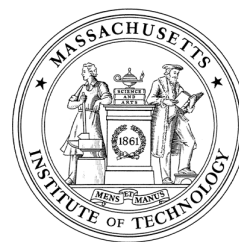




ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

*Laboratoire de Pollution
Atmosphérique et du Sol (LPAS)*



*Department of Earth, Atmospheric
and Planetary Sciences (EAPS)*

Lausanne, février 2003

Simulation d'un épisode de pollution sur Mexico City : le 15 février 2002

Travail pratique de diplôme de Julien Billeter

*travail interdisciplinaire entre la section de chimie et génie chimique (SCGC)
et la section sciences et ingénierie de l'environnement (SSIE)*

Directeurs de travail
Prof. H. van den Bergh, Dr. A. Clappier

Table des matières

AVANT-PROPOS	A
RÉSUMÉ	B
1 INTRODUCTION	1
1.1 BUT DU TRAVAIL	1
1.2 LA POLLUTION, UN PROBLÈME DÉMOGRAPHIQUE... PAS SEULEMENT.....	1
1.3 TOPOGRAPHIE DE LA VILLE.....	2
1.4 MESURES ENVIRONNEMENTALES PRISES À MEXICO CITY.....	3
1.5 EPISODES DE POLLUTION SUR MEXICO	5
1.6 NÉCESSITÉ DE SIMULATIONS.....	5
2 MODÈLES NUMÉRIQUES	6
3 ANALYSE DES MESURES	8
3.1 CLASSIFICATION DES STATIONS DE MESURE	8
3.2 CONSTRUCTION D'UN SCÉNARIO.....	9
3.2.1 14 février.....	9
3.2.2 15 et 16 février.....	11
4 SIMULATION DE LA MÉTÉOROLOGIE AVEC LE MODÈLE FVM	12
4.1 DONNÉES NCEP/NCAR REANALYSIS COMME DONNÉES D'ENTRÉE.....	12
4.2 QUALITÉ DES DONNÉES D'ENTRÉE.....	13
4.3 TRAITEMENTS DES DONNÉES NCEP	14
4.3.1 Correction par valeur constante	14
4.3.2 Profil de température expérimental comme donnée d'entrée.....	15
4.3.3 Correction par valeur non constante	16
4.3.4 Vers une méthode plus générale.....	17
4.4 EXTENSION DE LA SURFACE URBAINE DE FVM.....	18
4.5 EFFET DE L'ORIENTATION DES RUES	20
4.6 COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION ET LES MESURES.....	20
4.7 DÉVELOPPEMENT DES VENTS SIMULÉS PAR FVM	24
4.7.1 14 février.....	24
4.7.2 15 février.....	26
4.7.3 16 février.....	28
5 SIMULATION DU TRANSPORT - CHIMIE AVEC LE MODÈLE TAPOM	29
5.1 EFFET DE L'EXTENSION DE LA SURFACE URBAINE (FVM) SUR TAPOM.....	29
5.2 EFFET DE LA DÉPOSITION SÈCHE	30
5.3 IMPORTANCE DES HYDROCARBURES DANS LE CADASTRE D'ÉMISSION.....	31
5.4 DURÉE DE L'INITIALISATION.....	32
5.5 COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION ET LES MESURES.....	34
5.6 DÉVELOPPEMENT DU PANACHE SIMULÉ PAR TAPOM	37
5.6.1 14 février.....	37
5.6.2 15 février.....	38
5.6.3 16 février.....	39
6 CONCLUSION	40
7 BIBLIOGRAPHIE	41
8 ANNEXES	I
8.1 DÉTAILS SUR LES MODÈLES NUMÉRIQUES UTILISÉS DANS CE TRAVAIL	I
8.2 DÉTAILS SUR LA CLASSIFICATION DES STATIONS DE MESURE	II
8.2.1 15 février.....	ii
8.2.2 16 février.....	iv
8.3 DÉTAILS SUR LA HAUTEUR DE MÉLANGE	VI

Avant-propos

Ce document est présenté comme travail pratique de diplôme (interdisciplinaire entre la section de chimie et génie chimique et la section sciences et ingénierie de l'environnement) pour l'obtention du titre d'ingénieur-chimiste.

Ce travail a duré 4 mois et a été réalisé du 28 octobre au 28 novembre 2002 dans le groupe de simulation du LPAS¹ de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), sous la direction du Prof. H. van den Bergh, du 1er décembre 2002 au 31 janvier 2003 au département EAPS² du Massachusetts Institute of Technology (MIT) à Cambridge, dans le groupe du Prof. M. Molina, puis à nouveau dans le groupe de simulation du LPAS du 3 au 28 février 2003.

Je tiens à remercier tout d'abord Messieurs les Professeurs Hubert van den Bergh et Mario Molina pour m'avoir donné la chance de faire ce travail dans leurs groupes respectifs.

Ensuite, mes remerciements vont au Dr. Benjamin de Foy au MIT pour son accueil très sympathique et pour les données qu'il a bien voulu me transmettre. Je remercie également le Dr. J. A. Garcia Reynoso pour son témoignage sur la vie quotidienne au Mexique et dans sa capitale, ainsi que pour son sens de l'humour.

Au LPAS, je tiens à remercier le Dr. Alain Clappier, responsable du groupe de simulation, pour ses conseils témoignant de sa grande expérience dans les domaines de la simulation, Martin Junier, doctorant, pour ses connaissances en informatique et surtout Clive Muller, doctorant, pour son expérience sur le cas précis de Mexico et pour les réponses aux très nombreuses questions que j'ai posées.

Enfin, je souhaite saluer ici mon collègue Urs Schenker, étudiant en science de l'environnement, qui a travaillé sur le même sujet et qui présente son travail³ en même temps que le mien.

¹ Laboratoire de Pollution Atmosphérique et du Sol dépendant de la faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit (ENAC).

² Earth, Planetary and Atmospheric Sciences.

³ Schenker, U., Influence of meteorological parameters on air quality simulations in Mexico City, Travail pratique de diplôme, EPFL, Lausanne (2003).

Résumé

Mexico City, deuxième ville du monde avec plus de 18 millions d'habitants, est sujette à de violents épisodes d'ozone, en raison de sa topographie et malgré les nombreuses mesures environnementales déjà prises depuis plus de dix ans par le gouvernement mexicain. Ces épisodes atteignent des valeurs telles que les municipalités sont parfois obligées de suspendre la circulation routière au centre ville et de ralentir l'activité économique et industrielle, de façon à éviter des atteintes à la santé de la population. En outre, ces mesures extrêmes s'accompagnent de pertes financières considérables pour la collectivité et les entreprises.

Afin de tester les meilleures stratégies à suivre en matière de réduction des émissions, beaucoup de groupes de recherche de par le monde font appel à la simulation, car c'est l'outil le plus adapté pour décrire en un minimum de temps les nombreux paramètres dont dépendent ces épisodes. C'est l'aspect préalable à la mise au point de ces stratégies qui est discutée dans ce travail, à savoir caler les modèles numériques sur les mesures, de façon à obtenir des résultats aussi réalistes que possibles.

L'épisode du 15 février 2002 a été simulé sur Mexico City avec le modèle météorologique FVM et le modèle de transport et de chimie TAPOM, deux modèles méso-échelle mis au point au Laboratoire de Pollution Atmosphérique et du Sol (LPAS) de l'EPFL. Une grille de simulation de 4.5 par 4.5 kilomètres, ayant une résolution verticale décroissante avec l'altitude, a été choisie pour ces deux modèles. Une procédure de *forcing* (FDDA) est utilisée pour introduire dans FVM des données du modèle à grande échelle NCEP/NCAR Reanalysis comme données d'entrée.

Ce travail a montré que la qualité de ces données d'entrée n'était pas suffisante pour une simulation météorologique de qualité, un biais très important ayant été constaté au niveau de la température. La météorologie et le panache d'ozone modélisés les 14, 15 et 16 février sont très nettement améliorés par l'utilisation dans FVM d'une procédure de *nesting* avec une résolution plus fine et un domaine plus étendu au sud de la ville. Cette méthode permet le développement correct des vents au sud du domaine et a comme effet majeur d'introduire une zone de convergence à l'ouest de la ville, visible également sur les mesures. Il a aussi été démontré que l'effet du 14 sur le 15 février en matière de pollution est très important au sud de la ville, tandis qu'au centre et au sud-ouest c'est l'influence du 15 lui-même qui prédomine largement.

Des réglages plus fins au niveau du *nesting* météorologique devraient permettre de corriger certains écarts observés par rapport aux mesures. Il reste un travail important à réaliser sur les données d'entrée du modèle TAPOM, notamment au niveau des émissions, pour caler parfaitement les simulations sur les mesures. Une procédure de *nesting* pourrait aussi être développée pour le modèle TAPOM, moyennant une adaptation du cadastre d'émission.

1 Introduction

La pollution atmosphérique apparaît comme un problème majeur dans notre société moderne car elle affecte la ressource la plus indispensable à l'être humain, à savoir l'air qu'il respire. En effet, si l'être humain peut survivre plusieurs semaines sans manger, quelques jours sans dormir et quelques heures sans boire, combien de temps espère-t-il vivre en étant privé d'air ? L'air est donc la première des ressources à protéger sur cette terre. Il est vrai que par son état diffus, l'air nous paraît moins présent que l'eau ou le sol. Néanmoins, il nous environne toujours.

L'air sec est un mélange de gaz composé de 78% d'azote, 21% d'oxygène et 1% d'autres gaz. Or, c'est en partie l'équilibre dans la composition de ce pourcentage qui permet à l'être humain de respirer sans subir d'affection quelle qu'elle soit. Ce pourcentage contient notamment des gaz comme le méthane et le dioxyde de carbone, gaz à effet de serre à l'échelle mondiale et des espèces chimiques comme les oxydes d'azote, les hydrocarbures, des poussières et de l'ozone, polluants urbains et régionaux.

Ces polluants régionaux affectent particulièrement les mégapoles, ces cités surdéveloppées peuplées de plusieurs millions d'habitants. Cette densité de population très importante génère une énorme pollution de l'air en raison des processus de combustion des énergies fossiles utilisés par l'industrie et les véhicules motorisés. Si la situation est tellement désastreuse dans les pays et les villes pauvres c'est en raison de leur manque de moyens financiers pour la mise en place de programmes environnementaux.

Après un court paragraphe décrivant le but de ce travail, la suite de cette introduction va replacer Mexico City dans le cadre des grandes mégacités de la planète, puis discuter des problèmes environnementaux spécifiques à cette ville et présenter les mesures prises par les communes afin d'améliorer la qualité de leur air.

1.1 But du travail

Ce travail consiste à simuler un épisode de pollution sur Mexico City durant l'hiver 2002 et à comparer ces simulations avec des mesures. Ceci dans le but d'ajuster le mieux possible sur la période choisie les deux modèles utilisés, à savoir FVM⁴ pour la météorologie et TAPOM⁴ pour le transport et la chimie, et afin de mieux comprendre les épisodes de pollution photochimique. Ce genre d'étude est le préalable indispensable pour atteindre le but final de ces modèles, c'est-à-dire tester des scénarii de réduction des émissions. L'accent sera particulièrement mis sur les polluants tels que l'ozone et le dioxyde d'azote car, encore aujourd'hui, leur concentration dépasse largement et régulièrement le standard mexicain.

1.2 La pollution, un problème démographique... pas seulement

La démographie influence de façon importante la qualité de l'air, les villes étant, à première vue, d'autant plus exposées à la pollution que leur population est importante. Au vingtième siècle, cet effet démographique a pris une importance considérable. Il y avait par exemple 3 villes de plus de 10 millions d'habitants en 1950 et ce nombre a doublé en 1980 (dont Mexico City) et encore doublé en 1990.

⁴ Voir chapitre 3, pour une discussion détaillée sur ces modèles.

Dans le cas de Mexico, ce phénomène s'explique notamment par la concentration toujours plus importante des administrations publiques, des services et des industries, sous l'effet d'une centralisation en partie décidée par le gouvernement. Ce qui pousse les gens les plus démunis à quitter leurs villages dans le but d'améliorer leur sort ou celui de leur famille, en trouvant un travail dans ce nouvel eldorado urbain. Victime de cette surpopulation, c'est une ville aux multiples contrastes, dont les bidonvilles et les quartiers insalubres à sa périphérie jouxtent de véritables bijoux coloniaux et de nombreuses places très prospères. En 2000, Mexico comptait environ 18 millions d'habitants et si rien n'est fait pour freiner cette croissance, certains experts estiment que la ville pourrait en compter 22 millions d'ici 2010.

Les chiffres du tableau ci-dessous montrent que Mexico City, la deuxième ville du monde en population, possède une nettement moins bonne qualité de l'air que Tokyo, qui est pourtant et de loin la plus grande métropole de la planète.

Métropole	Population (millions) 2000	TSP ⁵ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1995	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1998	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1998
Tokyo, Japon	26.44	49	18	68
Mexico City, Mexique	18.13	279	74	130
Sao Paulo, Brésil	17.76	86	43	83
Los Angeles, USA	13.14	-	9	74
Jakarta, Indonésie	11.02	271	-	-
Pékin, Chine	10.84	377	90	122
Le Caire, Egypte	10.55	-	69	-
Standard OMS		90	50	40

Tableau 1 : Comparaison de la qualité de l'air moyenne annuelle dans 7 métropoles du monde.

Source : M. et L. Molina, 2002 [5].

Cet exemple indique que la démographique n'est pas le seul paramètre influençant de façon notable la qualité de l'air dans les grandes villes. Le niveau de développement industriel et socio-économique, la météorologie et parfois la topographie peuvent avoir une influence importante, comme c'est le cas à Mexico.

1.3 Topographie de la ville

La zone métropolitaine de Mexico City (MCMA⁶) se trouve dans un bassin situé à une altitude de 2'240 mètres au-dessus du niveau de la mer. La ville occupe une surface de 1'500 km² et est confiné à l'est, à l'ouest et au sud par des chaînes de montagnes élevées (voir figure ci-dessous). Le côté est porte les célèbres volcans *Popocatepetl* (5'452 mètres) et *Ixtaccihuatl* (5'286 mètres). La figure ci-dessous présente la topographie du grand Mexico.

⁵ Total suspended particulates.

⁶ Mexico City Metropolitan Area.

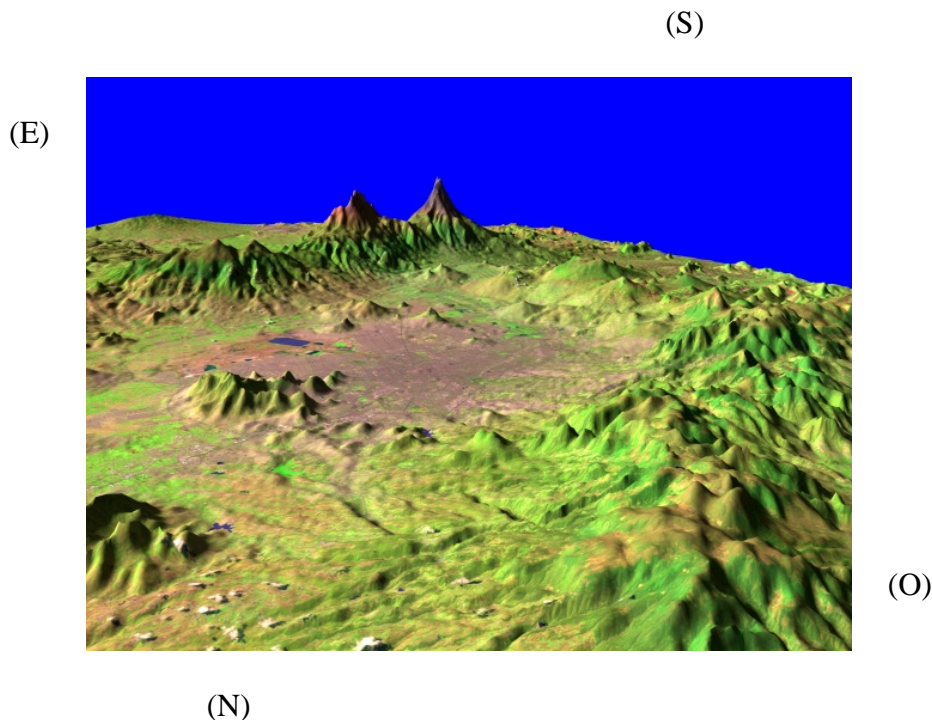


Figure 1 : Topographie de Mexico vue du nord-ouest. En rose, la ville de Mexico City. En arrière plan, le volcan Popocatepetl est visible (la plus haute montagne).

