

## IMPACT DES BRISES THERMIQUES SUR LE TRANSPORT DES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES DANS LA VALLÉE DE LA VILLE DE MEXICO

J. C. GALLARDO<sup>1</sup>, D. A. PARRA<sup>1</sup>, R. VILLASENOR<sup>1</sup>,  
P. MIRABEL<sup>2</sup>, J.-L. PONCHE<sup>2</sup>

(1) Programme de Recherche en Protection de L'Environnement (PIMAS), Instituto Mexicano del Petróleo,  
Av. Cien metros Nol52, México D.F., CP. 07730- Méx.  
Tél.: + +52 3003 6904 - Fax: + +52 3003 8067- [Mél: jcarlos@imp.mx](mailto:jcarlos@imp.mx)

(2) Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère - Centre de Géochimie de la Surface  
(UMR 7517 du CNRS et Département de Chimie de l'Université L. Pasteur de Strasbourg),  
1 rue Blessig, E-67084 Strasbourg Cedex.

### Résumé

Dans le cadre des activités de recherche du Programme PIMAS<sup>1</sup> de l'Institut Mexicain du Pétrole (IMP), une étude d'impact des brises thermiques sur le transport des polluants réactifs dans la région de la Vallée de la Ville de Mexico (VVM) a été effectuée à l'aide de la modélisation à méso - échelle. Dans cette étude, une comparaison de deux modèles météorologiques : MEMO<sup>2</sup> et M M 5<sup>3</sup> a été effectuée pour étudier les brises thermiques présentes dans la région. Un programme informatique a été réalisé pour générer, à partir des bases des données globales, les données topographiques et d'occupation du sol nécessitées par MEMO. La période d'étude choisie est celle du 4 au 11 mai 1998 et correspond à un épisode de pollution photochimique sur l'ensemble de la VVM. Les résultats obtenus avec les deux modèles météorologiques montrent que la circulation à méso-échelle dans la région de la VVM est influencée par le cycle diurne-nocturne associé aux brises thermiques (brises de vallée et de montagne) et non par la circulation à l'échelle synoptique. Ces brises thermiques sont suffisamment intenses pour influencer le transport des polluants et notamment l'advection nocturne d'ozone vers la périphérie de la VVM.

### Abstract

In the frame of the research programme PIMAS<sup>1</sup> supported by the Mexican Petroleum Institute (IMP), mesoscale modelling techniques have been used to determine the impact of thermal breezes on the reactive pollutant transport in the Mexico City Valley (MCV). A comparison between two meteorological models, MEMO<sup>2</sup> and M M 5<sup>3</sup> was performed in order to observe the differences between the winds fields predicted with these two models while studying the generation of the breezes in the region. Global databases provided the topographic and land-use information needed to run MEMO. The selected episode for model simulation corresponds to a pollution event recorded as one of most critical photochemical periods in 1998 (May 4-11). Both, MEMO and MM 5 predict the general trends when looking at mesoscale circulation in the M C V, which is influenced by daily-night cycles associated to thermal breezes (mountain and valley breezes). The synoptic scale did not show any influence and the most important effects were due to the regional winds. Thermal breezes are strong enough to influence, to a considerable degree, the horizontal transport of pollutants, especially the advection of ozone in the M C V at night (i.e., residual ozone that is transported to the valley).

<sup>1</sup> Programme de recherche en protection de l'environnement de l'Institut Mexicain du Pétrole (IMP)

<sup>2</sup> MESoscale MOdel (Moussiopoulos, 1995)

<sup>3</sup> Mesoscale Model of 5th-Generation, Version 3 de la Pennsylvania State University / National Center for Atmospheric Research - USA (Grell, et al., 1994)

Mots-clés : brises thermiques, études d'impact, modélisation méso - échelle, épisode photochimique, circulation synoptique.

Key-words : thermal breezes, impact studies, mesoscale modeling, photochemical episode, synoptic circulation.

