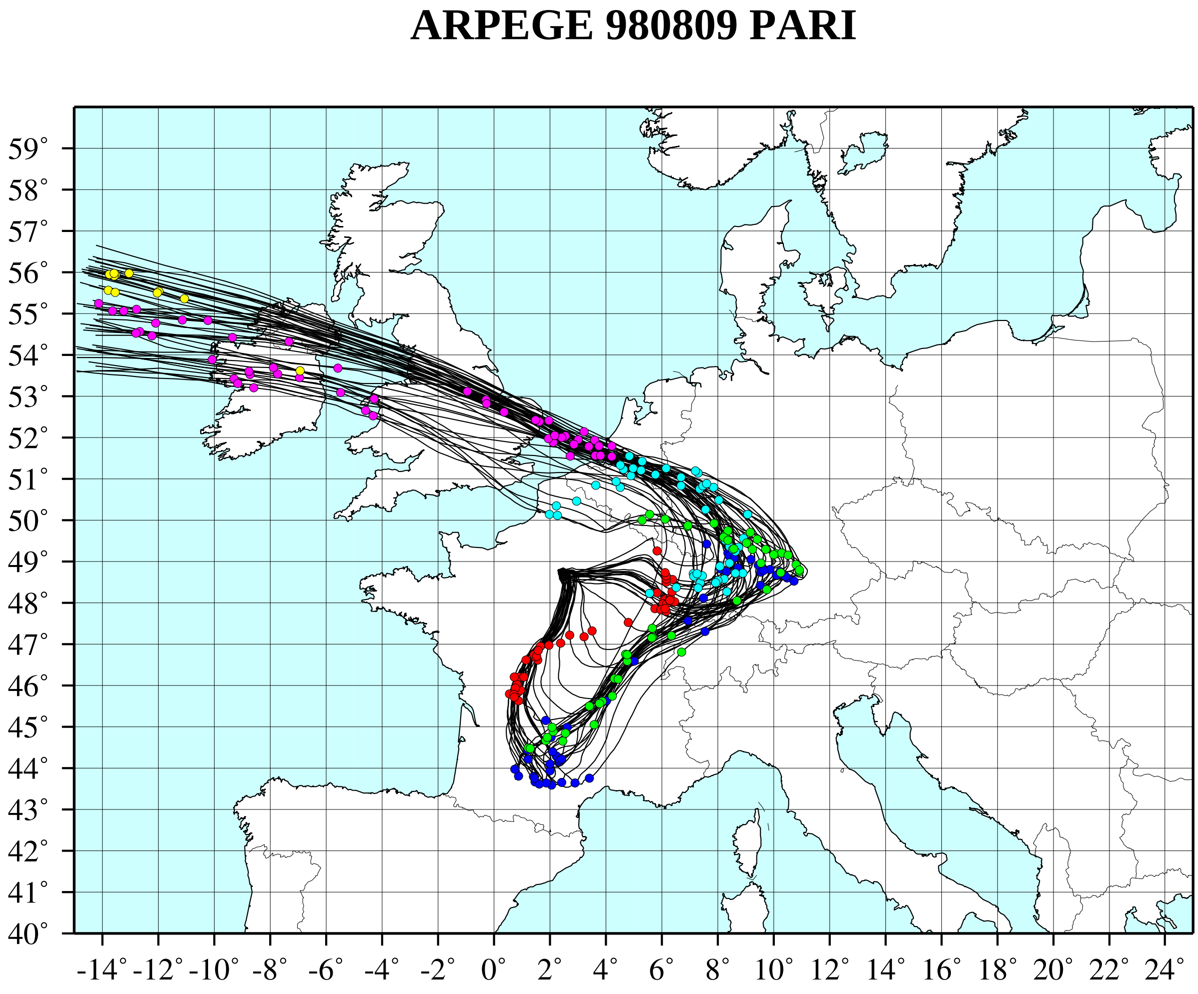

FIG. 3.19 – *Rétropanache du 09 août arrivant à midi. Les rétropanaches sont calculés à partir des analyses ARPEGE de vent. Ils représentent 50 trajectoires en arrière, avec tirage aléatoire de l'altitude durant la période convective (9h-18h), entre 0 et 1500m (R. Vautard, avril 99).*