Cette région est souvent appelée *Valle de México* en raison d'une large ouverture au nord, visible au premier plan de la figure ci-dessus, et d'un petit passage au sud-ouest, visible en arrière plan, près du volcan *Popocatepetl*.

1.4 Mesures environnementales prises à Mexico City

Les études réalisées sur la qualité de l'air de nombreuses villes, comme Los Angeles et Milan par exemple, ont permis aux spécialistes de l'environnement de s'attaquer aux problèmes de Mexico avec des connaissances très approfondies. Cependant, le bassin de Los Angeles et celui de Mexico City diffèrent par leur altitude, Los Angeles se trouvant au niveau de la mer. L'altitude agit sur la qualité de l'air de Mexico de deux manières. Premièrement, l'air contient 23% d'oxygène de moins qu'au niveau de la mer, affectant de façon évidente la combustion interne des moteurs, si le mélange essence/air n'est pas convenablement réglé, augmentant par là même les émissions. Le deuxième effet est biologique. En haute altitude, le corps humain a besoin d'inspirer plus d'air pour avoir la même quantité d'oxygène qu'au niveau de la mer, une dose plus importante de polluants est alors inhalée.

Le problème de la qualité de l'air au-dessus de Mexico est connu des citoyens et du gouvernement depuis les années 60 et la pollution de l'air est surveillée de façon routinière depuis le milieu des années 70. Actuellement, le monitoring de Mexico est assuré par un réseau nommé *Red Automática de Monitoreo Atmosférico* ou RAMA. La qualité de l'air est rapportée chaque jour au public sous la forme d'un indice, *Indice Metropolitano de Calidad del Aire* ou IMECA⁷.

⁷ Pour une discussion détaillée sur le calcul de cet indice, voir [5].

Dans les années 80, les taux d'ozone, de dioxyde d'azote, de dioxyde de soufre, de particules et de plomb dépassaient les normes standard admises au Mexique. Pour comprendre ceci, il faut savoir que Mexico abrite la moitié de la production nationale mexicaine, celle-ci étant concentrée sur un rayon de 150 kilomètres tout autour de la capitale. Dans les années 90, grâce à des initiatives ciblées, beaucoup de ces taux ont pu être diminués, parfois en dessous du standard.

L'amélioration la plus importante provient de l'interdiction du plomb dans l'essence – diminution mesurable dans l'atmosphère et jusqu'au niveau des taux sanguins. Les mesures de SO₂ ont décliné fortement dans les années 90 en raison de la réduction du soufre dans le carburant diesel et dans les huiles lourdes. Les concentrations de monoxyde de carbone ont baissé avec l'introduction du catalyseur obligatoire sur toutes les nouvelles voitures et une meilleure inspection et maintenance des véhicules. Tous ces polluants se situent aujourd'hui en dessous du standard mexicain. Néanmoins, malgré l'introduction de ces mesures, les concentrations en ozone, dioxyde d'azote et particules n'ont montré qu'une amélioration limitée durant les années 90 et sont toujours en dessus du standard.

Mexico City a également opté pour des mesures plus spécifiques à ses problèmes. Par exemple, le système *Hoy No Circula* (journée sans voiture) fut introduit vers la fin des années 80, d'abord de façon volontaire puis officiellement en 1989. Cette mesure consiste à interdire à 20% du parc automobile de circuler un jour par semaine, en se basant sur les chiffres minéralogiques comme critère d'interdiction. Dans les années 90, un système de vignette fut introduit comme mesure de renfort. Les véhicules très peu polluants (respectant la norme américaine TIER 1⁸) et donc récents disposent d'une vignette double zéro leur permettant de circuler sans restriction. Puis des vignettes zéro, un et deux sont accordées aux véhicules, suivant leurs émissions par ordre croissant. En cas d'épisode de pollution, les véhicules portant des vignettes à nombre élevé sont retirés graduellement de la circulation suivant l'évolution de la situation. En plus d'être une mesure d'urgence, cette action a pour but de moderniser la flotte automobile et de diminuer progressivement la pollution de fond. L'influence de cette journée sans voiture, avec ou sans vignette, sur un épisode de pollution est évidente, la modernisation du parc automobile et son effet sur la pollution de fond sont par contre très discutés.

D'autres mesures ont été prises dans les années 80, comme par exemple la conversion de l'usine électrique *Valle de México* passant du mazout au gaz naturel ou la décision de décentraliser certaines industries très polluantes en dehors de la ville. Dans les années 90, l'effort a été porté sur les transports, comme par exemple la modernisation des transports publics et des taxis, l'extension du métro, une politique fiscale avantageuse pour les propriétaires de véhicules peu polluants et l'amélioration de la qualité des carburants.

Grâce au réseau de monitoring RAMA et à des actions de limitation de polluants, graduellement mis en place suivant les taux mesurés et selon un plan de réaction très détaillé, les autorités de la ville de Mexico sont en principe capables de limiter les effets d'un épisode de pollution sur la santé des citoyens.

⁸ Norme limitant les émissions de certains polluants directement à la sortie des pots d'échappement.

1.5 Episodes de pollution sur Mexico

Comme il a été dit plus haut, l'ozone est actuellement le polluant qui focalise toute l'attention, car son taux reste très élevé malgré toutes les mesures déjà décrites. C'est pour cette raison que ce document s'intéressera principalement à ce polluant.

L'effet de l'ozone se manifeste chez les animaux comme chez les plantes. Dans l'agriculture par exemple, le rendement de certaines plantes est réduit lorsqu'elles sont exposées à l'ozone. Chez l'être humain, l'ozone provoque principalement l'irritation des yeux, de la gorge et du nez et parfois des difficultés lors de l'inspiration, ainsi que de la toux chez les personnes plus fragiles ou en cas de forte exposition. L'ozone semble aussi contribuer aux affections pulmonaires chroniques. Contrairement au SO_2 , NO_x , CO ou à certains hydrocarbures, l'ozone est un polluant dit secondaire car il est formé par réaction des oxydes d'azote (NO_x) et des hydrocarbures, selon un mécanisme non linéaire complexe faisant appel au rayonnement solaire UV. Pour une discussion détaillée sur la formation de l'ozone, voir [1], [7] et [8].

Contrairement aux métropoles de latitude moyenne, Mexico City peut subir des épisodes d'ozone toute l'année en raison de sa latitude subtropicale et de sa haute altitude. Durant les mois secs d'hiver, Mexico City se trouve d'ordinaire dans un système anticyclonique avec des vents faibles sur le bassin. La reprise de l'activité économique, avant que l'activité solaire n'ait conduit à l'élévation de la couche de mélange, provoque très souvent dans la ville l'apparition d'un pic d'oxyde d'azote le matin. Puis, l'échauffement du sol par la radiation solaire provoque un mélange turbulent qui renvoie le sommet de la couche de mélange en haute altitude (parfois jusqu'à 4000 mètres) et dilue les oxydes d'azote.

Comme la formation de l'ozone est lente, en raison des multiples réactions impliquées, son taux maximum apparaît seulement en milieu d'après-midi. Dans beaucoup de villes, les précurseurs de l'ozone sont transportés par les vents loin du centre et le panache touche des régions distantes parfois de près de deux cent kilomètres. A Mexico par contre, ces précurseurs restent piégés par les hautes montagnes avoisinantes et ce panache stagne durant une bonne partie de l'après-midi sur la métropole, provoquant de terribles épisodes d'ozone.

L'activité économique de Mexico City se prolonge très tard en fin de journée. Les mesures d'oxyde d'azote montrent alors parfois un pic appelé pic du soir coïncidant avec une descente progressive de la hauteur de mélange et une production constante d'oxydes d'azote, dès lors concentrés. Durant les mois humides d'été (juin à septembre), les nuages inhibent la photochimie et les pluies éliminent les traces de polluants et de particules, par déposition humide. C'est pourquoi, les épisodes d'ozone prononcés sont moins fréquents en été.

1.6 Nécessité de simulations

La qualité de l'air peut être étudiée par des modèles numériques. L'intérêt principal de ceux-ci est leur aspect prédictif, ce qui permet de les utiliser pour valider des scénarii de réduction des émissions. C'est d'ailleurs en utilisant des modèles (CIT et MM5) de façon prédictive que le groupe du Prof. Molina du Massachusetts Institute of Technology (MIT) est à même de définir le meilleur comportement à adopter vis-à-vis d'acteurs majeurs de la pollution, comme par exemple la circulation routière ou l'industrie.

Avant d'utiliser de manière prédictive ces modèles, il faut les caler sur des mesures, de façon à être certain qu'ils reproduisent ce que l'on attend d'eux sur la période étudiée. C'est ce qui a été fait dans ce travail.

2 Modèles numériques

Les outils mathématiques permettant la simulation de la qualité de l'air ont été développés au Laboratoire de Pollution Atmosphérique et du Sol (LPAS) de l'EPFL. Ils consistent en deux modèles, l'un simulant la météorologie (Finite Volume Model ou FVM, développé par Martilli et Clappier) et l'autre simulant le transport et la chimie (Transport and Air POLLution Model ou TAPOM, développé par Junier, Roulet et Clappier). Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de ces deux modèles.

Modèle	Type	Caractéristiques communes	Caractéristiques propres
FVM	Météorologie	Modèle eulérien 3D à maille déformable (terrain following). Domaine de type méso échelle.	Modèle non-hydrostatique et anélastique. Résout les bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Utilise un module de paramétrisation des villes [3].
TAPOM	Transport et chimie	Programmation : Fortran 77.	Résout les bilans de masse selon la méthode des volumes finis. Utilise le module chimique RACM [4].

Tableau 2 : Caractéristiques techniques des modèles FVM et TAPOM

Les données d'entrée de FVM proviennent du modèle numérique d'altitude GTOPO30 (Global TOPOgraphy 30) pour la topographie, du USGS⁹ Land Use/Land Cover pour la couverture du sol, et du modèle météorologique global NCEP/NCAR Reanalysis pour la température et les vents. Ces dernières données sont introduites dans FVM selon une méthode de *forcing* (FDDA, Four Dimensional Data Assimilation). Le *forcing* est utilisé pour introduire des données à grande échelle sur les bords d'un domaine méso échelle, dans le but de guider cette simulation et de tenir compte des changements dans les conditions géostrophiques.

Les données d'entrée de TAPOM proviennent, quant à elles, du modèle numérique d'altitude GTOPO30 (Global TOPOgraphy 30) pour la topographie, du USGS Land Use/Land Cover pour la couverture du sol utilisée lors du calcul de la déposition sèche et d'un difficile travail d'investigation réalisé par le groupe du Prof. Molina du MIT pour le cadastre d'émission.

Pour une discussion plus détaillée de ces modèles et de la préparation des données d'entrée, voir référence [1] et [2]. Voir aussi l'annexe 8.1. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des domaines choisis pour les deux modèles.

Modèle	Grille ou domaine (cellules et km)	Résolution	Coordonnées du point en bas à gauche	Nombre de niveaux en hauteur
FVM	45 x 50 ou 202.5 km d'est en ouest. 225 km du nord au sud.	4.5 km x 4.5 km par cellule	(18.41° N ; 99.97° O)	32 ¹⁰ (altitude max : 10'347.5 m.)
TAPOM				12 ¹⁰ (altitude max : 7'279 m.)

Tableau 3 : Grilles de simulation choisies pour les modèles FVM et TAPOM

⁹ United States Geological Survey.

¹⁰ La résolution est décroissante avec l'altitude, afin qu'elle soit suffisante pour une description correcte des phénomènes liés au sol. Dans FVM par exemple, il y a 7 niveaux entre 0 et 100 m et seulement 3 niveaux entre 100 et 200 m (par rapport au sol). Les résolutions verticales de FVM et TAPOM sont différentes.

Pour vérifier que les résultats d'un modèle numérique correspondent à ce qui s'est réellement passé, il est nécessaire de confronter les résultats des simulations à des mesures. A cette fin, des mesures au sol, provenant du réseau RAMA, ont été collectées (téléchargeables sur internet à l'adresse <<http://148.243.232.103/imecaweb>>). Les 34 stations du réseau RAMA mesurent chaque heure les variables suivantes : ozone, dioxyde d'azote, monoxyde de carbone, dioxyde de soufre, PM₁₀, température, humidité relative, vitesse et direction du vent et radiation solaire (UV seulement).

Pour compléter cette vérification des simulations, des mesures en altitude, réalisées avec des ballon-sondes par UNAM¹¹ et par l'aéroport de Mexico, ainsi que des mesures du *Servicio Meteorológico Nacional* (SMN) en différents points de la capitale, m'ont été aimablement transmises par le Dr. de Foy du groupe du *Mexico City Project*. Les ballons-sonde sont lâchés à *Cuautitlán* (pour UNAM) et à *Tacuba* (pour l'aéroport) toutes les 12 heures (à 6h et à 18h) et mesurent les variables suivantes : pression, température, humidité relative (à *Cuautitlán* uniquement), point de rosée (à *Tacuba* uniquement), vitesse et direction du vent. La température potentielle a été calculée par le Dr. de Foy. Les stations du SMN mesurent, quant à elles, les données suivantes : température, humidité relative, quantité de pluie, radiation solaire (totale), vitesse et direction des vents.

Durant le mois de février 2002, le groupe *Mexico City Project* du MIT, sous la direction du Prof. Molina, a conduit une campagne intensive de mesures à Mexico. Après dépouillement des mesures, il s'est avéré qu'un pic d'ozone de 250 ppb avait été mesuré sur la période du 15 au 16 février. D'entente avec le Dr. de Foy, qui étudiait cette période, décision a été prise de se concentrer sur les 14, 15 et 16 février 2002. Le choix du 14 février s'explique par la nécessité pour le modèle TAPOM d'initialiser les données nécessaires à l'étude même de l'épisode de pollution du 15 février. Le 16 février, quant à lui, a été utilisé de façon à vérifier si le modèle était capable de simuler correctement 3 jours de suite sans dérive d'aucune sorte.

¹¹ *Universidad Nacional Autónoma de México.*

3 Analyse des mesures

Pour vérifier la qualité des simulations, il est nécessaire de se faire une idée sur la situation météorologique et chimique de l'épisode de pollution étudié. Une méthode éprouvée consiste à construire un scénario sur la base des mesures et à le comparer avec les simulations effectuées. Afin de construire ce scénario, le groupe du LPAS a montré qu'il était possible de regrouper les stations de mesures à disposition, selon un ou plusieurs critères, vis-à-vis d'un polluant particulier et d'identifier les zones de la ville ayant un comportement similaire. Dans le cas de Mexico, le réseau de monitoring RAMA est à même de fournir suffisamment de données sur l'ozone afin de faire cette classification. Les paragraphes suivants traitent de celle-ci.

3.1 Classification des stations de mesure

Pour classer les stations, il faut déterminer un ou plusieurs critères. Dans le cas de la période étudiée (14 au 16 février), les critères choisis pour chaque jour sont les suivants :

- la concentration maximale (ozone),
- l'heure du maximum (ozone),
- et le nombre de maxima (ozone).

La manière la plus objective de procéder au regroupement consiste à ignorer tout d'abord la position géographique des stations de mesure. Une fois que la classification est réalisée, il convient alors d'intégrer la dimension géographique des stations et de vérifier que celles situées dans des régions très différentes ne soient pas regroupées dans la même classe. Si ce cas de figure décrit parfois une réalité, ce non-sens géographique peut correspondre également à une mauvaise classification. Il convient dès lors de choisir un autre critère de regroupement ou de donner plus d'importance à tel ou tel autre critère dans certaines classes. De cette façon, il est possible d'aboutir à un regroupement ayant géographiquement un certain sens.

A cause de leur position ou de leur comportement très local, les 20 stations du réseau RAMA mesurant l'ozone à Mexico n'ont pas pu être toutes réunies dans des classes. Les stations très à l'ouest (*Cuajimalpa*) et à l'extrême est de Mexico (*Chapingo*), qui ne sont au voisinage d'aucune autre station, n'ont pas été classées pour éviter une multiplication exagérée des groupes.