## Introduction

La Vallée de la Ville de Mexico (VVM) est une des régions très intéressantes à étudier où la qualité de l'air n'a cessé de se dégrader. La fréquence des épisodes de "smog" photochimique et de réduction de visibilité par les particules s'y est accrue. Au vu des implications en matière de santé publique notamment, cette dégradation a retenu toute l'attention des scientifiques et des pouvoirs publics. Récemment, Molina et al. (2000) ont montré que depuis 1988, la concentration d'ozone dans la VVM dépasse les normes durant plus de 290 jours par an (soit environ 80% du temps). Les niveaux d'ozone qui atteignent 300 ppb sont comparables à ceux des années 70 à Los Angeles (USA). A Mexico, depuis 1990, trois programmes d'amélioration de la qualité de l'air ont successivement démarré. Cela a débuté avec le programme intégral pour le contrôle de la pollution atmosphérique (PICCA) d'une durée de 4 ans (1990 à 1994) dont l'objectif principal était de réduire les émissions atmosphériques générées dans la VVM. Après cette période, de 1995 à 2000 a été lancé le programme pour améliorer la qualité de l'air de la région (PROAIRE). Dans ces deux programmes se sont développées plusieurs actions pour réduire les niveaux de pollution dans la VVM. Parmi les actions menées, il convient de citer en particulier : en 1990 l'obligation pour les véhicules de ne circuler qu'un jour par semaine, suivi l'année suivante par une reformulation du contenu des essences en composés organiques volatils (COV) réactifs, puis à partir de 1993 l'obligation pour les véhicules neufs d'être équipés de pot catalytique. En 1997, une nouvelle reformulation de l'essence (type « Magna ») a eu lieu et en 1999 la construction d'une nouvelle ligne du Métro est lancée, etc. D'une façon générale, les concentrations des polluants ont été réduites significativement à l'exception de l'ozone qui, bien que sa concentration n'ait pas augmenté, s'est maintenue à des niveaux assez élevés. Cette situation est fortement influencée du reste par des conditions climatiques souvent très défavorables. Après les résultats et l'expérience obtenus lors des deux programmes cités, Molina et al. (2000) ont proposé un projet décennal (2001-2010) de stratégie intégrale de gestion de la qualité de l'air pour la région, lequel a donné lieu au troisième programme (PROAIRE 2002-2010). A ce projet participent des chercheurs nationaux et internationaux (Université de Harvard et Institut Technologique du Massachusetts), ainsi que des pouvoirs publics nationaux. Le programme PIMAS de la EPA participe activement à ce projet en réalisant des études de modélisation de la qualité de l'air. Dans ce travail nous présentons les résultats obtenus sur l'étude des conditions climatiques à l'échelle locale et régionale de la VVM.

## 1. Zone et période d'étude

Pour affiner les résultats des champs de vents sur la VVM, plusieurs simulations emboîtées ont été réalisées afin d'obtenir les champs de paramètres météorologiques (vitesse et direction du vent, températures) avec une résolution spatiale suffisante pour reproduire les phénomènes de brises. Les domaines D1, D2 et D3 pris en compte par le modèle MM5, ainsi que ceux utilisés par MEMO, GG et FG, (correspondant aux domaines D2 et D3 respectivement) sont donnés dans la figure 1. Le domaine D1 comprend environ 1/3 de la superficie du Mexique et inclut une partie du Golfe de Mexico à l'Est et une partie de l'Océan Pacifique à l'Ouest. Il permet de définir les conditions aux limites pour le domaine D2 : orientations des vents régionaux dominants et des flux de vents synoptiques. Le domaine D2 se focalise sur la partie centrale du Mexique et prend en compte la topographie assez complexe. Il définit les conditions aux limites pour le dernier domaine D3 (5600 km<sup>2</sup>) qui correspond à la VVM (égale à 0,3 % du territoire mexicain). Il recoupe le domaine de l'inventaire