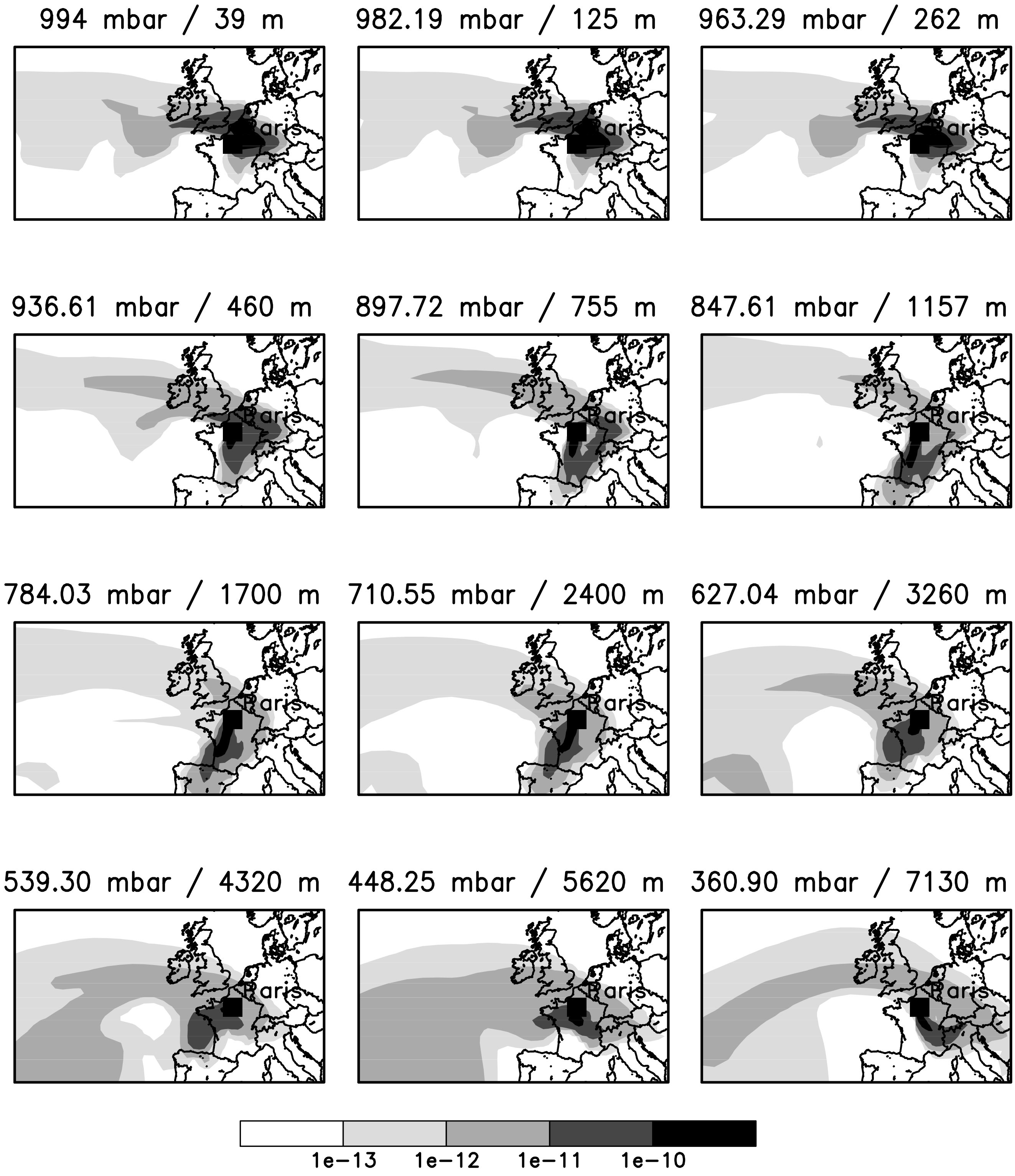

FIG. 3.20 – *Rétropanaches pour chacun des traceurs émis au dessus de Paris le 9 août à midi.*

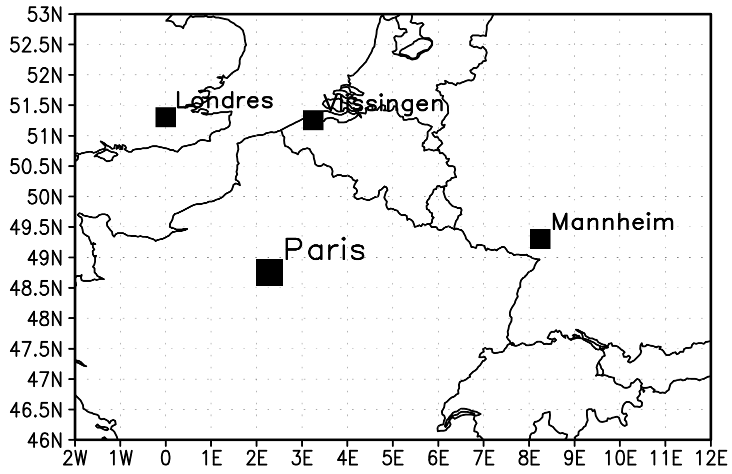

FIG. 3.21 – *situation géographique de Londres, Mannheim et Vlissingen.*

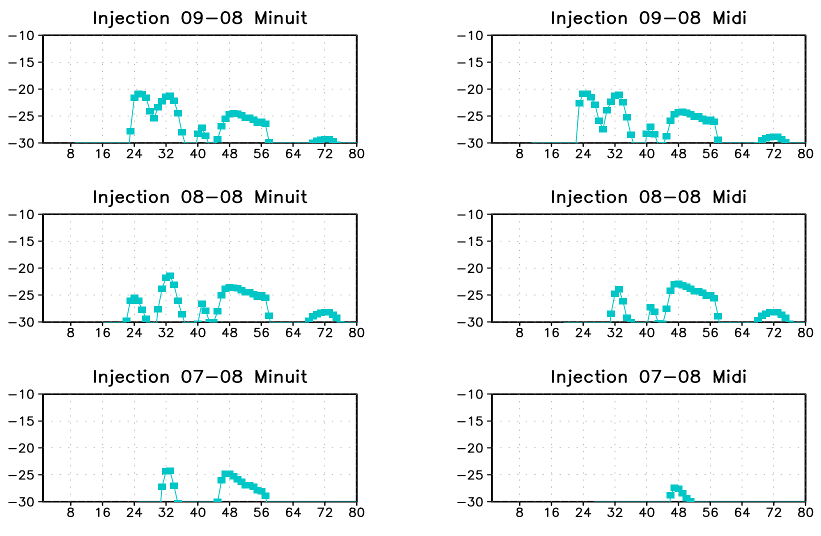

FIG. 3.22 – *Logarithme de la concentration, dans la première couche, du traceur injecté dans cette même couche, en fonction du temps (du 10 août minuit au 31 juillet minuit), à Londres, pour les différentes injections effectuées. Dans cette figure, comme dans les deux suivantes, le pas de temps 0 en abcisses correspond au 10 août 24:00, et 8 pas de temps correspondent à 24 heures.*

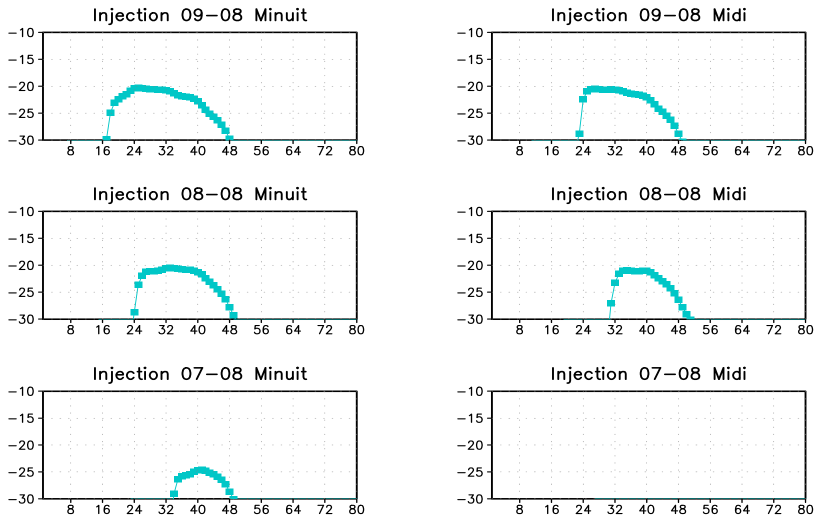

FIG. 3.23 – *Logarithme de la concentration, dans la première couche, du traceur injecté dans cette même couche, en fonction du temps (du 10 août minuit au 31 juillet minuit), à Mannheim, pour les différentes injections effectuées.*