De plus, le 14 février échappe à tout regroupement simple en raison de l'aspect changeant des vents durant l'après-midi. La situation de ce jour-là est discutée au paragraphe 3.2.1.

Les 15 et 16 février sont très proches quant à l'orientation des vents et aux taux d'ozone. C'est pourquoi la classification donne les mêmes résultats. Les courbes ayant conduit à l'obtention de ces classes sont disponibles dans l'annexe 8.2. Les figures ci-dessous montrent le résultat de cette étude pour les 15 et 16 février.

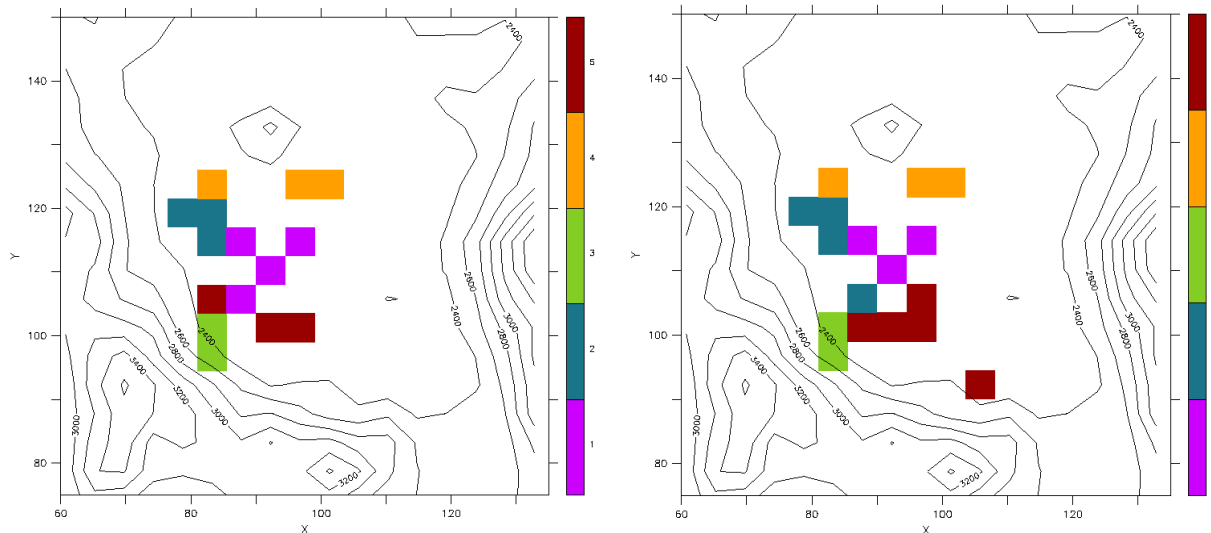


Figure 2 : Regroupement des stations RAMA mesurant l'ozone le 15 février 2002 (à gauche) et le 16 février (à droite). Les nombres associés aux couleurs permettent l'identification des classes par rapport à l'annexe 8.2.

Le 15 février, 15 stations sur un total de 20 mesurant l'ozone ont pu être regroupées en 5 classes bien distinctes. Le lendemain (16 février), 17 stations sur 20 ont été réunies en 5 classes, la 5^{ème} étant divisée en deux sous-classes. Pour une discussion plus détaillée, voir l'annexe 8.2.

Quatre grandes régions peuvent être identifiées en se basant sur les taux d'ozone. Le sud-ouest (en vert) présente les taux les plus importants (près de 250 ppb pour le 15 février). Le nord (en orange) présente quant à lui les concentrations les plus faibles avec env. 100 ppb pour le 15 février. L'ouest (en turquoise) et le sud (en brun) présentent des taux proches des valeurs du nord de la ville (env. 130 ppb le 15 février). Enfin, le centre ville (en rose) montre des concentrations à nouveau plus importantes, voisines de 170 ppb le 15 février.

On observe donc une structure en "sandwich" où les pics d'ozone les plus importants au sol, au sud-ouest et au centre ville, sont séparés géographiquement par une zone de faible concentration, au sud et à l'ouest.

3.2 Construction d'un scénario

Une fois que le regroupement des stations est réalisé, il est possible de s'y référer pour la construction d'un scénario.

3.2.1 14 février

Le 14 février, les vents varient de façon importante durant la journée. Ceci est visible sur les figures ci-dessous montrant la situation des vents et des concentrations d'ozone à divers moments de la journée.

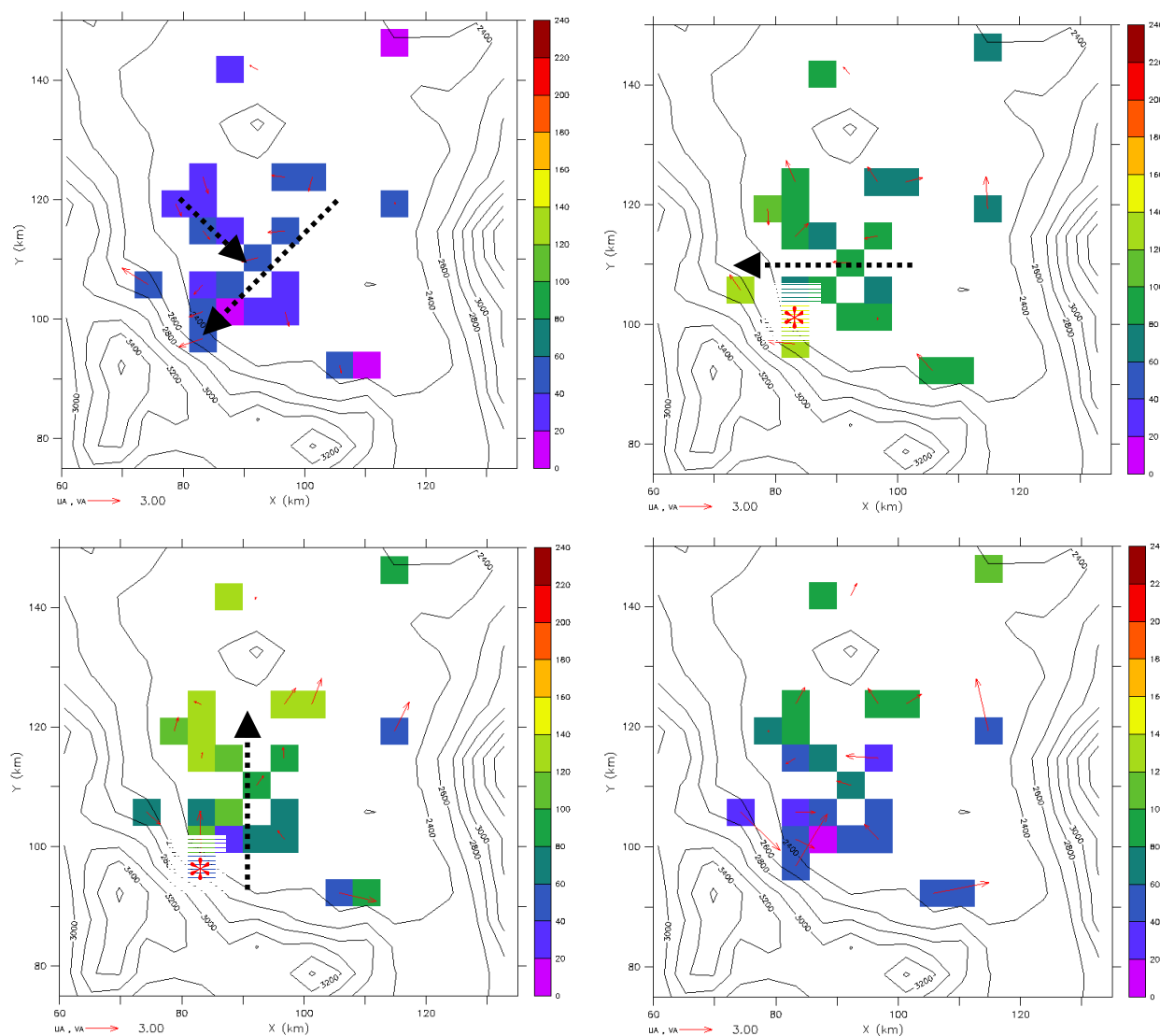


Figure 3 : Ozone et vents mesurés par le réseau RAMA (au sol) le 14 février, à 11h (en haut à gauche), 13h (à droite), à 15h (en bas à gauche) et à 17h (à droite).

A 11h, les vents sont orientés de nord-est et poussent les précurseurs de l'ozone en direction du sud-ouest. Dans la région du nord-ouest, les vents sont orientés nord à nord-ouest et accentuent encore ce déplacement de polluants primaires vers le sud de la ville. A 13h, le panache d'ozone atteint les stations du sud-ouest avec le taux d'ozone le plus important de la journée (voir l'étoile rouge). A cette heure-ci, les vents ont tendance à s'inverser en soufflant progressivement vers l'ouest. A 15h, les vents remontant les pentes du sud, sur le versant opposé de la ville, commencent probablement à passer par-dessus le sommet de la montagne et à inverser les vents au centre-ville, en raison de l'asymétrie du profil montagneux (le versant sud étant plus bas en altitude que le versant nord). Une des stations du sud-ouest montre par exemple, à cette heure-ci, une orientation de vent plein nord coïncidant avec cette hypothèse (voir l'étoile rouge). Sur le plan de l'ozone, on observe le déplacement progressif du panache du sud-ouest (à 13h) vers le nord-ouest (à 15h). A 17h, le panache est au nord de la ville et les vents commencent à redescendre peu à peu les pentes en raison de la *thermique*.

L'existence d'un seul panache, responsable à 15h des pics mesurés au nord-ouest et au nord-est, est assez peu probable. Un déplacement aussi important de la pollution dans un laps de temps aussi court semble en effet peu crédible. Un scénario faisant intervenir deux panaches distincts est plus vraisemblable. D'une part, le panache principal situé au sud-ouest à 13h, originaire des émissions du centre ville et migrant vers le nord-ouest à 15h sous l'effet du changement d'orientation des vents. D'autre part, un panache secondaire sur le centre ville à 13h, provenant des émissions des zones industrielles du nord-est et évoluant à nouveau vers le nord-est en raison des vents orientés nord dès 15h. A cette heure-ci, les stations du nord détectent donc probablement deux panaches d'origine différente mais évoluant côte à côte en direction du nord.

3.2.2 15 et 16 février

Comme les 15 et 16 février sont presque identiques, la description du 15 février, jour de l'épisode de pollution proprement dit, suffit à comprendre les 2 jours. Les figures suivantes présentent les mesures au sol à deux heures différentes de la journée.

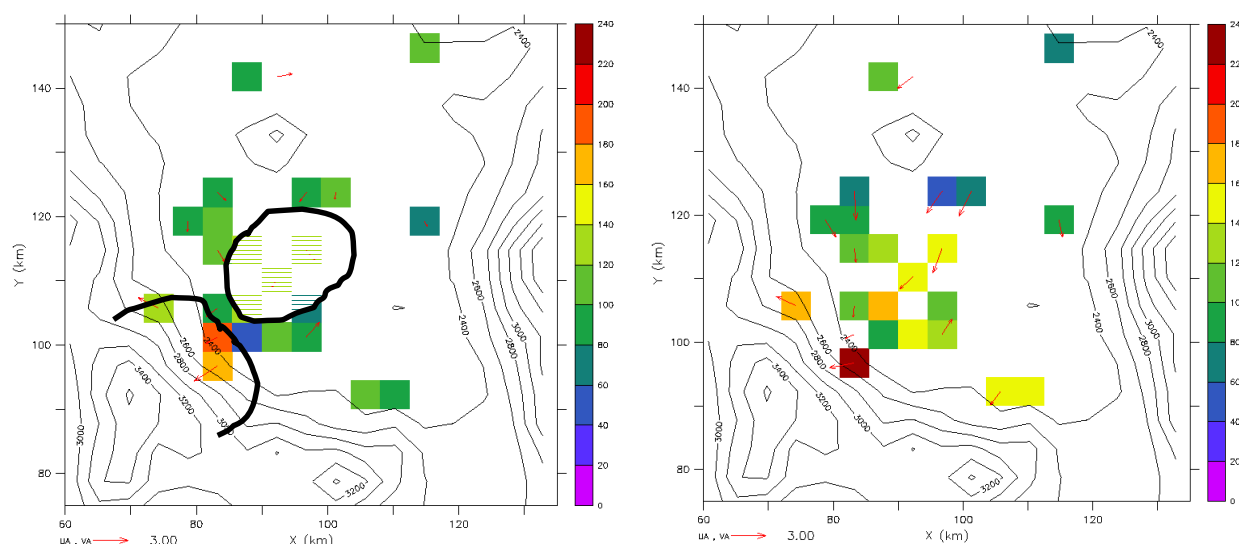


Figure 4 : Ozone et vents mesurés par le réseau RAMA le 15 février, à 13h (à gauche) et à 15h (à droite)

A 11h (non décrit ici), la situation des vents est identique à celle du 14 février à la même heure, avec des vents soufflant vers le sud-ouest, à l'exception des stations du nord-ouest où les vents sont de nord à nord-ouest. Cette situation météorologique va se poursuivre durant toute l'après-midi les 15 et 16 février. Ceci a comme conséquence de pousser le panache d'ozone sur le sud-ouest, où un maximum d'env. 240 ppb est mesuré le 15 février à 15h. C'est le moment culminant de l'épisode de pollution. A 17h (non montré ici), toutes les stations de mesure enregistrent des taux d'ozone en baisse, sauf les stations du sud-ouest, indiquant que le panache d'ozone reste fixé sur les montagnes du sud-ouest de la ville durant la fin de la journée, voire peut-être même durant la nuit. On observe cette structure en "sandwich" décrite précédemment. Les stations du centre ville sont nettement distinctes des stations du nord, de l'ouest et du sud. Comme le montre les courbes traitillées noires à 13h, le panache d'ozone au sud-ouest (240 ppb le 15 février) est séparé géographiquement des stations du centre ville qui mesurent des taux proches de 170 ppb. Une hypothèse plausible est un déplacement en altitude des masses d'air contenant les précurseurs de l'ozone durant le tout début de l'après-midi, sous l'impulsion des vents remontant les pentes au sud-ouest. Puis, ces masses d'air redescendent au centre ville et augmentent la quantité d'ozone déjà présente au sol.

4 Simulation de la météorologie avec le modèle FVM

Avant de décrire le développement des vents sur la grille de simulation et de le comparer aux scénarii proposés dans le paragraphe 3.2, différents paramètres d'entrée influençant le modèle ont été changés afin de définir leur importance et d'améliorer les résultats des simulations.

4.1 Données NCEP/NCAR Reanalysis comme données d'entrée

Une partie des données d'entrée (vents et température) du modèle FVM sont les résultats du modèle à grande échelle de NCEP/NCAR Reanalysis (ci-après NCEP). Comme les données à grande échelle sont disponibles seulement toutes les 6 heures et pour des positions très éloignées les unes des autres (2.5° de latitude et de longitude), celles-ci sont interpolées toutes les heures dans la grille utilisée par le modèle FVM. Le détail de cette procédure est décrit dans [1] et [2].

En haute altitude, le modèle NCEP fournit des informations à grande échelle qui sont représentatives de la réalité. La température en basse et haute altitude présente cependant un biais important qui sera discuté dans le paragraphe 4.2.

En haute altitude, les vents ne changent pas durant la période du 14 au 16 février. Le vent géostrophique (à grande échelle) est un vent d'ouest, parfois orienté sud-ouest (le 14 février de 7h à 16h) ou alors nord-ouest (le 15 février de 15h à minuit). Au niveau du sol, cependant, les vents de NCEP varient un peu durant la période simulée, mais correspondent à une orientation généralement nord. Un vent "tournoyant" et très faible sur certaines parties du domaine est parfois observé comme par exemple le 14 février à 17h, voir figure ci-dessous.