d'émissions (IE) dont les différentes contributions ont été réalisées par le Secrétariat de l'Environnement (SMA) du Gouvernement de District Fédéral (GDF) à Mexico. Cet IE sera indispensable pour les simulations ultérieures qui seront effectuées à l'aide des modèles MARS<sup>4</sup> et MCCM<sup>5</sup> dans la VVM. La zone d'étude D3 comprend deux zones administratives (voir D3, fig. 1): au centre se trouve le District Fédéral et autour de celui, une grande partie de l'Etat de Mexico. Dans sa totalité, D3 est considérée une zone urbanisée. La croissance de la population du District Fédéral a été extrêmement forte depuis les années 50 : de 29 000 habitants en 1950 à 4,3 millions en 1980 et 9,4 millions en 2000. Pour l'Etat de Mexico, cette croissance a été moins spectaculaire : 2,9 millions en 1950, 8 millions en 1980 et 8,8 millions en 2000. La population dans la VVM s'accroît cependant encore d'environ 3 % par an. Ce domaine concentre par ailleurs plus d'un tiers de l'industrie. Les émissions résultantes sont très importantes. Elles sont dues aux quelques 6200 sources ponctuelles industrielles et aux 150 millions de km parcourus chaque jour par plus de 3 millions de véhicules. Ces 2 sources nécessitent entre 40 000 et 50 000 m<sup>3</sup> de combustible par jour.

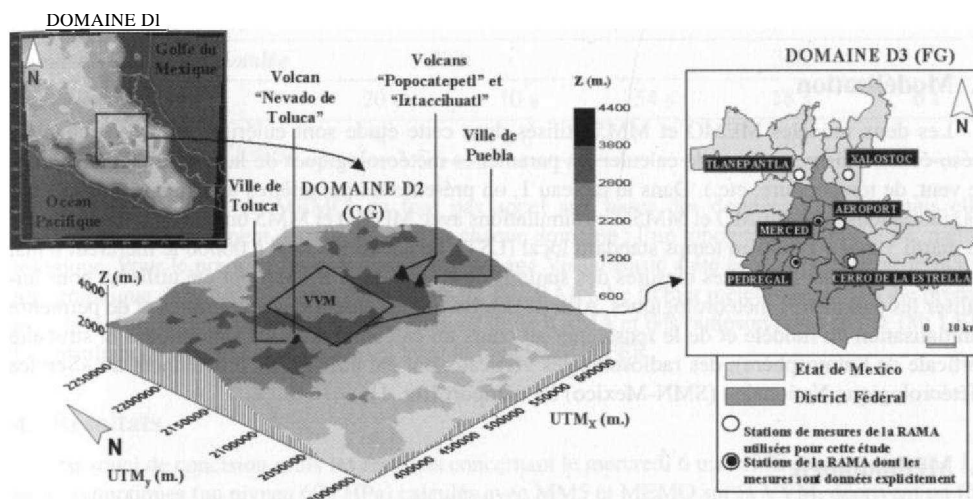


Figure 1 : Représentation des différents domaines de modélisation avec MM5 et MEMO, limites administrative de la zone de la VVM et localisation des stations de mesures de la RAMA.

La région de la VVM est localisée dans l'hémisphère nord à une latitude subtropicale (19,5°) et la topographie est celle d'une vallée située à 2240 m d'altitude encadrée par des chaînes de montagne qui culminent à 3952m au Sud et 3000m au Nord. A ces altitudes la pression atmosphérique est environ 23% plus basse que celle du niveau de la mer ce qui favorise d'autant les combustions incomplètes qui génèrent davantage de polluants dans l'atmosphère. Cette configuration favorise l'apparition et la persistance de nombreuses périodes d'inversions thermiques, qui en présence de conditions anticycloniques, empêchent quasiment toute dispersion des polluants. Comme toutes les grandes villes localisées dans des vallées peu ventilées et compte tenu de sa situation d'altitude (rayonnement solaire plus intense), la ville de Mexico subit d'importants problèmes de pollution photochimique (ozone) et de pollution due aux particules en suspension.