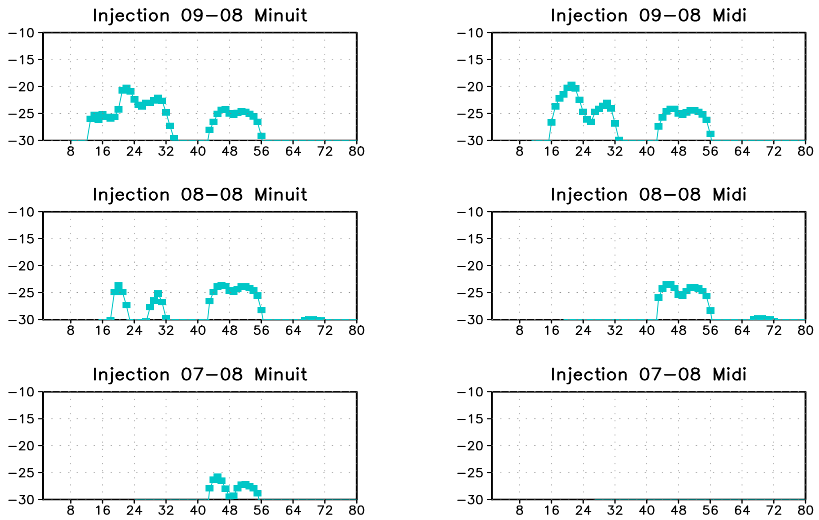

FIG. 3.24 – *Logarithme de la concentration, dans la première couche, du traceur injecté dans cette même couche, en fonction du temps (du 10 août minuit au 31 juillet minuit), à Vlissingen, pour les différentes injections effectuées.*

A l'issue de ces simulations, on peut dire que le modèle LMDZ-T a permis de bien rendre compte des différents régimes de pollution observés lors de la POI2 : pollution modérée produite localement (le 7), pollution forte produite localement (le 8), pollution forte importée (le 9). Il a donné, dans le cadre de l'interprétation des observations ESQUIF-POI2, des résultats plus que convenables, permettant, en apportant de nouvelles informations, de confirmer ou d'infirmer les interprétations faites dans le premier bilan ESQUIF ou dans le rapport d'étape.

Toutefois, certaines figures, comme par exemple la figure 3.12, semblent ne pas présenter des concentration de traceurs dans la couche limite assez homogènes : le mélange dans la couche limite paraît se faire mal. Cette question est l'objet du dernier chapitre.

Chapitre 4

Ouverture : test d'une nouvelle paramétrisation du mélange dans la couche limite planétaire

Dans cette section, une nouvelle paramétrisation de la couche limite turbulente atmosphérique est présentée, et son réalisme testé.

4.1 Présentation de la paramétrisation du transport par les thermiques

La couche limite atmosphérique est la partie sensible aux échanges turbulents dans l'atmosphère. Classiquement, la modélisation de cette couche limite utilise un modèle de viscosité turbulente (voir section 2.2.2). Or cette modélisation ne permet pas de rendre compte de certaines observations (vitesses ascendantes importantes, de l'ordre du m.s^{-1} observées en planeur ; figure de convection de hauteur 1 à 3 kilomètres, avec des échanges directs entre surface et sommet). Sur les traceurs, ces manques se traduisent par des concentrations de traceurs assez inhomogènes dans la couche limite (voir figure 3.12), ce qui est assez peu réaliste. Pour essayer de tenir compte des observations, Frédéric Hourdin a développé une paramétrisation des grandes figures de convection, les thermiques. Cette paramétrisation a été testée, dans une configuration 1-D, par Fleur Couvreux, dans le cadre de la campagne ESQUIF de l'été 98. Le modèle a permis de bien simuler la structure de la couche limite. Il a aussi mieux rendu compte du transport de la vapeur d'eau, en la transportant plus vite et plus haut, même s'il ne déposait pas assez d'eau dans les niveaux intermédiaires.

Ce qui a été testé avec l'eau, doit pouvoir l'être avec des traceurs, le transport des espèces chimiques s'effectuant sur le même mode que l'eau. Le but de notre dernier travail est donc d'utiliser la modélisation de la couche limite atmosphérique par les thermiques sur des simulations de rétro-transport de traceurs, et donc, pour la première fois, dans une configuration 3-D. Pour cela, il a fallu développer le stockage des paramètres physiques supplémentaires (flux de masse montants et descendants liés aux thermiques), et leur relecture, le tout sur la sous-grille présentée dans la section 2.2.4.

4.2 Transport de l'eau dans les modèles on-line

Trois simulations on-line ont été effectuées, se différenciant uniquement les unes des autres par leur physique de couche limite et leurs conditions initiales pour l'eau au sol. Ces trois simulations sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Simulation	Paramétrisation du transport convectif dans la couche limite	Humidité initiale du sol
A	diffusion convective	idem simulations présentées en section 3 (150 mm)
B	thermiques	idem simulations présentées en section 3 (150 mm)
C	thermiques	5 fois moins que dans les simulations présentées en section 3 (30 mm)

Toutes ces simulations ont tourné avec les paramètres de run décrits dans la section 3.1. On se bornera, dans cette section, à la comparaison des deux traceurs stockés par défaut lors de simulations on-line, c'est à dire la vapeur d'eau et l'eau liquide.

4.2.1 L'eau comme diagnostic du transport

Les simulations que nous avons effectuées sont forçées, c'est à dire que les vents et la température sont rappelés régulièrement vers les données ECMWF (voir section 3.1.3).

Par contre, les variables "eau" (vapeur et liquide) sont seulement soumises aux phénomènes pris en compte par le modèle (évaporation, condensation, transport), et ne sont pas rappelées vers leurs valeurs observées. Ce sont donc de bonnes variables à analyser pour savoir si un modèle simule un transport réaliste ou non.

4.2.2 Vapeur d'eau

La figure 4.1 présente les profils de vapeur d'eau, à Paris, pour différents instants de la POI2, pour les 3 simulations effectuées, et pour les observations faites à Trappes (Yvelines). La figure 4.2 montre, pour la première couche de notre modèle, l'évolution du contenu en vapeur d'eau pour les trois jours de la POI 2.