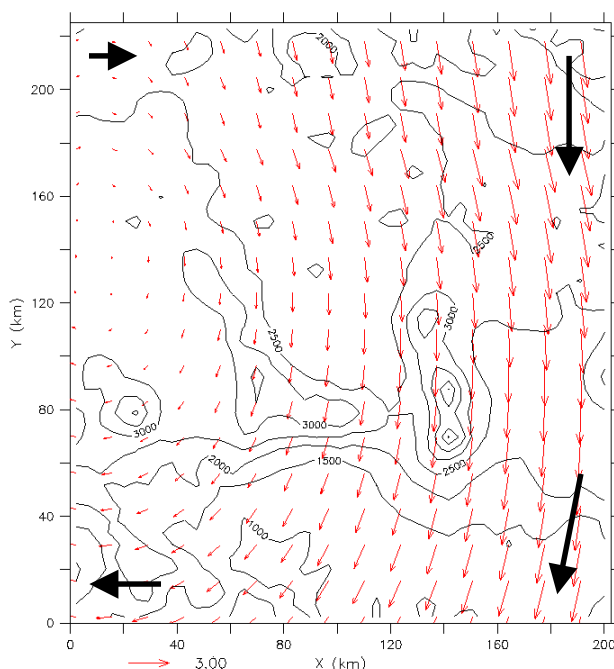


Figure 5 : Orientation au sol des vents du modèle NCEP le 14 février à 17h, après interpolation toutes les heures sur la grille utilisée par FVM et TAPOM. Les flèches noires correspondent aux vents NCEP utilisés pour l'interpolation.

Cette situation est créée lors de l'interpolation lorsque les vents NCEP à 2.5° de distance (en latitude et en longitude) sont de direction différente ou de vitesse très faible. Sur la figure ci-dessus, la zone avec des vents faibles à l'ouest du domaine est un exemple de cet effet. L'interpolation génère une continuité entre le vent d'est au sud-ouest du domaine et celui dirigé vers l'est au nord-ouest. Le tournoiement des vents provient de la continuité créée entre le vent d'est situé au sud-ouest et celui de direction sud-ouest au sud-est. Ce tournoiement des vents est assez probable dans la réalité.

4.2 Qualité des données d'entrée

Lorsque les données NCEP sont comparées aux mesures, on observe un biais d'au moins 6 degrés (le modèle NCEP étant trop chaud) dans les températures en basse altitude, comme le montre la figure ci-dessous (à gauche). Cette figure montre également que les amplitudes des températures entre le jour et la nuit fournies par le modèle NCEP sont trop faibles.

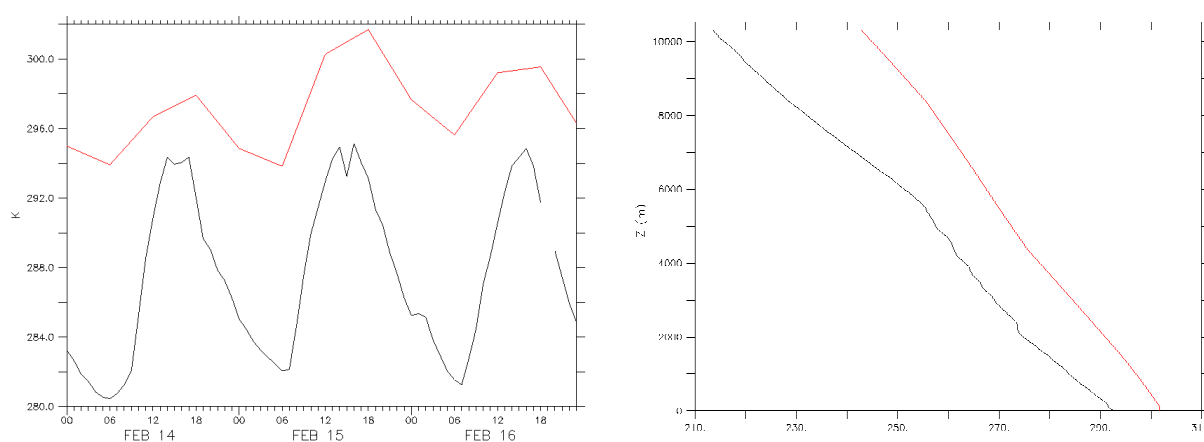


Figure 6 : A gauche, comparaison des températures au sol entre les données NCEP (en rouge) et les mesures RAMA (en noir) à Pedregal (sud-ouest). A droite, comparaison des températures en l'altitude entre les données NCEP (en rouge) et les mesures de UNAM à Cuautitlán (nord-ouest) le 15 février à 18h.

La figure de droite indique quant à elle que le biais dans les températures augmente avec l'altitude. Par comparaison avec les mesures de UNAM, le biais est d'env. 10 degrés au sol et atteint près de 25 degrés aux alentours de 10'000 mètres.

La comparaison de la vitesse des vents, entre les mesures et les données NCEP, est difficile car un modèle à grande échelle tel que NCEP n'est jamais à même de décrire le comportement très local des vents en basse altitude. Ce modèle est utilisé essentiellement pour décrire le comportement géostrophique des vents (comportement global des vents à très haute altitude). Ceci est illustré dans les figures suivantes.

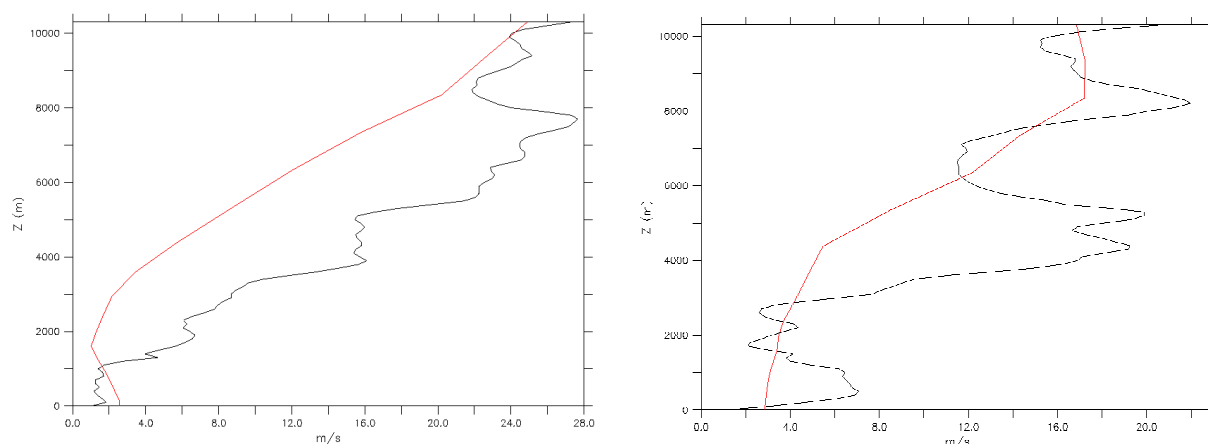


Figure 7 : Comparaison de la vitesse des vents en altitude entre les mesures de UNAM (en noir) et les données NCEP (en rouge) à Cuautitlán (nord-ouest) le 15 février à 6h du matin (à gauche) et à 18h (à droite).

A 6h (figure de gauche), la vitesse des vents mesurée par UNAM est bien supérieure à la vitesse des vents calculée par NCEP. Vers 8'000 mètres d'altitude cependant, les deux courbes se rejoignent, car les conditions se rapprochent d'un comportement purement géostrophique, correctement décrit par un modèle à grande échelle tel que NCEP.

A 18h (figure de droite), les mesures et les résultats du modèle sont assez proches. Ces deux figures montrent à quel point il est difficile de porter un jugement sur la qualité des vents selon le modèle NCEP. Alors qu'à 6h le 15 février, ces données présentent un biais évident de 1'700 à 8'000 mètres, à 18h le même jour, ces mêmes données sont assez proches des mesures si l'on excepte les fluctuations.

4.3 Traitements des données NCEP

Si les données NCEP sont utilisées telles quelles comme données d'entrée, le biais de 6 degrés dans la température et l'erreur dans la vitesse des vents dans les basses couches peuvent introduire une erreur significative dans les données de sortie de FVM. Il est donc important de corriger ces données d'entrée.

Quelques exemples de traitement des données NCEP sont présentés dans les paragraphes suivants.

4.3.1 Correction par valeur constante

La méthode de la soustraction d'une valeur constante avec l'altitude et avec le temps pour une variable donnée (dans notre cas, la température ou la vitesse des vents) améliore considérablement les résultats, compte tenu de sa simplicité. Dans le cas de la période du 14 au 16 février, de bons résultats sont obtenus après FVM, avec une soustraction de 6 degrés dans la température des données d'entrée (abrégié NCEP-6°), comme le montre la figure ci-dessous.

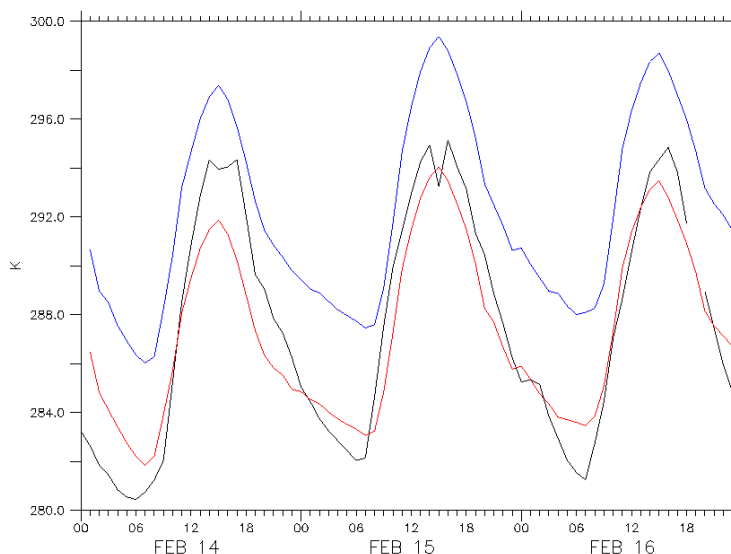


Figure 8 : Comparaison de la température au sol à Pedregal (sud-ouest) entre une simulation FVM avec des données d'entrée NCEP non modifiées (en bleu), une autre avec des données d'entrées NCEP-6° (en rouge) et les mesures RAMA au sol (en noir).

La journée, les simulations avec NCEP-6° sont trop froides par rapport aux mesures et le comportement inverse est observé durant la nuit. La taille de la surface urbaine utilisée par le module de sol de FVM influence la température au centre ville durant la nuit. Ceci sera discuté dans le paragraphe 4.4. La modification de la vitesse des vents est quant à elle discutable, au vu de ce qui a été dit précédemment dans le paragraphe 4.2. Cette procédure a néanmoins été tentée mais les résultats, qui ne sont pas présentés dans ce travail, s'éloignent très fortement des mesures.

4.3.2 Profil de température expérimental comme donnée d'entrée

Une autre méthode très simple est d'utiliser directement les mesures comme données d'entrée, que ce soit pour la température ou pour la vitesse des vents. Les figures ci-dessous comparent la réponse du modèle FVM à une entrée NCEP-6° avec celle d'une entrée utilisant un profil de température mesuré selon l'altitude (à Cuautitlán, extrapolé aux autres points de la grille et modifié toutes les 12h, à 6h et à 18h), les vents de NCEP n'ayant pas été modifiés.

Il faut donc bien réaliser dans la figure 9 (à gauche) que la courbe noire correspond à une donnée d'entrée et que la courbe bleue est la réponse de FVM.

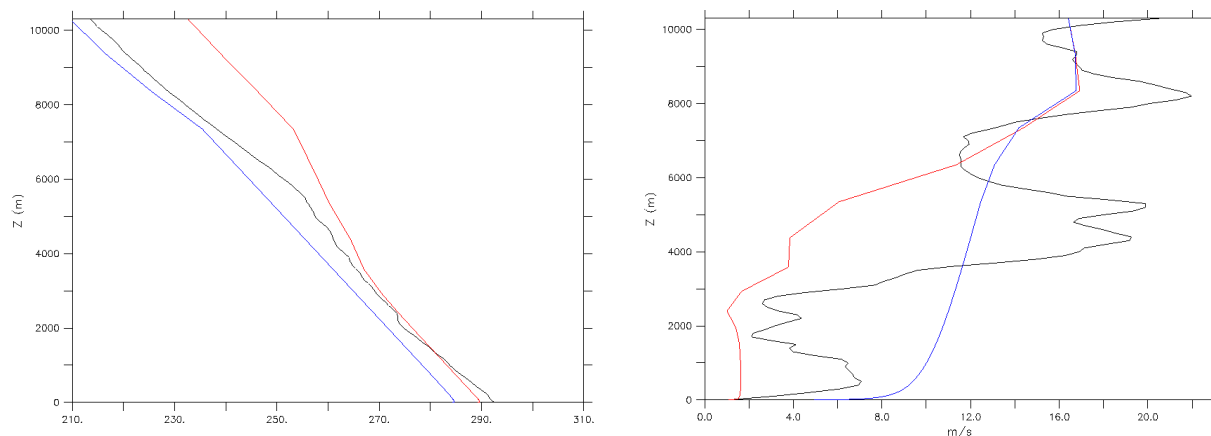


Figure 9 : Comparaison (en fonction de l'altitude) de la température (à gauche) et de la vitesse des vents (à droite) entre une simulation avec des profils de température expérimentaux comme données d'entrée (en bleu), une simulation avec NCEP-6° (en rouge) et les mesures de UNAM (en noir) à Cuautitlán (nord-ouest) le 15 février à 18h.

Sans traitement, le profil de température en basse altitude est meilleur car il suit mieux les mesures. En haute altitude, la situation s'inverse et ce sont les données d'entrée traitées qui sont les meilleures. Quant à la vitesse des vents, l'utilisation d'un profil de température mesuré comme donnée d'entrée n'est pas très bon, comparé aux données d'entrée NCEP-6°. Du point de vue du modèle météorologique FVM, le choix de l'application ou non d'un traitement sur les données d'entrée se discute. Néanmoins, comme un des buts finaux de ce travail est la description de la qualité de l'air et que celle-ci n'est influencée que par les basses couches de l'atmosphère (depuis le niveau du sol jusqu'à env. 4'000 mètres), et compte tenu du fait que le modèle chimique TAPOM n'utilise les résultats de FVM que jusqu'à env. 7'000 mètres, l'utilisation des données NCEP-6° est à privilégier. De plus, les simulations FVM avec NCEP-6° donnent de meilleurs résultats une fois introduites dans le modèle chimique TAPOM.

Puis, diverses simulations ont été effectuées. L'une, avec l'utilisation d'un profil de vitesse de vents mesuré selon l'altitude (à Cuautitlán, extrapolé aux autres points de la grille et modifié toutes les 12h, à 6h et à 18h) sans que la température n'ait été changée. Une autre, avec à la fois, un profil de température et un profil de vitesse de vents, mesurés selon l'altitude. Dans un souci de concision aucun résultat ne sera exposé ici. Néanmoins, il est intéressant de savoir que ces simulations ont montré de très mauvaises concordances avec les mesures, que ce soit au point de vue de la température, de la vitesse des vents ou du panache d'ozone simulé par TAPOM. Ceci s'explique par le fait qu'un profil de vent est très influencé par le comportement local de la station de mesure, surtout dans les basses couches de l'atmosphère.

4.3.3 Correction par valeur non constante

Une variante de cette méthode consiste à changer la valeur de correction entre le jour et la nuit et en fonction de l'altitude. Cette méthode est appliquée à la température, comme exposé ci-dessous.

Jour : Température – α (altitude)

Nuit : Température – β (altitude)

Dans la verticale, le plus simple est la séparation selon trois paliers et la soustraction de valeurs différentes sur chaque palier, comme montré ci-dessous.

Niveau dans FVM	Altitude correspondante [m] (par rapport au sol)	Calcul le jour	Calcul la nuit
1 à 20	0 à 1'604	Temp – a	Temp – x
21 à 26	1'604 à 5'347	Temp – b	Temp – y
27 à 32	5'347 à 10'347	Temp – c	Temp – z
Avec, en général : $a < x < b < y < c < z$			

Tableau 4 : Application à la température de la correction par valeur non constante.

La figure ci-dessous présente un exemple de données d'entrée introduites dans le modèle FVM par cette méthode de calcul et montre également le résultat après simulation.