<sup>4</sup> Model for Atmospheric dispersion of Reactive Species (Moussiopoulos, 1995)

<sup>5</sup> Multiscale Climate Chemistry Model (Stauffer et al., 1994)

L'étude comparative des brises thermiques calculées avec ME MO et MM 5 a été effectuée durant la période du 4 au 11 mai 1998. Pendant cette période, toutes les conditions climatiques pouvant conduire à une pollution photochimique étaient réunies : faibles vitesses de vents (1 et 2 m/s en moyenne nocturne et diurne respectivement, qui empêchaient une dispersion efficace des polluants hors de la zone urbaine de la VVM, et régime de vents synoptiques régi par un flux de nord-est sur l'ensemble du domaine D 1. Ainsi des températures minimales et maximales de l'ordre de 16 et 33 °C respectivement ont été relevées durant toute cette période. Ces conditions ont ainsi favorisé le dépassement sur l'ensemble des journées du niveau IMECA<sup>6</sup> d'alerte 2 pour l'ozone (230 ppb horaire). En effet, durant cette période, les cinq stations de mesure de la RAMA de l'agglomération du District Fédéral, Xalostoc (XAL), Tlalnepantla (TLA), Merced (MER), Cerro de la Estrella (CES) et Pedregal (PED), (voir D3 - fig. 1, pour la localisation) ont relevé 40 dépassements du seuil. Le maximum observé a été de 291 ppb, le 9 mai entre 15 et 16 heures. Cette valeur est très élevée comparativement à celles qui avaient été mesurées durant la même période sur une partie de l'Europe pour laquelle perdurait une situation également anticyclonique et une épisode de pollution (max. de 90-100 ppb le 11 mai) dans la région de Strasbourg (France) (Vinuesa, 2001).

## 2. Modélisation

Les deux modèles MEMO et MM5 utilisés dans cette étude sont eulériens tridimensionnels à méso-échelle. Ils permettent de calculer les paramètres météorologiques de la zone d'étude (champs de vent, de température, etc.). Dans le tableau 1, on présente les paramètres techniques utilisés dans les simulations avec MEMO et MM 5. Les simulations avec MEMO et MM 5 ont été effectuées à partir du mardi 5 mai à 18h00 en temps standard local (LST), ce qui correspond à 00h00 le mercredi 6 mai en temps universel (TU). Les mesures des stations du réseau de la RAMA ont été utilisées pour initialiser les paramètres météorologiques. Afin de déterminer les conditions aux limites et de permettre l'initialisation du modèle et de le renseigner au cours du calcul (conditions synoptiques et structure verticale de l'atmosphère), des radiosondages verticaux ont été utilisés. Ils proviennent du «Service Météorologique Nationale» (SMN-Mexico) à l'aéroport (fig. 1).

## 3. Méthodologie

Les simulations avec MM5 ont été réalisées en 5 étapes avec les modules de calcul suivants :

TERRAIN, qui génère la topographie et l'utilisation de sols pour chaque domaine, de manière automatique (par ftp) à partir d'une base de données américaine.

REGRID, qui adapte l'information de TERRAIN aux champs météorologiques, à l'échelle globale, calculés avec le modèle d'aviation AVN (Kalnay et al., 1996). Similaire à TERRAIN, le module REGRIDER obtient cette information à partir d'une base de données globale.

INTERPF, qui fait l'interpolation des données de REGRIDER avec les différents niveaux verticaux choisis dans la simulation.

MM 5 qui calcule les champs météorologiques pour chaque domaine.

GrADS qui permet la visualisation des résultats.

<sup>6</sup> Indice Métropolitaine de la Qualité de l'Air pour la ville de Mexico,  
<http://www.cce.org.mx/cespedes/publications/cuademos/c4.html>



Tableau 1 : Récapitulatif des paramètres techniques utilisés  
dans les simulations avec MEMO (DEC-ALPHA 2100A - 1GHz et 256 Mo RAM)  
et M M 5 (S GI-Origin 2000 - 1 GHz et 512 Mo R A M) .