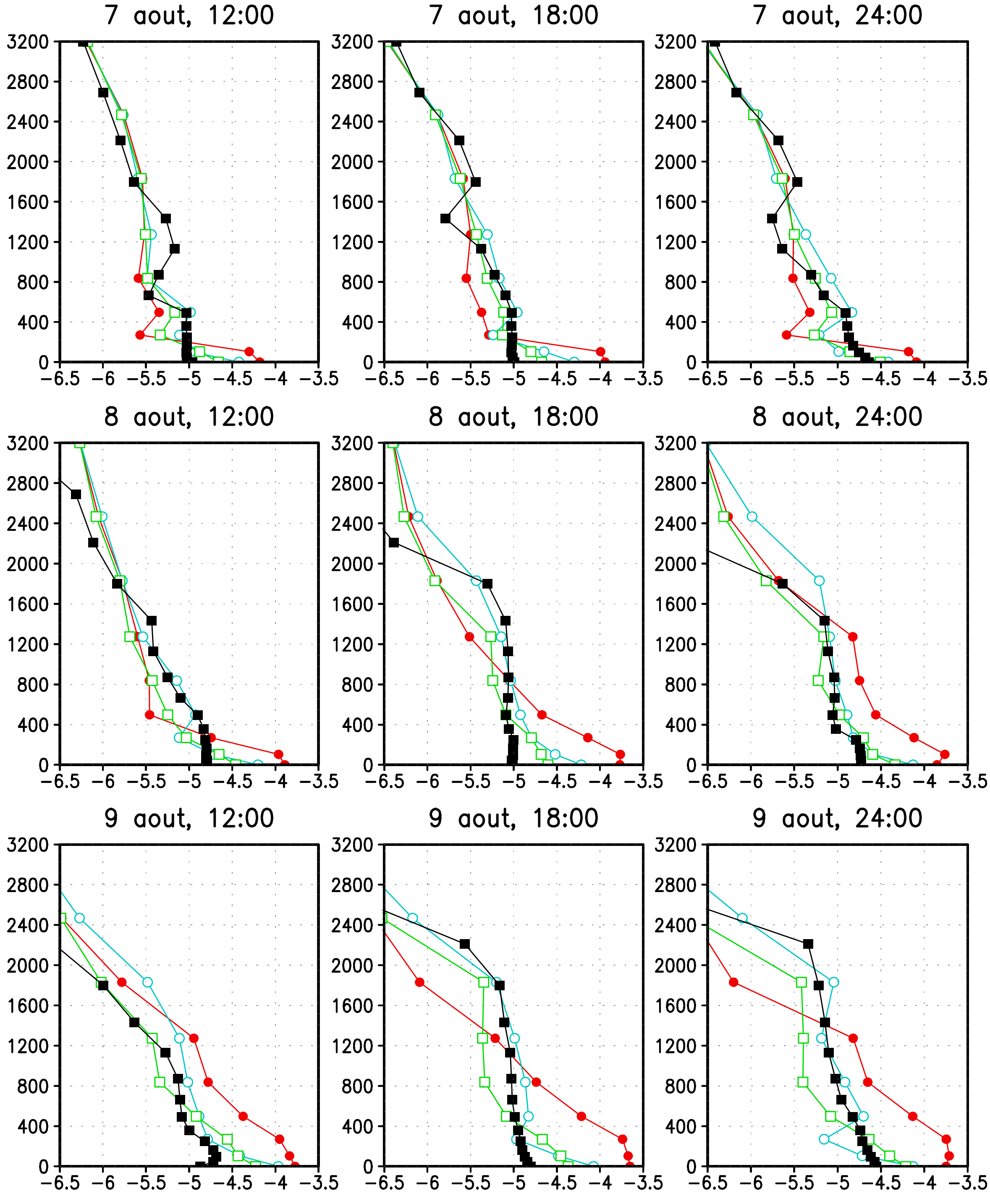

FIG. 4.1 – *Profils de vapeur d'eau pour différents instants de la POI2, pour la simulation A (trait foncé, cercles pleins), la simulation B (trait clair, cercles vides), la simulation C (trait clair, carrés vides), et les observations (trait noir, carrés pleins). En abcisses, le logarithme de la concentration de vapeur d'eau ; en ordonnées, l'altitude, en mètres.*

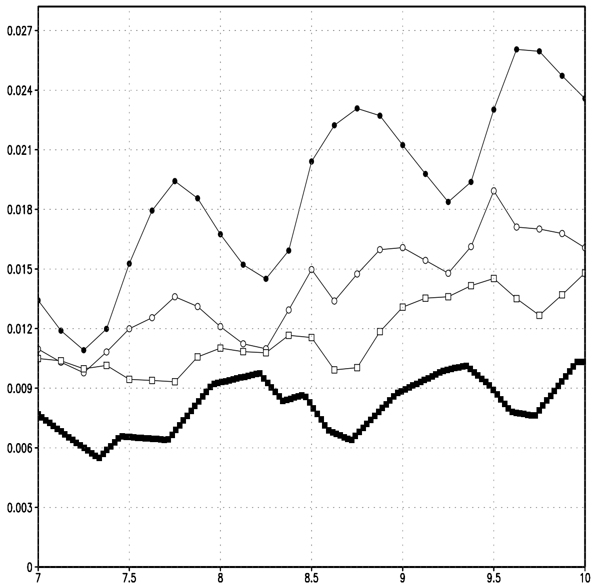

FIG. 4.2 – *Evolution, du 7 ou 9 aouût 1998, du contenu en vapeur d'eau pour la première couche de la grille. cercles pleins : simulation A ; cercles vides : simulation B ; carrés vides : simulation C ; carrés pleins : observations. En abcisses, les jours ; en ordonnées, la concentration de vapeur d'eau (en kg par kg d'air).*

On voit, sur la figure 4.1, que les profils obtenus avec les thermiques sont plus homogènes, dans la couche limite, que ceux obtenus avec l'ancienne physique, ce qui est satisfaisant : la couche limite a mieux mélangé la vapeur d'eau. D'autre part, les simulations B et C sont souvent en bon accord avec les observations. Un excès d'eau dans les premières couches est observé pour les simulations A et B, provenant d'une mauvaise initialisation du contenu en eau du sol, celui-ci étant exagéré par rapport à ce qu'il a été dans la réalité. Avec un sol plus sec (simulation C), on obtient des premières couches moins humides. Toutefois, ce qu'on gagne en vraisemblance dans les premières couches, avec un sol plus sec, semble être perdu quelques fois dans une moins bonne correpondance en altitude. Un point satisfaisant, dans l'optique de l'utilisation de la paramétrisation par les thermiques pour le suivi de traceurs, réside dans le fait que, bien qu'il y ait moins de vapeur d'eau en surface avec les thermiques qu'avec l'ancienne paramétrisation, on obtient, en altitude, des valeurs de vapeur d'eau plus grandes avec la paramétrisation des thermiques. Notons enfin que les simulations utilisant les thermiques pour mélanger dans la couche limite rendent beaucoup mieux compte du développement de la couche limite durant les trois jours de la POI, que l'ancien modèle (voir aussi figure 4.3).