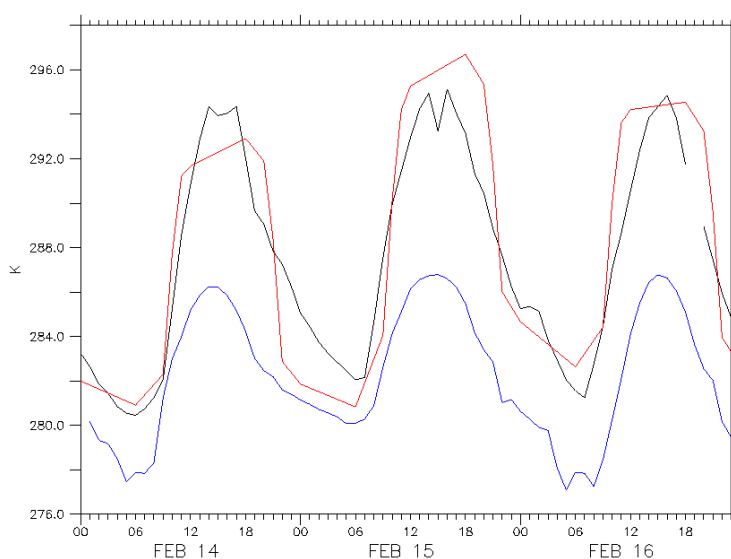


Figure 10 : Comparaison de la température au sol à Pedregal entre une donnée d'entrée traitée avec la méthode de la correction par valeur non constante (en rouge; calcul avec aube, jour, crépuscule et nuit) et la réponse de FVM pour cette même entrée (en bleu). Mesures RAMA en noir. A comparer avec la figure 8.

Cinq données d'entrée correspondant à cinq traitements différents ont été utilisées pour tenter d'améliorer les résultats du modèle FVM, en modifiant les valeurs attribuées aux variables a,b,c et x,y,z. Toutes ces tentatives n'ont fait que diminuer la concordance des simulations avec les mesures à disposition (au sol et en altitude). Cette méthode donne de moins bons résultats qu'avec NCEP-6°. De plus, les résultats dans le modèle chimique TAPOM sont nettement moins bons avec ce traitement.

4.3.4 Vers une méthode plus générale

Le meilleur des traitements à appliquer sur ces données est donc une simple soustraction de 6 degrés dans la température fournie par le modèle NCEP. Une procédure plus générale devrait être mise en place de façon à pouvoir corriger la température d'entrée, en haute altitude sans affecter celle au sol après FVM et au niveau du sol sans altérer celle en haute altitude. Cette interaction entre le niveau du sol et les hautes altitudes était malheureusement observée dans les deux méthodes décrites précédemment.

4.4 Extension de la surface urbaine de FVM

Le module de paramétrisation de la ville ou module de sol développé par le Dr. Martilli [3] utilise des catégories différentes pour décrire le comportement réel du sol (*landuse* en anglais) d'une région étudiée. Dans le cas de ce travail, seules deux catégories ont été employées, l'une pour le milieu rural et l'autre pour le milieu urbain. Ceci afin de tenir compte des particularités d'une ville quant à sa température et à son inertie dans ce domaine, ainsi qu'à sa turbulence et à ses vents influencés par des phénomènes de canyon créés par les rues.

Or, le *landuse* utilisé jusqu'à présent représentait mal la taille réelle de la ville de Mexico. En se basant sur une carte trouvée sur Internet et décrivant la région de MCMA, le fichier de *landuse* a été modifié en augmentant la surface des cellules décrites par un comportement urbain. La figure ci-dessous montre la différence de taille de la ville avant et après "retouche".

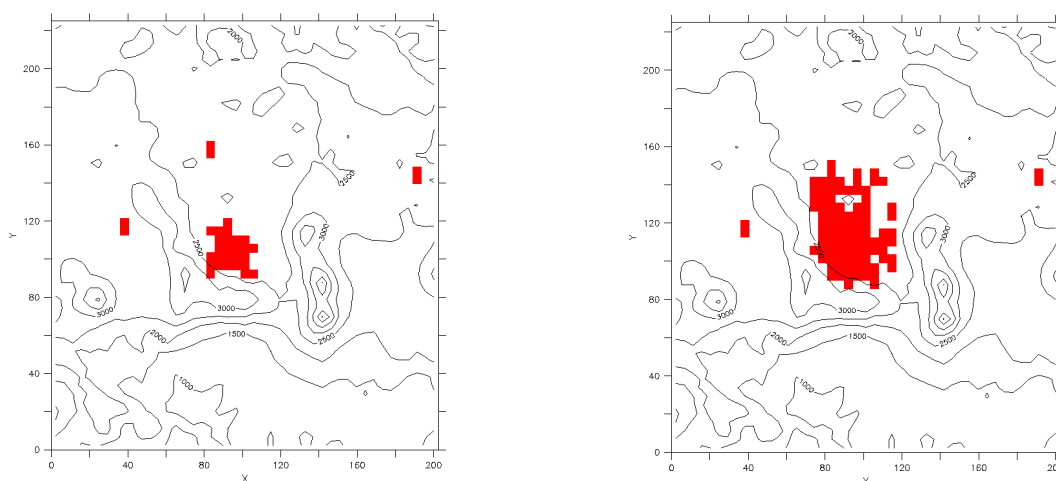


Figure 11 : *Landuse* avant retouche (à gauche), *landuse* après retouche (à droite). En rouge, les cellules à comportement urbain. En blanc, celles à comportement rural.

La figure ci-dessous compare la température simulée sur le domaine étudié avec le petit et le grand *landuse*. La simulation avec le grand *landuse* montre une tache chaude ou îlot de chaleur durant la nuit sur la ville, plus vraisemblable que la simulation avec le petit *landuse*, où l'élévation de la température due à la présence de la ville, n'est pas très marquée.

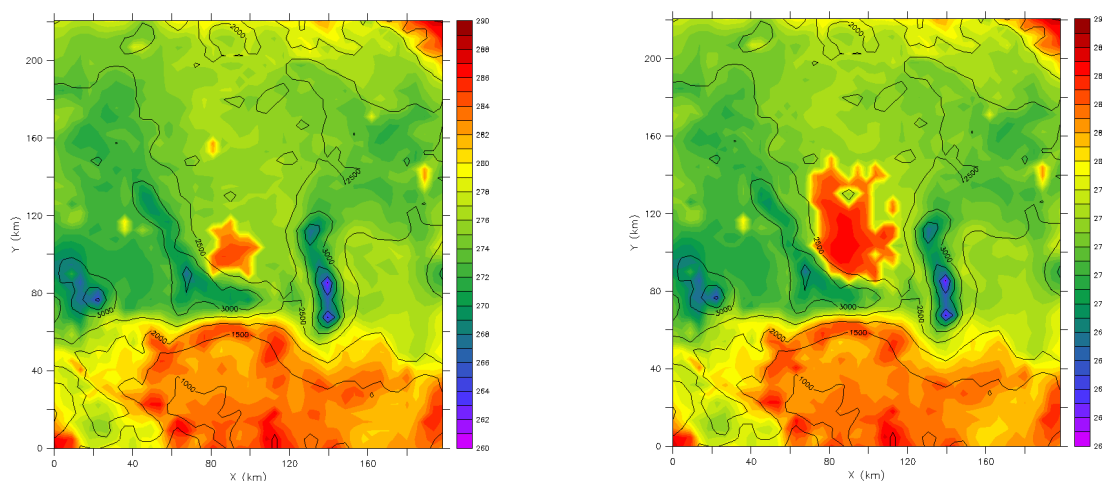


Figure 12 : Température simulée sur tout le domaine à 4h du matin, avec un petit *landuse* (à gauche) et un *landuse* étendu (à droite)

La zone chaude au sud du domaine n'est pas due à la ville mais au fait que cette région se trouve à une altitude plus basse que le reste du domaine. Mexico se trouve à une altitude d'env. 2'500 mètres alors que le sud du domaine est en dessous de 1'500 mètres.

Contrairement à la température, la différence des vents, au centre ville et au niveau du sol, ainsi que la différence dans l'humidité de l'air des régions extérieures ou périphériques à la ville n'est pas très importante en passant du petit au grand *landuse*. L'effet sur l'humidité de l'air au centre ville est par contre très marqué, l'extension de la zone urbaine provoquant une baisse moyenne de 40% de l'humidité relative.

Le passage du petit au grand *landuse* apporte des améliorations, notamment au niveau de la température au sol, comme le montrent les figures suivantes.

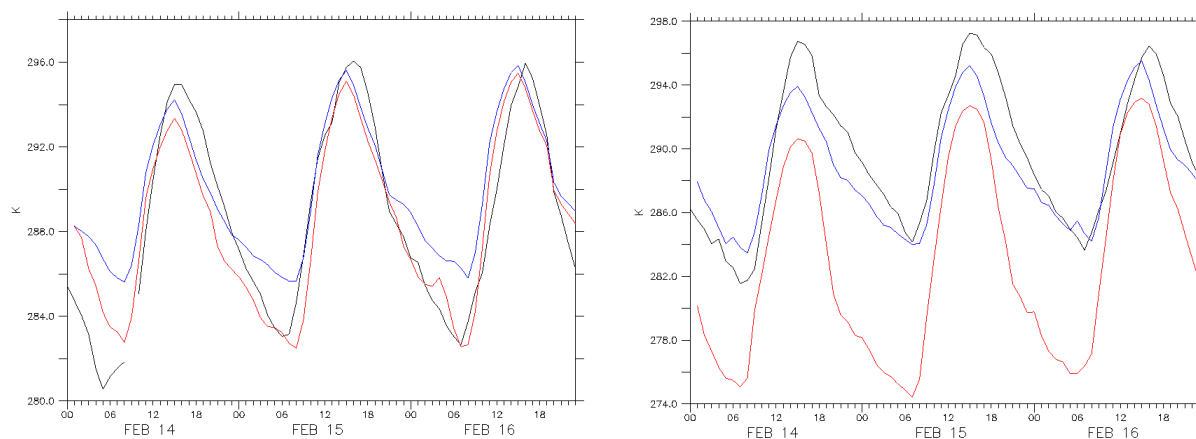


Figure 13 : Comparaison de la température simulée au sol entre un petit *landuse* (en rouge) et un grand *landuse* (en bleu) à Merced (centre ville) à gauche et à Tláhuac (sud), à droite. En noir, les mesures RAMA.

La figure de gauche montre le cas d'une station du centre ville déjà décrite comme surface urbaine et restant urbaine dans le nouveau *landuse*. On observe que la simulation avec le grand *landuse* est un peu moins bonne car l'échauffement nocturne, dû à l'augmentation de la taille de la ville, est un peu trop fort. La journée par contre, il y a peu de différences entre les deux *landuses*.

La figure de droite présente un exemple de station périphérique décrite précédemment comme surface rurale et désormais située sur une surface urbaine dans le nouveau *landuse*. Les simulations avec le grand *landuse* montrent dans ce cas une amélioration flagrante.

Une manière de mieux décrire l'effet de la ville serait d'introduire des classes intermédiaires entre le statut purement urbain et celui purement rural. Ou alors d'introduire un pourcentage d'urbanisation dans chaque cellule sur le modèle du *landuse* utilisé par TAPOM qui, lui, prend en compte des pourcentages de différents recouvrements du sol (classes de *landuse*) pour le calcul de la déposition sèche. Selon le Dr. B. de Foy, le réseau RAMA mettra l'année prochaine à disposition des photos de chaque station de mesure prises dans quatre directions différentes, de façon à faciliter la décision quant au statut urbain ou rural de ces stations. Enfin, pour corriger les problèmes d'humidité de l'air, trop faible en milieu urbain, il devrait être possible de spécifier une humidité pour la ville afin de tenir compte des espaces verts et des parcs au centre de Mexico.

4.5 Effet de l'orientation des rues

L'effet de l'orientation des rues, paramètre ajustable du module de paramétrisation du sol, a également été étudié. Une orientation, avec des croisements de rues perpendiculaires, a été choisie comme donnée d'entrée de ce module, ce qui est en général le cas dans les villes du continent américain. Jusqu'à présent, dans les travaux réalisés sur le cas de Mexico ([1] et [2]), l'orientation des rues était de 45° et 135° par rapport au nord, ce qui correspond à des rues s'étirant du nord-est vers le sud-ouest et du nord-ouest vers le sud-est. Une simulation a été réalisée avec une orientation 0° et 90° par rapport au nord (plus vraisemblable), correspondant à des rues construites du nord au sud et d'est en ouest. Il est évident que le changement de ce paramètre n'influence que la turbulence et l'orientation des vents. Cependant, ce paramètre n'a aucune influence sur le développement des vents au centre-ville de Mexico.

4.6 Comparaison entre la simulation et les mesures

Ce chapitre s'intéresse à la comparaison entre les mesures et la meilleure simulation obtenue, c'est-à-dire celle utilisant les données du modèle NCEP avec une soustraction de 6 degrés dans les températures, des vitesses de vents non modifiées et une surface urbaine étendue (grand *landuse*). La comparaison est faite sur les grandeurs suivantes :

- radiation solaire (totale)
- température au sol et en altitude
- humidité (relative)
- vitesse des vents en altitude
- hauteur de la couche de mélange

L'orientation des vents en basse altitude, paramètre important du transport des polluants, sera discutée séparément au chapitre 4.7.

La radiation solaire (totale) simulée correspond à peu près aux valeurs mesurées, comme le montre par exemple les mesures prises par le Service Météorologique National (SMN) au centre-ville (TEZO dans le système d'abréviation du SMN, analogue à la station *Merced* dans le réseau RAMA).

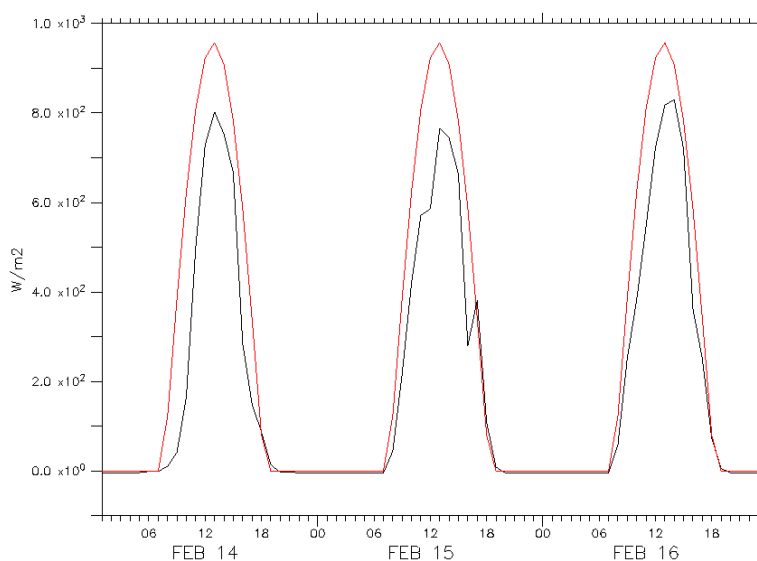


Figure 14 : Comparaison de la radiation solaire totale en W/m^2 entre la simulation (en rouge) et les mesures du SMN (en noir) au centre-ville (TEZO ou *Merced*).

Selon cette figure, le modèle FVM surestime d'environ 150 W/m^2 les maxima de radiation solaire, au moins durant la période étudiée (du 14 au 16 février).

La température au sol est bien simulée et se situe au pire à deux degrés des mesures durant la journée. Certaines stations, comme *Pedregal* (figure ci-dessous à gauche), présentent néanmoins une température trop élevée durant la nuit d'env. quatre degrés. Cet effet est dû au *landuse* étendu, comme discuté au paragraphe 4.4. Ces bons résultats sont encore renforcés par l'excellente concordance de certaines stations extérieures, comme *Cuajimalpa* (figure ci-dessous à droite) à l'ouest et Tláhuac au sud (voir figure 13 à droite). Le comportement de ces stations n'avait pas été correctement simulé jusqu'à présent, en raison du *landuse* trop restreint.