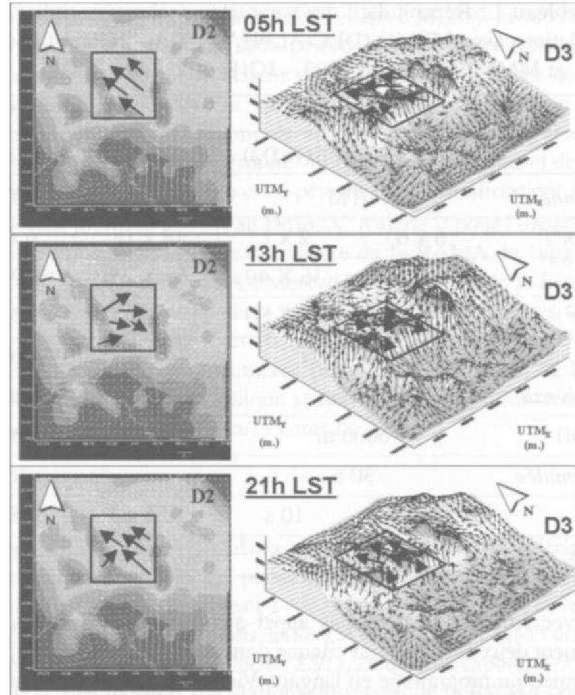
	MEMO			MM5	
	C G (D2)	F G (D3)	DI	D2	D3
Type de grille (coordonnées)	UTM			UTM	
Résolution spatiale (km <sup>2</sup> )	6 x 6	2 x 2	18 x 18	6 x 6	2 x 2
Nombre de cellules	48 X 48	36 X 40	65X65	49X49	37X43
Taille du domaine (km <sup>2</sup> )	288 X 288	72 X 80	1170 X 1170	288 X 288	72 X 8 4
Nombre de niveaux	30 niveaux			23 niveaux	
Hauteur du plus bas niveau	0-20 m			0-20 m	
Altitude maximum (/sol)	6000 m			7000 m	
Durée de la période simulée	30 h			30h	
Incrément de temps	20 s	10 s	54 s	18 s	6s
Temps (simulation) Temps (calcul)	4	4.6		36	

Les simulations avec MEMO, ne font pas appel aux bases des données globales mais elles nécessitent principalement deux fichiers pour chaque domaine : l'un topographique et l'autre, météorologique. Pour le premier, un programme en langage Visual Basic a été écrit pour générer le fichier topographique de MEMO à partir de résultats de TERRAIN. Le fichier météorologique, a été préparé avec les informations disponibles aux 5 stations de la RAMA et des radiosondages (6h et 18h LST). Les résultats de MEMO sont visualisés avec le logiciel SURFER.

#### 4. Résultats

Par souci de concision seuls les résultats concernant le mercredi 6 mai 1998 seront présentés. Les vents synoptiques (au niveau 600 hPa) calculés avec MM5 et MEMO sur la VVM, décrivent un flux provenant du Nord Nord-est (à 05L S T). Ce flux varie au cours de la journée pour passer à l'Est à 21 h LST. Les résultats obtenus avec MM5 et MEMO sont similaires et tout à fait cohérent entre eux à méso - échelle. Ils montrent tous les deux que la circulation dans la région de la VVM dépend essentiellement du cycle diurne-nocturne de brises thermiques et que l'influence des conditions synoptiques est minoritaire. Cependant cette circulation est quelque peu affectée globalement par les vents régionaux du sud-est qui sont amplifiés par l'effet de canalisation de l'ensemble de la vallée. Les brises thermiques sont suffisamment bien établies pour gouverner notablement les processus de transport et de brassage horizontal des polluants tout au long de la période modélisée.

Au niveau des vents régionaux et locaux, la figure 2 montre la comparaison entre les résultats de MM 5 et de MEMO (domaine D2 et CG) sur les champs des vents calculés pour la première couche de simulation à 10m du niveau du sol. Ces domaines ont été choisis car ils permettent de voir l'effet de vents régionaux sur les brises thermiques générées. Très tôt le matin, à 5h LST, les deux modèles sont tout à fait cohérents dans la VVM . A cette heure, les brises locales descendantes y sont présentes. Elles sont affectées par un flux de vent régional provenant du Sud-est, lequel canalise le vent dans la vallée. Par contre, les vents locaux ne sont pas affectés par les vents synoptiques. Au cours de la matinée, sous l'effet du soleil, on observe bien le développement des brises de vallée. A 13h L S T, ces brises de vallée sont présentes mais très atténuées par l'effet de réchauffement généralisé sur l'ensemble de la zone (réchauffement naturel dû à l'insolation et anthropique dû à la consommation