La figure 4.2 montre que l'ancienne paramétrisation simule un contenu en vapeur d'eau de la première couche en phase avec le cycle diurne. Cela tient à la façon dont

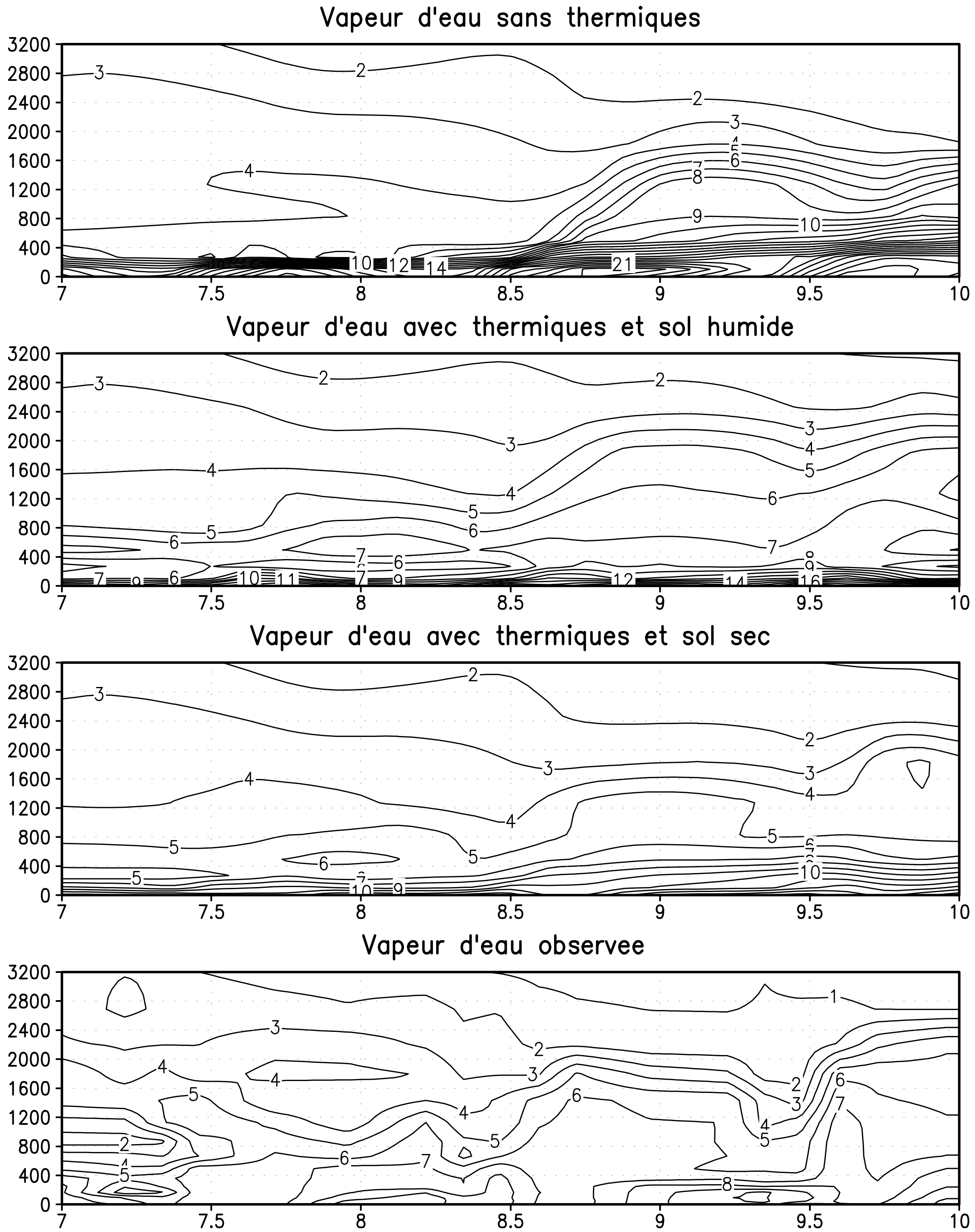

FIG. 4.3 – *Vapeur d'eau (en g par kg d'air), à Paris, du 7 août 0 heure au 9 août minuit, obtenue pour les simulations A, B et C, et les observations. En abcisses, les jours ; en ordonnées, l'altitude (en mètres).*

est effectuée le mélange dans cette approche : avec le réchauffement, il y a évaporation de l'eau du sol. La vapeur d'eau diffuse de proche en proche depuis le sol. Le cycle de l'eau est donc forcé essentiellement par l'évaporation, en phase avec la température, en première approximation.

Ceci est largement contraire aux observations, de façon beaucoup plus fondamentale que le simple excès d'eau déjà signalé. Dans la réalité, le pompage d'eau du sol (source d'humidité) est en compétition avec les thermiques qui advectent vers le sol de l'air sec d'altitude (puit d'humidité). Ce phénomène est moins actif la nuit ce qui explique que l'on observe les maxima de vapeur d'eau dans les basses couches en fin de nuit. De plus, durant toute la POI 2, la couche limite s'assèche pour deux raisons : 1- advection d'air sec à grande échelle 2- couche limite plus haute, donc brassant de plus en plus d'air (dilution de la vapeur d'eau). La paramétrisation par les thermiques rend mieux compte de la réalité dans la mesure où le cycle diurne est beaucoup moins marqué dans le cas de la simulation B, et inversé avec le sol plus sec de la simulation C, avec un maximum de vapeur d'eau la nuit, et un minimum le jour (figure 4.2).