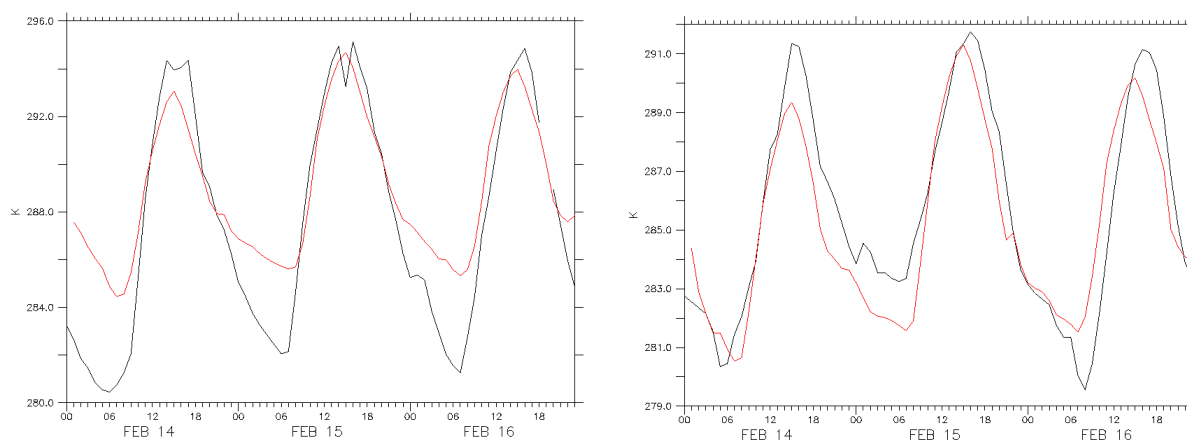


Figure 15 : Comparaison entre la température simulée au sol (en rouge) et les mesures RAMA (en noir) à *Pedregal* (sud-ouest) à gauche et à *Cuajimalpa* (ouest) à droite.

La température en altitude est très bien simulée par le modèle météorologique jusqu'à une hauteur d'env. 4'000 mètres. A partir de cette altitude, le biais dans les données d'entrée induit une erreur dans les résultats de FVM. Cette erreur ne devrait avoir que peu d'incidence sur les simulations du modèle TAPOM, car la qualité de l'air n'est influencée que par les basses couches de l'atmosphère.

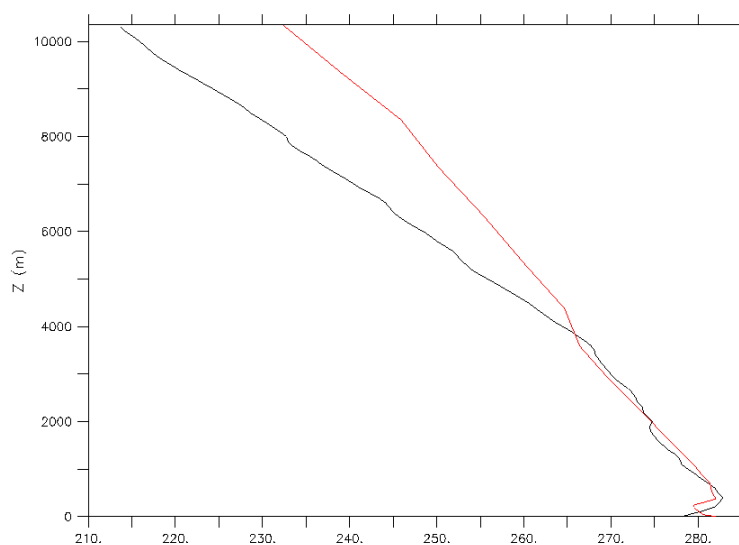


Figure 16 : Comparaison en fonction de l'altitude entre la température simulée par FVM (en rouge) et les mesures de UNAM (en noir) à *Cuautitlán*, le 15 février à 6h.

L'humidité relative est un paramètre difficile à fixer dans le modèle. L'humidité agit sur l'amplitude de la température en raison de la chaleur spécifique importante de l'eau. Plus l'humidité est importante, plus la différence de température entre jour et nuit est faible. Une humidité faible favorise les phénomènes thermiques au contact du sol, comme par exemple les vents de pente. L'augmentation de l'humidité produit l'effet inverse.

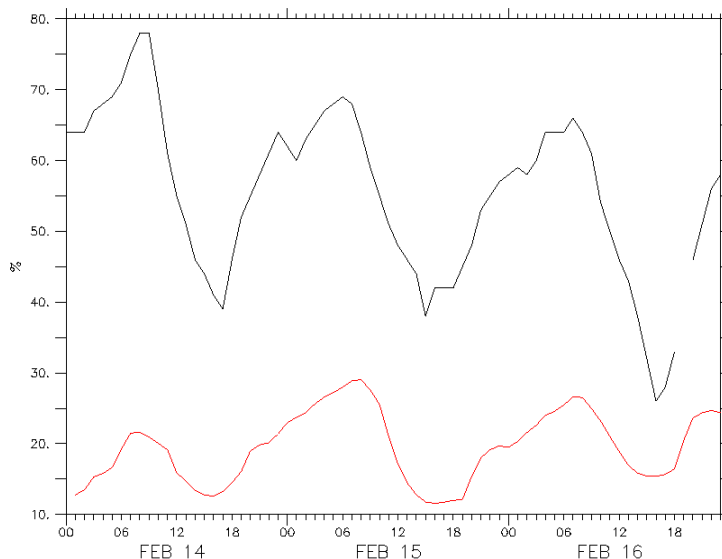


Figure 17 : Comparaison entre l'humidité relative simulée (en rouge) et les mesures RAMA (en noir) à Pedregal (sud-ouest, station urbaine dans les deux *landuses*). Humidité rurale choisie pour les simulations dans le module de paramétrisation du sol : 53%

Comme le montre la figure ci-dessus, les résultats de FVM sont bien trop secs par rapport aux mesures. Ceci provient en grande partie de l'extension du *landuse*, aucune humidité en milieu urbain ne pouvant être spécifiée.

Il est difficile d'augmenter d'avantage la valeur de l'humidité du sol dans ce module (valeur actuelle pour le milieu rural : 53%), car en augmentant l'humidité on diminue d'autant l'amplitude de la température. Or, la température est connue pour avoir un effet important sur les vents. Il est donc préférable d'être bien calé sur la température avec le modèle plutôt que d'avoir une humidité proche des mesures.

Enfin, une humidité assez basse est choisie ici car elle favorise la *thermique* et les vents de pente. Ceci permettant de se mettre d'avantage dans les conditions du 14 février où l'étude des mesures au paragraphe 3.2.1 a montré que les vents de pente avaient une importance considérable ce jour-là.

La vitesse des vents en altitude est trop faible par rapport aux mesures, dès 2'000 mètres, comme le montre la figure ci-dessous.

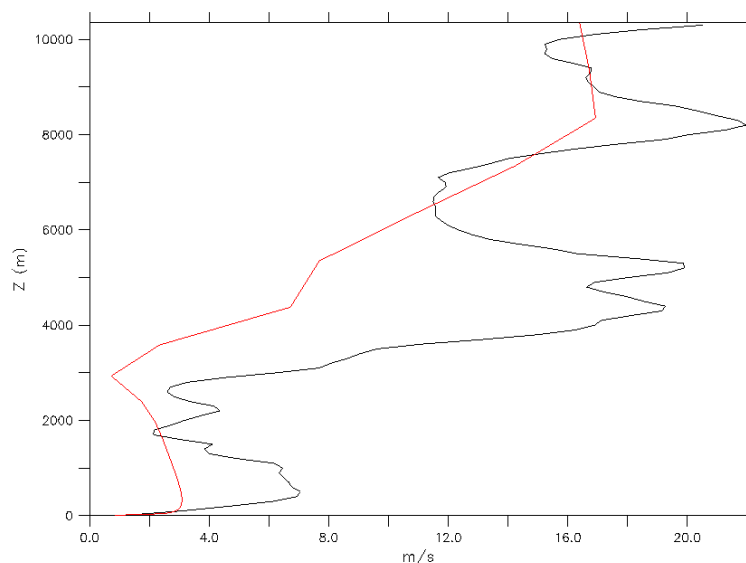


Figure 18 : Comparaison en fonction de l'altitude entre la vitesse des vents simulée (en rouge) et les mesures de UNAM (en noir) à Cuautitlán, le 15 février à 18h.

Ceci est une conséquence des données d'entrée NCEP introduites par *forcing* dans le modèle FVM. En effet, si l'on compare la figure ci-dessus avec la figure 7 à droite (données d'entrée), il est clair que le profil de vent est très semblable. Cet exemple montre que la qualité des données d'entrée influence de façon importante celle des simulations obtenues.

La hauteur de mélange est un paramètre météorologique ayant de l'importance sur les polluants puisque sa variation peut les concentrer ou les diluer à certains moments de la journée. Cette hauteur peut être estimée par l'observation d'une cassure entre une zone neutre et une zone stable dans une courbe de température potentielle en fonction de l'altitude. Pour rappel, dans ce genre de diagramme, une zone stable (les masses d'air se mélangeant peu) correspond à une pente positive, une zone neutre est assimilable à une pente infinie et une zone instable (les masses d'air se mélangeant beaucoup) est associée à une pente négative. Ainsi, la hauteur de mélange fait la différence entre les zones où les masses d'air se mélangent et celles où elles ne se mélangent pas ou peu. La figure ci-dessous compare, sous forme de courbes de température potentielle, la hauteur de mélange entre la simulation et les mesures.

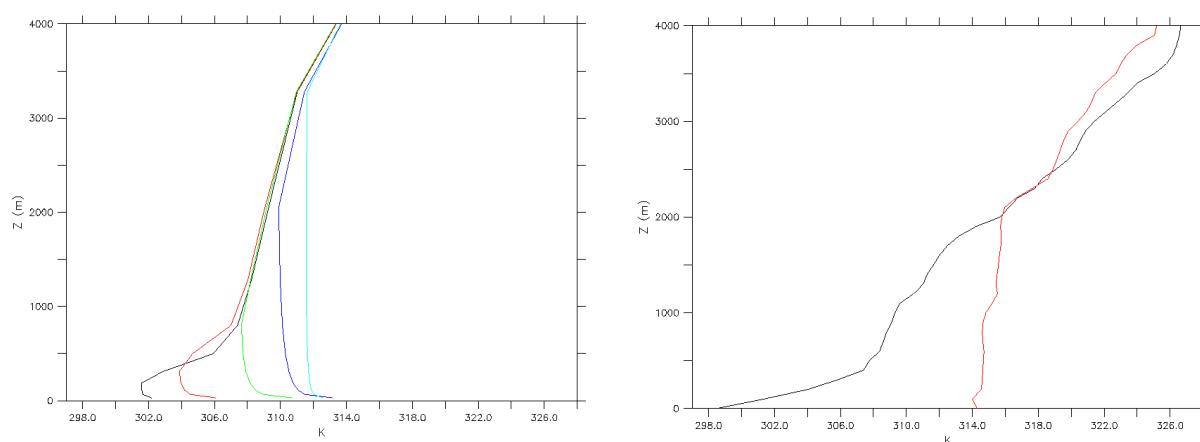


Figure 19 : Comparaison en fonction de l'altitude entre la température potentielle simulée (à gauche) et les mesures (à droite) à Cuautitlán, le 15 février. Sur la figure de gauche, simulation à 6h (en noir), 10h (en rouge), 12h (en vert), 14h (en bleu foncé) et 18h (en bleu clair). Sur la figure de droite, mesures à 6h (en noir) et à 18h (en rouge).

La figure ci-dessus montre donc que la hauteur de mélange simulée est très proche de celle qui a été mesurée à *Cuautitlán* à 6h. Cette hauteur est voisine de 500 mètres. Néanmoins, si la valeur de la hauteur de mélange est bonne, le profil de température potentielle simulée diffère un peu des mesures. A 6h, celles-ci montrent un profil stable tandis que la simulation présente pour la même hauteur un profil instable puis neutre. La différence de profil observé avec les mesures s'explique par un effet d'îlot de chaleur durant la nuit probablement un peu trop prononcé dans la simulation. Ceci est confirmé par la comparaison du profil de température potentielle entre une simulation avec un petit et un grand *landuse* (voir annexe 8.3.). La simulation avec le petit *landuse*, dont l'effet d'îlot de chaleur est moins important (voir figure 12) produit un profil de température potentielle de même forme que celui observé dans les mesures.

A partir de 6h, la hauteur de mélange s'élève progressivement et atteint son maximum à 18h. A cette heure-ci dans la simulation, la hauteur de mélange atteint 3'300 mètres. Cette hauteur peut être évaluée à env. 2'000 mètres dans les mesures. Cette divergence s'explique peut-être par la diminution avec l'altitude du nombre de cellules dans la grille de simulation. Une meilleure résolution verticale permettrait probablement d'accéder à une valeur simulée plus proche des mesures.

La forme des courbes de température potentielle simulée est cependant proche de celle des mesures. Cette bonne concordance provient certainement du fait que l'augmentation de surface de la région urbaine dans le module de sol affecte moins la température au centre ville durant le jour que durant la nuit, les profils de température potentielle étant presque identiques entre une simulation avec un petit et un grand *landuse*.

Dans les paragraphes suivants, le développement des vents simulés est discuté et comparé aux mesures au sol pour la période du 14 au 16 février.

4.7 Développement des vents simulés par FVM

Le but de ce chapitre est de vérifier si FVM simule correctement le développement des vents au sol les 14, 15 et 16 février, les scénarii développés au paragraphe 3.2 servant de référence.

4.7.1 14 février

Il faut signaler que le 14 février était utilisé dans ce travail comme journée d'initialisation des 15 et 16 février. Ce jour n'ayant pas subi d'initialisation propre, l'obtention de bons résultats météorologiques et chimiques n'est donc à priori pas attendue. Les résultats du 14 février seront néanmoins discutés comme ceux des autres jours simulés.

Les figures suivantes¹² présentent le développement des vents au sol le 14 février à 11h et à 15h et montrent ce que les stations du réseau RAMA ont mesuré au sol ce jour-là.

¹² Les figures présentées dans le chapitre 4.7 correspondent à une partie seulement du domaine de simulation, montrant la *Valle de México*.

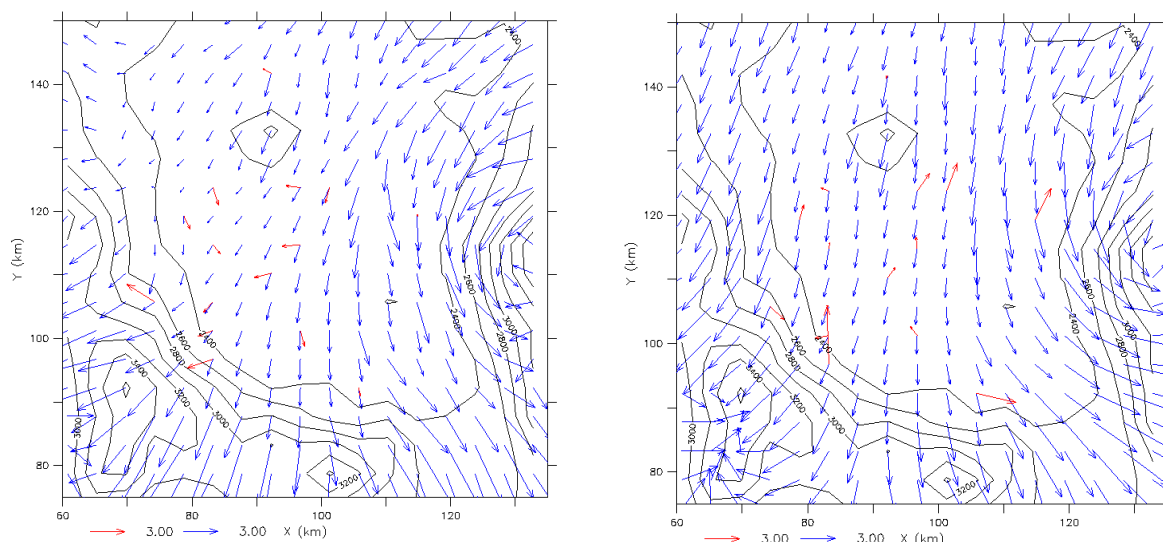


Figure 20 : Développement des vents simulés par FVM (en bleu) le 14 février, à 11h (à gauche) et 15h (à droite). Mesures RAMA en rouge.

Ces deux figures montrent que la situation simulée reste inchangée toute l'après-midi, alors que le scénario proposé à l'aide des mesures montrait que le vent tournait durant l'après-midi, passant d'un vent provenant du nord à un vent venant du sud. Les vents simulés au centre ville sont trop faibles et leur direction au nord-ouest de la ville n'est pas correctement décrite¹³. La vitesse des vents de pente est néanmoins assez bien simulée.

FVM ne semble donc pas en mesure de simuler correctement le développement des vents sur la ville le 14 février. Aucun effet positif n'a été constaté en diminuant l'humidité du sol (de 53% à 40%), bien que son influence importante sur l'intensité des vents de pente soit connue.