**Figure 2 : Comparaison de champs de vents calculés avec MEMO et MMS à 05h00, 13h00 et 21h00 LST pour la journée du 6 mai 1998.**

importante de combustibles dans la VVM). A cette heure, les vents dans la VVM ne sont plus affectés par la circulation régionale. En fin de journée (21h LST), les brises de montagnes se développent et reprennent de l'importance, mais sont influencées nettement par le flux de vent du Sud-est. A ce moment, l'effet de canalisation dans la vallée est plus important qu'auparavant.

A titre d'exemple, une comparaison ponctuelle de la température, de la vitesse et de la direction du vent (à 10 m d'altitude) calculés par MEMO avec deux stations de la RAMA (CER et MER) est présentée dans la figure 3. La comparaison avec MM 5 n'a pas été faite, puisque le développement d'un outil informatique pour obtenir ponctuellement les résultats de MM 5 est encore en cours. Il apparaît dans cette figure que les températures calculées par MEMO et MM5 ont les mêmes tendances journalières que les mesures relevées par la RAMA, malgré un écart systématique de 5 à 7 degrés en moyenne. Ceci peut s'expliquer en fonction de l'occupation du sol. MEMO nécessite pour chaque maille le pourcentage des 7 types d'occupation de sol existants. Cette information est obtenue par le programme TERRAIN qui travaille avec une seule classe d'occupation des sols par maille (celle qui est majoritaire), ce qui affecte la température de surface. Actuellement, un travail est en cours pour obtenir les 7 types d'occupation du sol à partir des données cartographiques à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Pour les vitesses de vent calculées par MEMO comparées à celles mesurées par la RAMA, malgré les faibles valeurs ( $0-3 \text{ m.s}^{-1}$ ), le modèle arrive à reproduire la tendance journalière surtout pendant la nuit, MEMO. Finalement, la direction du vent calculée est acceptable par rapport à celle observée avant 17h L S T : avec des vents de Sud-est ( $240^\circ$ ) pendant la nuit et Nord-est ( $60^\circ-80^\circ$ ) pendant la journée. Pour des raisons pratiques de visualisation des

directions de vents inférieures à 90°, toutes les valeurs ont été augmentées de 360°. La figure 4 montre les concentrations d'ozone troposphérique mesurées dans deux stations de la RAMA : MER et PED. La première, se trouve au centre ville alors que la seconde (PED) est située en zone résidentielle, tout près des montagnes du Sud-ouest.

Les stations MER et PED ont été sélectionnées, car elles relèvent, pour la période d'étude, les concentrations d'ozone dans la VVM, les plus basses et les plus élevées respectivement. Dans cette figure, il apparaît que pour la période d'étude, les pics d'ozone dépassent chaque après-midi la norme officielle mexicaine (HOppb), voire la norme IME CA « de mauvaise qualité, classée entre 230 et 350 ppb ». Egalement apparaissent l'effet important des brises thermiques sur le transport de la pollution atmosphérique. Durant la nuit un pic d'ozone de 60 ppb est observé en zone périurbaine près des montagnes (station PED) alors qu'il n'apparaît pratiquement pas dans l'autre station. Les concentrations en ozone relevées par la station MER (centre ville) sont caractéristiques d'une zone fortement urbanisée. Les maxima observés en début d'après midi résultent de l'action conjuguée des émissions anthropiques (trafic routier et industrie), de la température et de l'ensoleillement. La forte décroissance des concentrations en début de soirée est liée à l'arrêt des réactions photochimiques produisant l'ozone (disparition du rayonnement solaire) ainsi qu'à la destruction de l'ozone par les émissions. Durant la journée, la situation est similaire pour la station PED (zone périurbaine). Toutefois les maxima observés sont beaucoup plus élevés (le double pour la journée du 7 mai). Cette différence peut s'expliquer par un régime chimique différent. En zone urbaine la concentration des NO<sub>x</sub> est suffisamment élevée (> à quelques ppb) pour que ces mêmes NO<sub>x</sub> se comportent comme des inhibiteurs de la production d'ozone. En zone périurbaine, les concentrations relatives de NO<sub>x</sub> sont moins élevées (entre quelques dizaines de ppt et quelques ppb) et ne sont pas limitantes pour la production d'ozone (Académie des sciences, 1993).