La figure 4.3 montre la vapeur d'eau sur les trois premiers kilomètres de l'atmosphère, pour les 7, 8 et 9 août, pour les trois simulations effectuées, et pour les observations. Les modèles utilisant les thermiques simule toujours mal l'assèchement observé, dans la nuit du 7, entre 500 et 1000 mètres d'altitude. On voit clairement sur cette figure l'excès d'eau dans les basses couches des simulations A et B, et la bonne montée de couche limite simulée par les modèles avec thermiques.

4.2.3 Eau liquide

La figure 4.4 présente, du 7 au 9 août, l'eau liquide obtenue par la simulation A et celle obtenue par la simulation B.

Sans surprise par rapport à ce que l'on a vu sur la vapeur d'eau, il y a plus d'eau liquide dans les basses couches, en fin de nuit et au petit matin, avec l'ancien modèle. Ceci correspond à de la brume, formée par condensation de la vapeur d'eau, plus abondante avec l'ancien modèle qu'avec le nouveau, lors du refroidissement nocturne de l'atmosphère, près du sol.

4.3 Comparaison des résultats sur les traceurs ESQUIF des modèles off-line

Pour chacune des deux simulations off-line effectuées dans cette partie, on injecte, au pas de temps correspondant à la date du 7 août, midi, un traceur différent dans chacune des 12 premières couches verticales au dessus de la maille contenant Paris $(2,28^o E$,$48,75^o N)$.

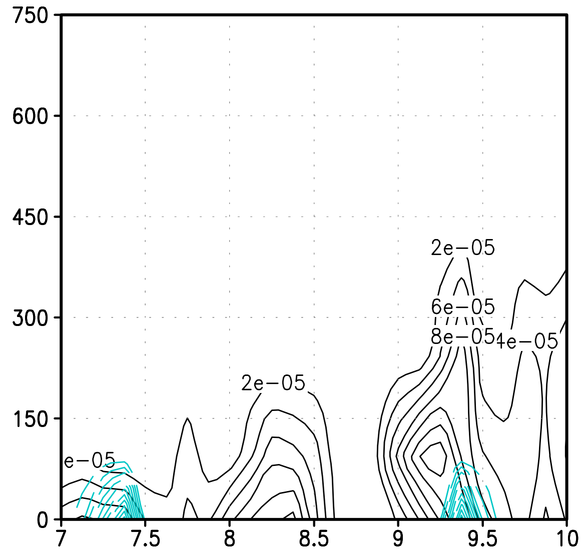

FIG. 4.4 – *Eau liquide obtenue par la simulation B (traits clairs pointillés), et eau liquide obtenue par la simulation A (traits foncés pleins), du 7 au 10 août, à Paris. En abcisses, les jours ; en ordonnées, l'altitude (en mètres).*

On utilise, pour ces simulations off-line, les paramètres météorologiques et physiques stockés durant la simulation B. Une simulation off-line est effectuée avec la paramétrisation du mélange dans la couche limite par les thermiques, l'autre sans. Il est à noter qu'avec les thermiques, l'ascension des masses d'air est rapide et se fait à petite échelle, au contraire de leur descente qui est plus lente, et à grande échelle. Dans le sens rétro, la subsidence doit donc être rapide et localisée, l'ascendance lente et de grande échelle. Ceci nécessitait un changement de code qui n'a pas été effectué durant le stage.

Le changement de paramétrisation du mélange dans la couche limite n'a, évidemment, de conséquences que dans les basses couches. Pour la simulation que nous avons effectuée, la couche limite reste, sur toute la période, basse et aucun changement notable n'est à enregistrer pour les couches au dessus de la 6^{eme} (non montrées).

La figure 4.5 montre les échanges au sol (voir section 2.2.5) obtenus sans et avec thermiques, ainsi que la différence entre les deux.

On voit bien que, pour les niveaux supérieures de la couche limite, les échanges sont plus importants avec la paramétrisation du mélange par les thermiques, que sans. L'approche par les thermiques mélangeant mieux la couche limite, ceci apparaît satisfaisant. Corrélativement, la première couche voit ses échanges avec le sol diminués lorsque l'on utilise les thermiques, une quantité relativement importante de traceur ayant été mélangée dans la couche limite, et ne stationnant donc plus