Une procédure dite de *nesting* a été mise au point pour FVM¹⁴. Cette procédure permet de répondre à l'hypothèse proposée au paragraphe 3.2.1, à savoir que l'asymétrie dans le profil montagneux provoque le développement de vents de pente de forte intensité provenant du sud. Cette intensité des vents est mal prise en compte avec la procédure classique.

Cette méthode de *nesting* consiste à faire une première simulation sur la grande grille utilisée dans ce travail et à insérer ces résultats dans une petite grille comme donnée de *forcing* pour une deuxième simulation. La petite grille possède une meilleure résolution (2.25 x 2.25 km) afin de mieux tenir compte de l'influence de la topographie tourmentée sur les vents. De plus, cette grille est centrée sur le sud de la ville, afin d'avoir une superficie suffisante pour permettre le développement correct des vents dans cette région. Ensuite, les résultats de la deuxième simulation sont réinsérés dans la grande grille, de façon à entrer dans le modèle TAPOM avec le grand domaine¹⁵.

Les deux figures ci-dessous montrent les résultats de la simulation pour le 14 février avec cette procédure de *nesting*. La situation météorologique est nettement plus complexe dans ce cas.

¹³ Ce problème sera discuté plus en détail au paragraphe 4.7.2.

¹⁴ La procédure a été réalisée par Clive Muller, doctorant au LPAS.

¹⁵ Seul le développement des vents et du panache d'ozone sera présenté avec cette nouvelle méthode.

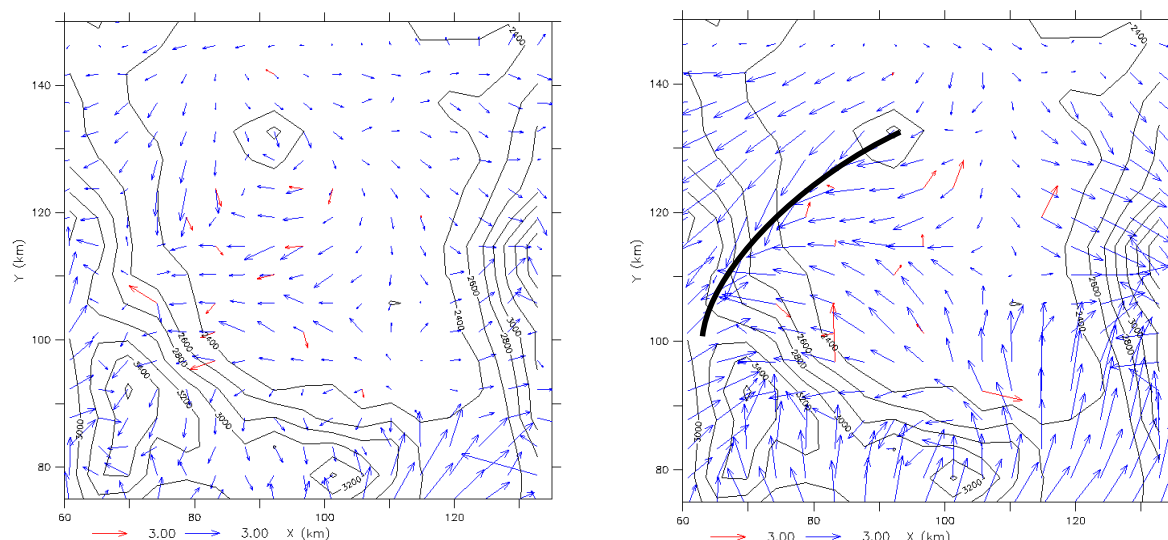


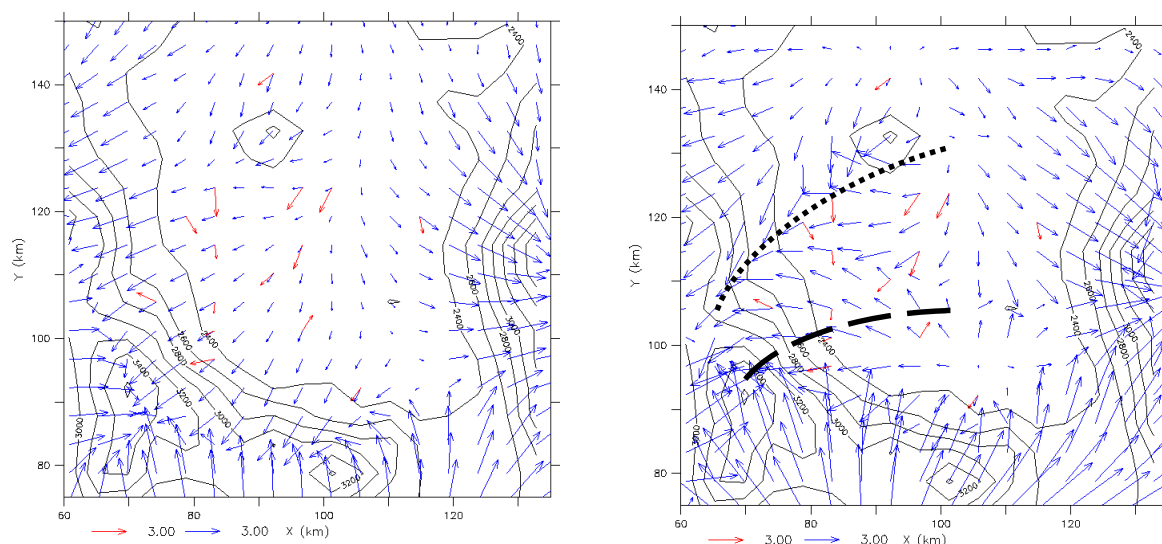
Figure 21 : Développement des vents simulés avec la procédure de *nesting* (en bleu), après réintroduction dans la grande grille, le 14 février, à 11h (à gauche) et 15h (à droite). Mesures RAMA en rouge. — : convergence simulée

Ces deux figures montrent que cette procédure de *nesting* permet une meilleure simulation du 14 février. A 11h, on observe sur la ville un vent soufflant de nord-est et sur les régions du nord-ouest de la ville, un vent nord à nord-ouest, conformément aux mesures. A cette heure, c'est le *forcing* de la grande grille qui influence la petite grille. Par contre, une zone de convergence à l'ouest de la ville semble déjà se dessiner, ce qui n'est pas le cas dans les mesures. Dans la simulation, l'influence des vents provenant du sud est donc un peu trop forte à cette heure-ci. A 15h, les vents du sud dominent complètement le centre-ville et s'engouffrent par le petit col au sud en direction du nord, soufflant jusqu'à l'ouest de Mexico. Une zone de convergence est tout à fait visible à l'ouest de la ville.

L'orientation et la norme des vents simulés est évidemment meilleure que dans la procédure classique, bien que le vent à 15h au centre ville soit dirigé vers l'ouest plutôt que vers le nord, ainsi que le montraient les mesures.

4.7.2 15 février

Les deux figures ci-dessous présentent la situation météorologique au sol du vendredi 15 février à 15h avec la procédure classique de simulation (à gauche) et la procédure de *nesting* (à droite). Une seule heure est présentée ici car, selon les mesures, la situation des vents reste inchangée durant toute la journée.



**Figure 22 : Développement des vents simulés (en bleu) le 15 février à 15h, avec la procédure normale (à gauche) et la procédure de *nesting* (à droite). Mesures RAMA en rouge.
 : convergence simulée — — : convergence mesurée**

Sur la figure de gauche (procédure normale), les vents simulés suivent une tendance générale de vent de nord-est sur le centre-ville. FVM n'est à nouveau pas en mesure de décrire le comportement différent de la partie nord-ouest de la ville et par ailleurs la norme des vents au centre ville reste trop faible par rapport aux mesures.

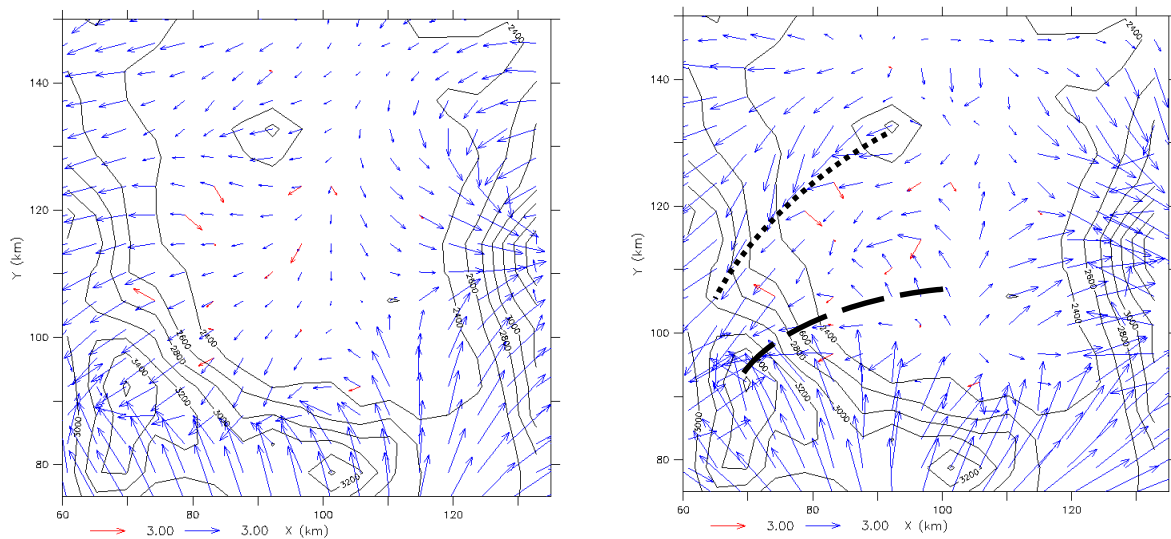
Avec la procédure de *nesting* (figure de droite), l'orientation des vents est meilleure et une zone de convergence apparaît. Cependant, si l'on compare celles-ci aux mesures, on se rend compte que cette convergence devrait se situer plus au sud du domaine et non à l'ouest comme c'est le cas ici. Ceci est confirmé par les mesures d'ozone dont le maximum est toujours mesuré à *Pedregal*, station du sud-ouest, carrefour probable de la convergence des vents. L'influence des vents provenant du sud est donc de nouveau un peu trop forte dans la grille *nestée*.

Le comportement particulier des stations du nord-ouest, correctement simulé en matinée ne l'est plus dès le début de l'après-midi, en raison de l'effet trop important des vents du sud. Il est possible que ces stations soient influencées par un élément de la topographie mal pris en compte. Par exemple, une petite chaîne de montagne au nord de Mexico (non visible sur cette carte) ou peut-être un resserrement plus sec entre la colline du centre ville et la chaîne de montagne de l'ouest, provoquant un effet de canyon, peuvent expliquer ce comportement particulier. Dans ce problème, la résolution de la grille est donc un élément capital. Une augmentation importante de la résolution risque d'être nécessaire pour atteindre ce niveau de description car, en raison de l'aspect géographiquement très tourmenté de la région, une faible résolution provoque assez facilement un nivellement de la topographie et supprime donc les effets locaux.

Cette augmentation de résolution permettrait aussi de retarder l'influence des vents du sud par la prise en compte d'éléments topographiques comme les petites chaînes de montagnes du sud-est de la ville.

4.7.3 16 février

Les deux figures suivantes montrent le 16 février à 15h, avec à nouveau les deux procédures de simulation.



**Figure 23 : Développement des vents simulés (en bleu) le 16 février à 15h, avec la procédure normale (à gauche) et la procédure de *nesting* (à droite). Mesures RAMA en rouge.
 : convergence simulée — — : convergence mesurée**

Les constatations sont les mêmes que pour le 15 février, la procédure dite de *nesting* étant plus à même de tenir compte des vents de pente provenant du sud. Cependant, cet effet est à nouveau trop prononcé, la zone de convergence observée avec *nesting* étant située trop au nord.

Aucune dérive du modèle, consécutive à la simulation de trois jours d'affilée, n'est constatée dans FVM le 16 février.

Il convient de noter qu'une seule simulation avec cette procédure de *nesting* a été lancée dans ce travail. Des réglages fins sont encore possibles et seront peut-être optimisés dans d'autres travaux à venir.

5 Simulation du transport - chimie avec le modèle TAPOM

Ce chapitre s'intéresse au modèle TAPOM, le modèle de qualité de l'air proprement dit. Pour rappel, les données du modèle FVM servent de données d'entrée au modèle TAPOM après interpolation sur la grille de ce modèle. Dans un premier temps, l'effet de certains paramètres est étudié, puis la meilleure simulation est comparée aux mesures et le développement du panache d'ozone est comparé aux scénarii proposés avec les mesures au chapitre 3.2.

5.1 Effet de l'extension de la surface urbaine (FVM) sur TAPOM

L'augmentation de la surface de la ville (modèle FVM) améliore considérablement les résultats du modèle météorologique, comme discuté au paragraphe 4.4, mais affecte également les résultats de TAPOM sur le centre ville, comme le montrent les deux figures ci-dessous.

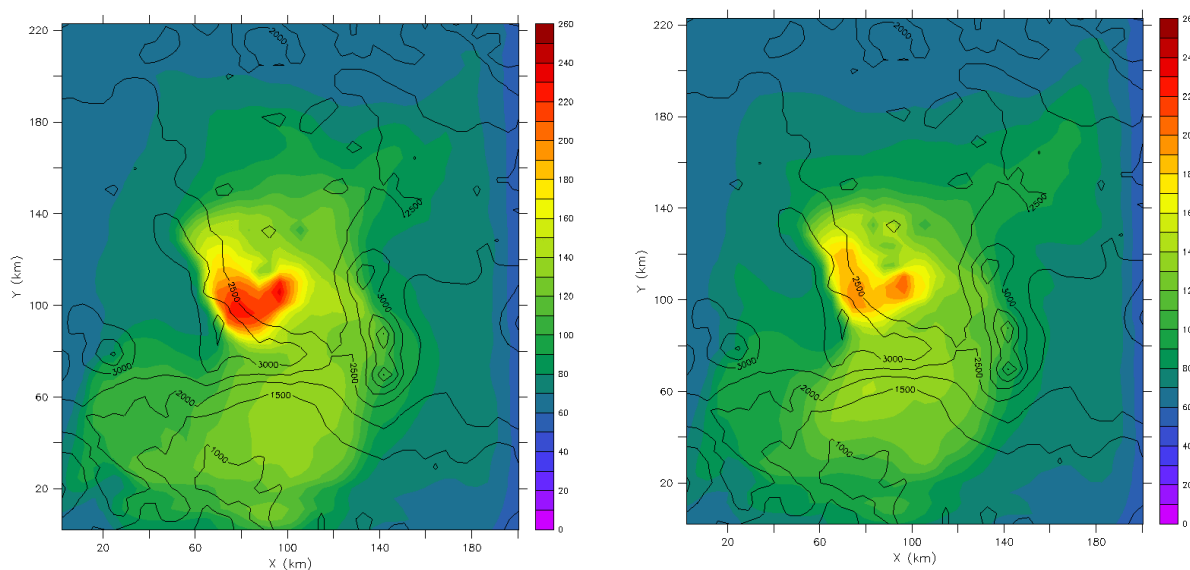


Figure 24 : Comparaison du panache d'ozone entre une simulation avec un petit *landuse* dans FVM (à gauche) et un grand *landuse* (à droite), le 15 février à 16h.

Cette figure souligne que l'extension de la zone urbaine provoque durant la journée du 15 février une légère diminution dans les taux d'ozone au centre ville, mais n'a pratiquement aucun effet sur la forme du panache proprement dit, le maximum étant toujours situé à l'ouest.

La destruction de l'ozone durant la nuit est nettement plus importante avec le petit qu'avec le grand *landuse*. Ces phénomènes de jour et de nuit s'expliquent par le fait que la couche de mélange simulée avec le petit *landuse* est plus basse en altitude. Dès lors, les oxydes d'azote sont plus concentrés, ce qui provoque d'avantage d'ozone le jour et une destruction plus efficace la nuit.

La figure ci-dessous montre que l'effet de l'extension de la ville a des effets variables sur la quantité d'ozone suivant le jour.