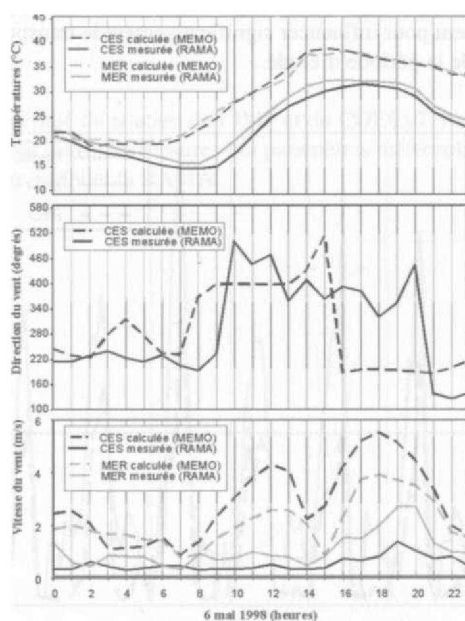
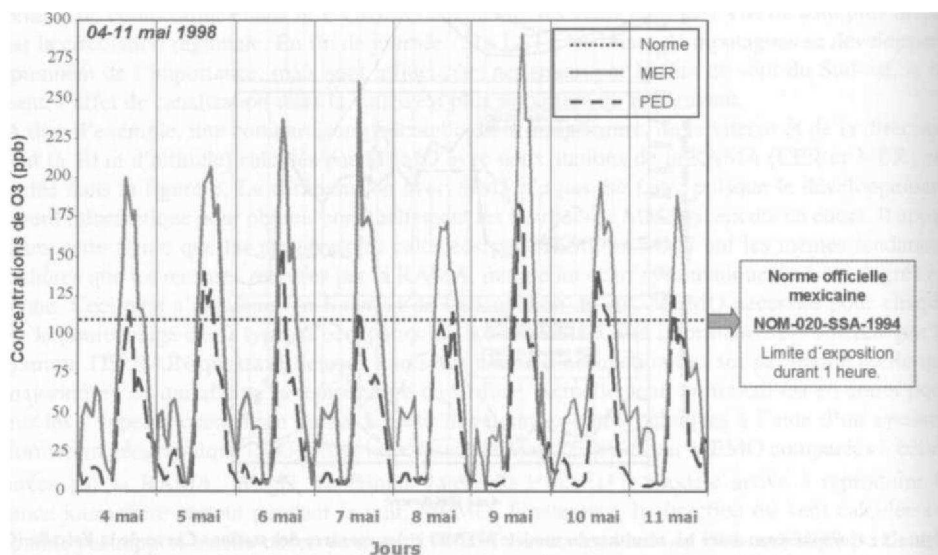


Figure 3 : Comparaison entre les résultats du modèle MEMO et les mesures des stations Cerro de la Estrella (CES) et Merced (MER) pour les paramètres de température, de vitesse et direction du vent le 6 mai 1998.