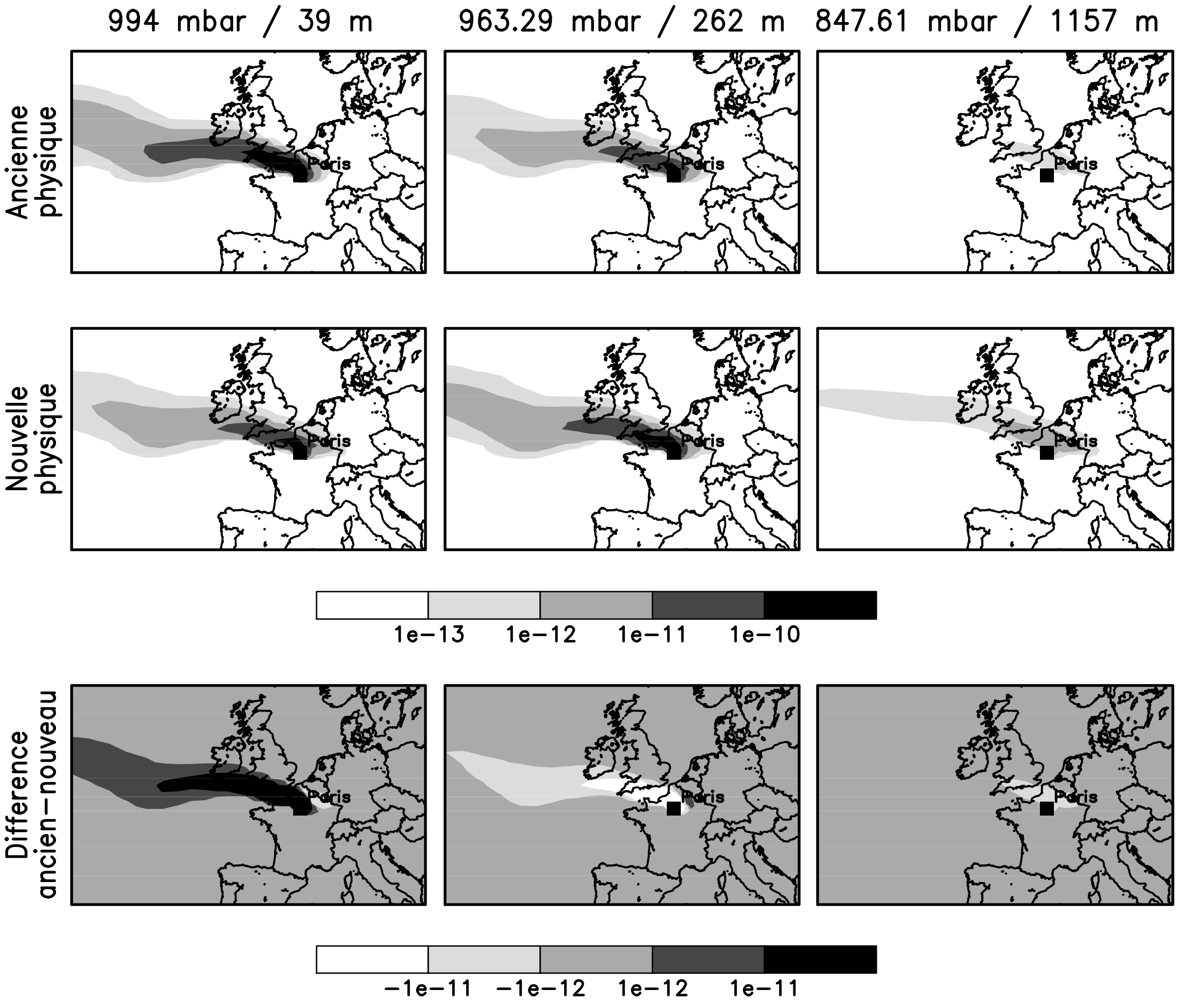

FIG. 4.5 – *Echanges avec le sol obtenus avec l'ancienne physique, ceux obtenus avec le modèle utilisant la paramétrisation des thermiques, et différence entre les deux, pour différents niveaux de la couche limite, pour une injection le 7 août, à midi*

dans la première couche. Globalement, *l'effet des thermiques est, comme pour l'eau, de mieux mélanger les traceurs dans la couche limite.*

La figure 4.6 montre les provenances des masses d'air présentes à Paris le 7 à midi, provenances obtenues sans et avec thermiques. On montre aussi la différence entre les deux, ainsi qu'un zoom sur une région intéressante.

Quantitativement, les différences sont importantes. Toutefois, le but de la visualisation que l'on a nommée "provenance" (section 2.2.5) est de donner, *qualitativement*, l'allure de la trajectoire suivie par les masses d'air. Si, pour la première couche, la forme du panache de la différence n'a rien d'étonnant par rapport à ce que l'on attendait, les résultats sont, en revanche, plus surprenants pour les deux autres niveaux étudiés : on a plus de traceurs, à ces niveaux, avec la paramétrisation par les thermiques, qu'avec l'ancienne, sur les océans. Les thermiques semblent avoir, pour les niveaux considérés, moins mélangé la couche limite sur l'océan que sur le continent. Ceci semble confirmé par la figure 4.7 qui montre que la couche limite sur l'océan est beaucoup plus basse que sur le continent.

Les champs météorologiques étant les mêmes pour les deux simulations off-line, on retrouve, et c'est aussi vrai pour les échanges décrits plus haut, qualitativement les mêmes trajectoires et résultats présentés section 3. Ceux-ci restent donc, dans une large mesure, bons, ce qui pourrait être vérifié en menant de nouvelles simulations.

Les résultats qui peuvent être remis en cause sont ceux obtenus en prenant comme argument décisif la dynamique des échanges. Ainsi, les raisons invoquées section 3.2.2 pour désavouer l'hypothèse d'une recirculation de masses d'air pour expliquer la production régionale d'ozone observée le 8 peuvent être mises en doute : l'homogńéisation rapide de la concentration de traceur dans la couche limite, par les thermiques, peut grandement changer l'allure de la figure 3.13. Seule une nouvelle simulation peut nous en convaincre.

Même si quelques imprécisions subsistent, notamment au niveau des couches les plus basses, la nouvelle paramétrisation du mélange dans la couche limite est donc prometteuse, dans le sens où elle est plus efficace que l'ancienne. Elle rend beaucoup mieux compte des observations, dans le cas de l'eau, et a un impact non négligeable sur le calcul du transport de polluants.