Les máxima secondaires observés la nuit à la station PED (et dans une moindre mesure à la station MER) ont une toute autre origine. Cette augmentation d'ozone nocturne semble directement liée à l'advection d'ozone accumulé durant la journée sur le relief montagneux ou l'ozone est peu consommé faute d'émissions anthropiques. Cette advection qui résulte des brises de montagne qui se développent à la faveur de la nuit cesse au lever du soleil (inversion des brises thermiques). L'ozone précédemment advecté est alors consommé selon les mêmes mécanismes que ceux prévalant au centre ville et les niveaux d'ozone diminuent jusqu'à des concentrations comparables à celles du centre ville. Les maxima secondaires sont beaucoup plus faibles au centre ville car l'effet des brises de montagne est considérablement réduit d'une part par l'îlot de chaleur urbain et d'autre part par la rugosité de la canopée urbaine. Les émissions nocturnes peuvent également contribuer à diminuer les niveaux d'ozone au centre ville. En période nocturne, le fond d'ozone au centre ville (MER) se situe aux environs de 8 ppb avec des maxima atteignant 20 ppb alors qu'en zone périurbaine, ces valeurs sont respectivement de 30 et 60 ppb. Les impacts de ces brises thermiques sur le transport de polluants réactifs dans la VVM, seront davantage développés à l'aide de la modélisation photochimique (MARS et MCCM). Ces modèles sont actuellement en application pour la région de la VVM.

#### Conclusion

La période étudiée du 4-11 mai, correspondait aux principaux pics d'ozone de l'année 1998. Dans les cinq stations principales du réseau RAMA, la norme officielle mexicaine (110 ppb) a été dépassée systématiquement. Durant cette période, la qualité de l'air a été qualifiée comme "mauvaise" selon la norme mexicaine, I M E C A. Les résultats obtenus avec M M 5 et MEMO montrent un bon accord entre les deux modèles et décrivent correctement la circulation à méso - échelle dans la région de la VVM. Celle-ci est gouvernée par le cycle diurne-nocturne de brises thermiques et non par la circulation à l'échelle synoptique, même si la présence des vents régionaux du sud-est amplifié l'effet de canalisation de la VVM affecte quelque peu le régime des brises thermiques. Ces dernières s'expriment néanmoins suffisamment pour influencer significativement le transport et le brassage horizontal des polluants tout au long de la période d'étude.



**Figure 4 : Concentrations d'ozone mesurées par les stations Merced (MER) et Pedregal (PED) du réseau de mesure de la RAMA, pour la période d'étude.**



Elles ont, en outre, permis d'expliquer les variations temporelles journalières des niveaux d'ozone troposphérique. Cette étude peut être considérée comme une étude préliminaire sur l'étude de la qualité de l'air de la région de la VVM. De plus, il reste utiliser les modèles de dispersion photochimique et valider l'inventaire d'émissions achevé récemment, ainsi que réaliser certaines études d'impact qui servent à améliorer la mauvaise qualité de l'air de la ville de Mexico. Ces points seront la prochaine étape à développer.

### **Bibliographie**

- ACADÉMIE DES SCIENCES, 1993 : Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère, rapport n° 30, Ed. Technique et Documentation - Lavoisier, Paris (France), pp 77-79.
- GRELL G. A., DUDHIA J. et STAUFFER D. R., 1994 : A description of the fifth-generation Penn State/ NCAR Mesoscale Model (MM5). Technical Report, NCAR. Tech Note TN-398+SRT
- MOLINA M. J. et MOLINA L. T., 2000 : Integrated strategy for air Quality management in the M C M A. MIT, Cambridge, M A, Report 7.
- MOUSSIOPOULOS N., 1995 : The Eumac Zooming Model, a tool for local-to-regional air quality studies. *Meteorolog. Atmos. Phys.*, 57, pp 115-133.
- STAUFFER D. R. et SEAMAN N. L., 1994 : Multiscale four-dimensional data assimilation, the model MCCM. /. *Appt. Met.* 33, pp 416-434.
- VINUESA J.-F., 2001 : Modélisation de la qualité de l'air: Impact a l'échelle locale et régionale de l'utilisation de carburants automobiles modifiés. Thèse de Doctorat de l'Université L. Pasteur, Strasbourg, France.

### **Remerciements**

M. D. A. PARRA a bénéficié du soutien de ITMP et du COECyT. Nous adressons nos remerciements aux organismes qui ont fourni les mesures des paramètres météorologiques et de qualité de l'air nécessaires, en particulier le S M N et la R A M A.