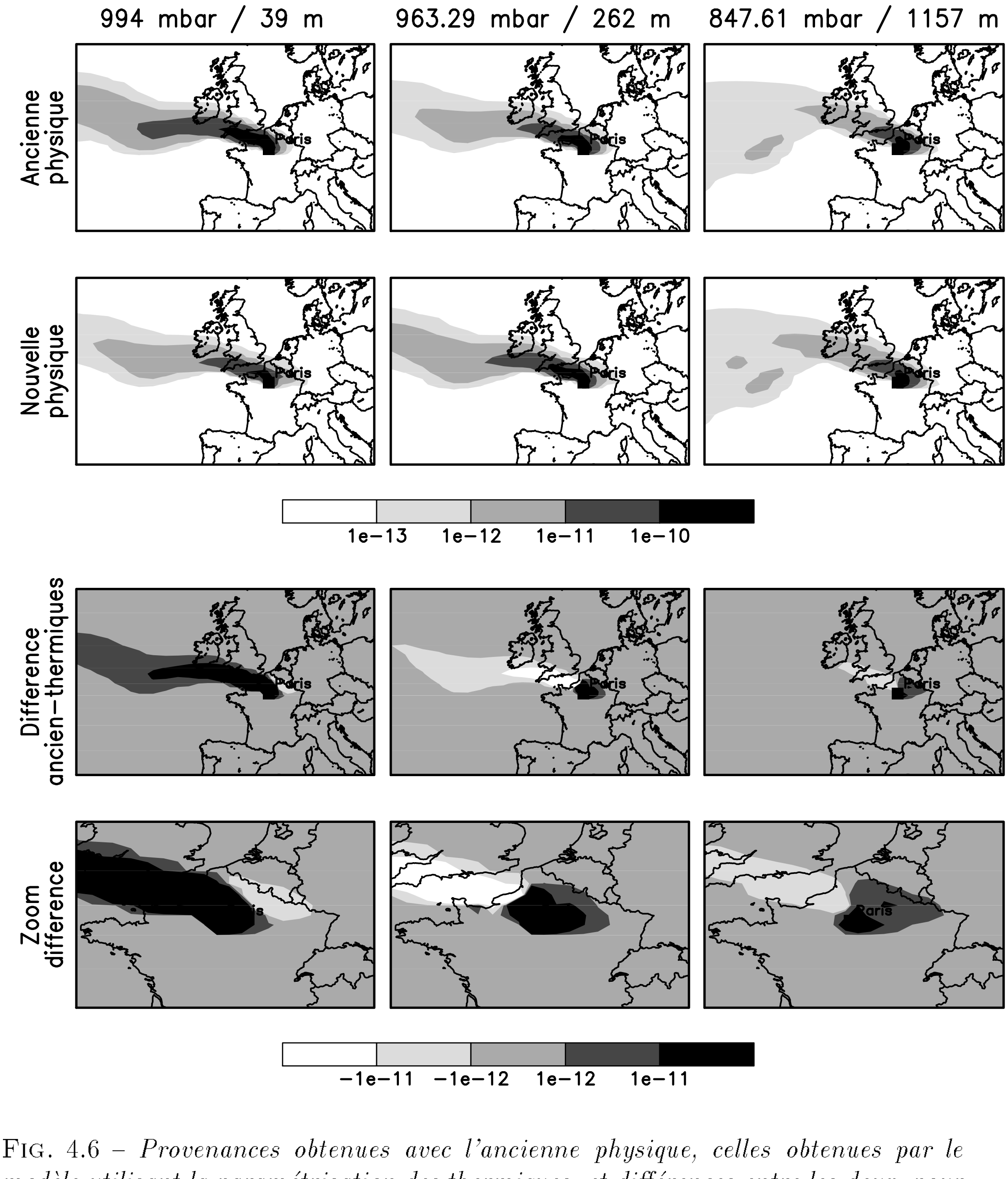

FIG. 4.6 – *Provenances obtenues avec l'ancienne physique, celles obtenues par le modèle utilisant la paramétrisation des thermiques, et différences entre les deux, pour une injection le 7 août, à midi.*

CONCLUSION

Les simulations effectuées, confrontées aux observations et aux interprétations, déjà menées, de l'épisode de pollution des 7-8-9 août 1998, ont validé de manière satisfaisante le rétro-transport du modèle LMD-Z. L'approche eulérienne, qui a été la notre, nous a, du reste, permis de répondre à certains questions restées sans réponse dans les divers documents publiés précédemment sur cet épisode.

Toutefois, de nombreuses observations restent encore difficilement explicables. Le passage à des paramétrisations plus précises des phénomènes physiques atmosphériques, comme celle présentée dans la dernière partie de cette étude et concernant le transport convectif dans la couche limite planétaire, nous permettra d'encore mieux comprendre les épisodes de pollution observés. En ce sens, la campagne d'observation 1999, qui s'ouvrira dans quelques jours, doit permettre de confronter à de nouvelles situations les outils existants, et d'en valider de nouveaux.

D'un point de vue personnel, ce stage m'aura permis de découvrir le quotidien d'un laboratoire et du travail d'un chercheur, au delà de tous les idées reçues que je pouvais avoir à ce sujet. Il constitue sans doute pour moi la seule période de ma vie professionnelle où j'aurais pu connaître le milieu de la recherche. S'il permet de mettre en lumière les "oublis" de l'enseignement obligatoire à l'X concernant UNIX et LaTeX notamment, il parachêve, de manière utile et intéressante, ma scolarité, en s'inscrivant dans le prolongements des MODules EXpérimentaux, et des Enseignements d'Approfondissement dispensés à l'Ecole.

Bibliographie

Andersen, K. K., *Simulations of atmospheric dust in the glacial and interglacial climate*, Ph.D. thesis, Niels Bohr Institute of Astronomy, Physics and Geophysics, University of Copenhagen, March 1998.

Armengaud, A., *Simulations de traceurs atmosphériques à l'aide de modèles de circulation générale*, Ph.D. thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 1999.

Boucher, O., Z.-X. Li, and H. Le Treut, Introduction du schéma de convection de Tiedtke dans les MCGs du LMD, technical report 197, LMD, 1995.

Collectif, Etude et Simulation de la QUalite de l'air en Ile-de-France, ESQUIF - Projet de recherche, technical report, LISA and IPSL, mars 1998.

Couvreux, F., Les thermiques, cellules convectives de la couche limite atmosphérique - Validation du modèle à partir des données de la campagne ESQUIF, Rapport de stage de 2ème année de magistère de l'E.N.S., LMD, 1998.

Harzallah, A., and R. Sadourny, 1995, Internal versus SST-forced atmospheric variability as simulated by atmospheric general circulation model, *J.Clim.*, *8, Number 3*, 474–495, 1995.

Hourdin, F. and Armengaud, A., in press, 1999, On the use of finite volume methods for atmospheric advection of trace species: I. Test of various formulations in a General Circulation Model, *Mon. Weather. Rev.*, in press, 1999.

Hourdin, F. and Issartel, J.-P., submitted, 1999, Sub-surface nuclear tests monitoring: evaluation of the CTBT Xenon network, *Geophys. Res. Lett.*, submitted, 1999.

Idelkadi, A., Validation de LMD-Z Transport sur la campagne ETEX, Rapport de stage de mastère specialisé de l'ENM, LMD, 1999.

McGuffie, K., and A. Henderson-Sellers, *A climate modelling primer*, Wiley, 1997.

Sadourny, R., and K. Laval, January and july performance of the LMD general circulation model, in *New perspectives in Climate Modeling*, Elsevier, 173–197, A.Berger and C.Nicolis, Amsterdam, 1984.

Tiedtke, M., 1989, A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models, *Mon. Wea. Rev.*, *117*, 1179–1800, 1989.

Tiedtke, M., Aspects of cumulus parameterization, in *ECMWF seminar proceedings, Tropical Extratropical Interactions*, 441–466, Reading, U.K., 10-14 Sept. 1991.

Tiedtke, M., 1993, Representation of clouds in large-scale models, *Mon. Wea. Rev.*, *121*, 3040–306, 1993.

Van Leer, B., 1977, Towards the ultimate conservative difference scheme : IV. a new approach to numerical convection, *J. Computational Phys.*, *23*, 276–299, 1977.

Vautard, R. and Menut, L., ESQUIF campagne de l'été 1998 - Premier bilan, technical report, LISA and IPSL, octobre 1998.

Vautard, R. and Menut, L., ESQUIF - Rapport d'étape pour le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, technical report, LISA and IPSL, avril 1999.