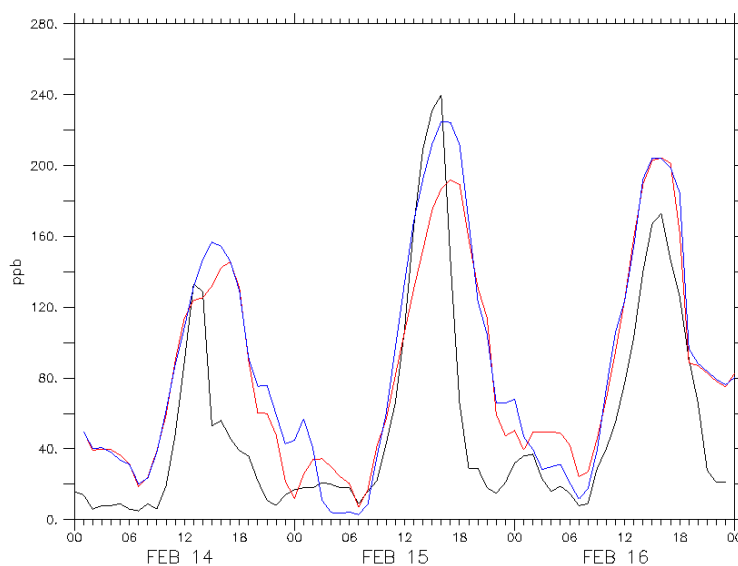


Figure 25 : Comparaison de la concentration d'ozone entre une simulation avec un petit *landuse* (en bleu) et un grand *landuse* (en rouge), à Tlalpan (sud-ouest). Mesures RAMA en noir.

L'après-midi du 15 février, les concentrations d'ozone simulées avec un grand et un petit *landuse* diffèrent par exemple d'un peu moins de 40 ppb alors que, les 14 et 16 février, celles-ci sont très proches. Par comparaison avec les mesures, le *landuse* original de FVM semble un peu meilleur.

5.2 Effet de la déposition sèche

Le modèle TAPOM possède un module permettant le calcul de la déposition sèche, c'est-à-dire la diminution de la quantité d'ozone en raison de sa déposition sur les surfaces (sol, végétaux, construction, etc.). L'effet de cette déposition sèche est présenté dans la figure ci-dessous.

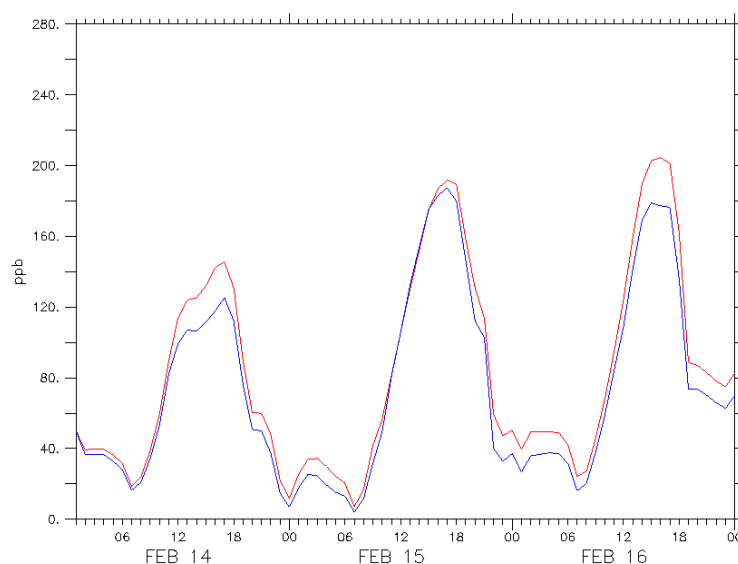


Figure 26 : Comparaison entre une simulation avec déposition sèche (en bleu) et sans déposition sèche (en rouge) à Tlalpan.

Selon cette figure, la déposition sèche diminue de 20 à 25 ppb la quantité d'ozone. La nuit, comme les stomates des végétaux sont fermés, cet effet est moindre. Le 15 février, l'effet de cette déposition est presque nul. Par la suite, la déposition sèche ne sera plus simulée.

5.3 Importance des hydrocarbures dans le cadastre d'émission

Le même cadastre d'émissions que les références [1] et [2] a été utilisé dans ce travail. Ce cadastre a été aimablement transmis au groupe de simulation du LPAS durant l'hiver 2001/2002 par le MIT. Or, il s'est trouvé que les émissions d'hydrocarbures originales de ce cadastre avaient été multipliées par un facteur 3 de façon à fournir après le modèle chimique utilisé par le MIT une quantité d'ozone conforme aux mesures¹⁶.

Après quelques essais infructueux avec les données originales, diverses simulations ont été lancées avec des taux différents d'hydrocarbures de façon à déterminer quel facteur multiplicatif permettrait d'approcher au plus près des mesures. La figure ci-dessous montre la quantité d'ozone simulée à *Merced*, au centre ville, avec des hydrocarbures (VOC) multipliés par des facteurs un, deux et trois.

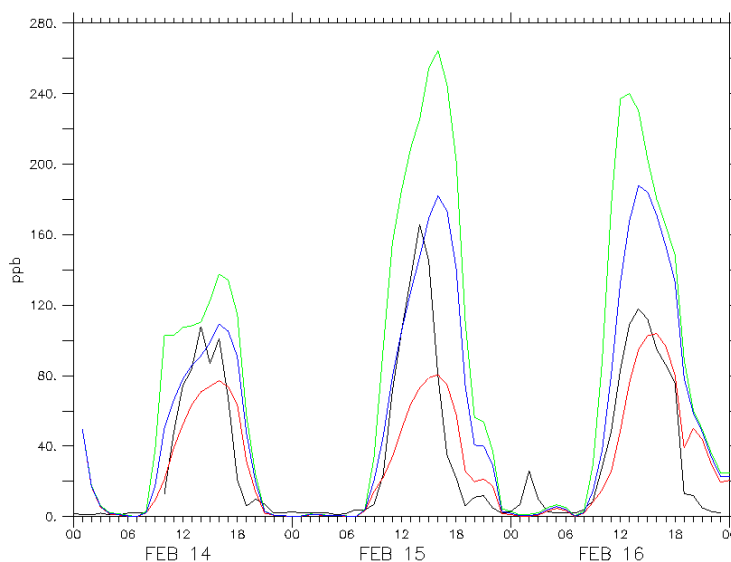


Figure 27 : Comparaison de la quantité d'ozone simulée à *Merced* (centre ville) entre une simulation avec des VOC multipliés par un (en rouge), deux (en bleu) et trois (en vert). Mesures RAMA en noir.

¹⁶ Le groupe du *Mexico City Project* au MIT pense que les concentrations en hydrocarbures de son cadastre d'émission sont sous-estimées.

La multiplication des hydrocarbures (VOC) par un facteur deux donne les résultats les plus proches des mesures RAMA, à l'exception du 16 février où les données originales décrivent mieux la réalité. Ceci trouve tout son sens lorsque l'on sait que le 16 février était un samedi et que le cadastre d'émission transmis par le MIT est séparé, d'une part entre les jours de la semaine incluant le samedi, et le dimanche d'autre part. Le modèle simule donc le samedi 16 février avec les émissions d'un jour de semaine, alors qu'une diminution légère de l'activité économique est quand même observable les samedis. Les émissions d'oxydes d'azote et d'hydrocarbures (avec facteur multiplicatif de deux) introduites dans le modèle sont donc surestimées et conduisent à des taux d'ozone supérieurs aux mesures.

Par la suite, les simulations seront toutes réalisées avec des hydrocarbures multipliés par un facteur deux. Il est intéressant de remarquer que la multiplication des hydrocarbures n'affecte que peu la forme des courbes et les heures des maxima. Le panache d'ozone est de plus sensiblement le même.

5.4 Durée de l'initialisation

Une étude selon la méthode de *Stein-Alpert* a été réalisée de façon à déterminer combien de jours il était nécessaire de simuler avant le jour à étudier proprement dit (15 février) de façon à obtenir les conditions d'ozone initiales les plus stables. Cette période s'appelle l'initialisation. La méthode de *Stein-Alpert* permet d'isoler les contributions de différents facteurs sur un processus complexe. Dans ce travail, les effets des émissions des 14 et 15 février sur les quantités d'ozone du 15 février lui-même ont été étudiés. Cette étude nécessite quatre simulations de deux jours (14 et 15 février) :

- S (yy) : simulation avec des émissions le 14 et le 15 février
- S (ny) : simulation avec des émissions le 15 février seulement
- S (yn) : simulation avec des émissions le 14 février seulement
- S (nn) : simulation sans émission ni le 14 et ni le 15 février

L'effet de la contribution de "fond" est la simulation S (nn). La contribution du 14 sur le 15 février s'obtient en faisant $S(yn) - S(nn)$. La contribution du 15 février sur lui-même est obtenue en calculant $S(ny) - S(nn)$. Enfin, la contribution croisée des 14 et 15 février est déterminée en utilisant le fait que la simulation S (yy) est la somme de tous les effets. Cette contribution devient alors $S(yy) - S(yn) - S(ny) + S(nn)$. Les figures ci-dessous présentent les résultats de cette étude pour le cas du 15 février à 16h, heure du maximum d'ozone.

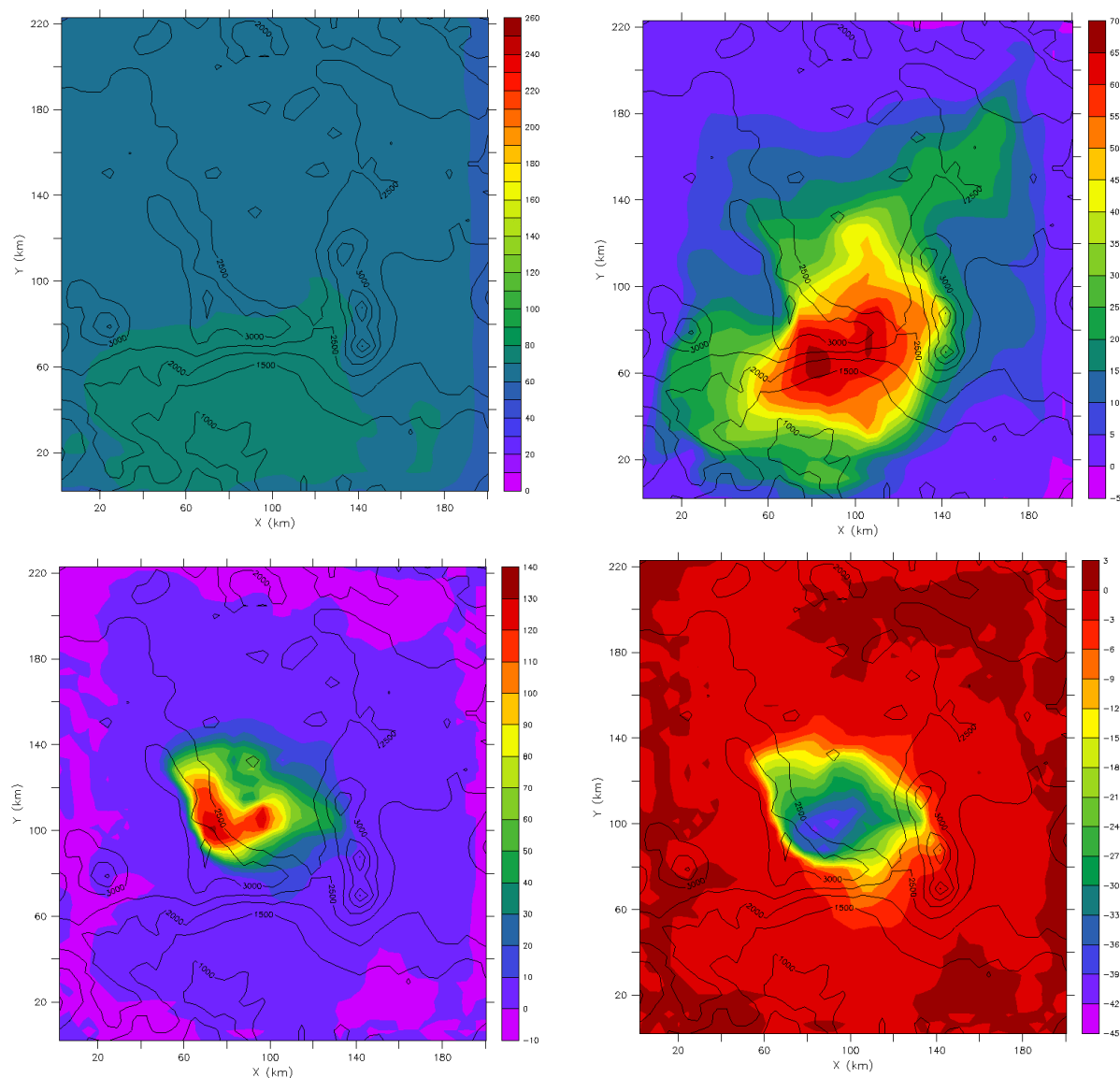


Figure 28 : Etude de l'initialisation de l'ozone au sol selon la méthode de *Stein-Alpert* pour le 15 février à 16h. En haut à gauche, la contribution de fond. A droite, la contribution du 14 sur le 15 février. En bas à gauche, la contribution du 15 février sur lui-même. A droite, la contribution croisée du 14 et du 15 février. Remarquez que les échelles sont différentes sur chaque figure.

La simulation totale est visible sur la figure 24 (à droite).

D'après cette étude, la contribution de fond (en haut à gauche) est voisine de 70 ppb. La contribution du 14 sur le 15 février est très importante au sud, se situant à env. 70 ppb. L'effet sur le centre et l'ouest de la ville est nettement moins marqué, respectivement 50 ppb et 30 ppb. Cette influence au sud de la ville provient de la descente du panache dans cette région la nuit du 14 au 15 février. La contribution du 15 février sur lui-même est extrêmement importante à l'ouest et au centre ville (presque 140 ppb). Enfin, la contribution croisée des 14 et 15 février est négative au sud-ouest (lieu du maximum) et au centre ville, signifiant que l'effet conjoint de ces deux jours provoque la destruction d'une trentaine de ppb d'ozone.

Comme l'effet du 14 février est très important, surtout au sud de la ville, un jour de simulation au minimum est nécessaire pour permettre l'initialisation. Afin de déterminer si un deuxième jour était nécessaire, un nouveau *run* a été lancé, simulant deux fois le 14 suivi du 15 février, en utilisant la procédure de restart du modèle TAPOM. Ces résultats ont montré que cette simulation n'apportait aucune augmentation dans les taux du 15 février. Ceci signifiant qu'un jour d'initialisation est suffisant pour modéliser des conditions stables pour l'étude du 15 février.

Cette étude montre aussi qu'il est important de faire tourner les scénarii de réduction des émissions sur plusieurs jours, de façon à disposer de l'effet des jours précédents, cet effet pouvant être très important.

5.5 Comparaison entre la simulation et les mesures

Tout comme FVM, la meilleure simulation de TAPOM (*landuse* étendu¹⁷, VOC multipliés par un facteur deux, pas de déposition sèche) est maintenant comparée aux mesures, la procédure de *nesting* n'étant pas appliquée dans ce chapitre. La comparaison est faite sur les grandeurs suivantes :

- Radiation solaire (totale)
- Concentration d'ozone
- Concentration de dioxyde d'azote

Le réseau RAMA mesure également les concentrations en dioxyde de soufre et en monoxyde de carbone. Néanmoins, comme les concentrations de ces polluants ont montré des améliorations certaines ces dernières années (voir chapitre 1.4), ceux-ci ne seront pas étudiés dans ce travail.

Le dioxyde d'azote est comparé aux mesures car il est, avec les hydrocarbures, un précurseur de l'ozone. Il est dommage que le réseau RAMA ne mesure aucune concentration en hydrocarbures.

L'étude du panache d'ozone sera discuté au chapitre suivant et sera comparé aux scénarii établis au paragraphe 3.2.

La radiation solaire (totale) utilisée par TAPOM est trop faible par rapport aux mesures, d'env. 300 W/m², comme le montre la figure ci-dessous. Ce problème a déjà été soulevé par le groupe de simulation du LPAS lors de l'étude de la qualité de l'air avec le modèle TAPOM au dessus de la ville de Milan.

¹⁷ Comme l'étude de FVM a montré que la météorologie produite par une extension de la surface urbaine décrivait mieux la réalité, une météo calculée avec un *landuse* étendu est donc choisie pour TAPOM.

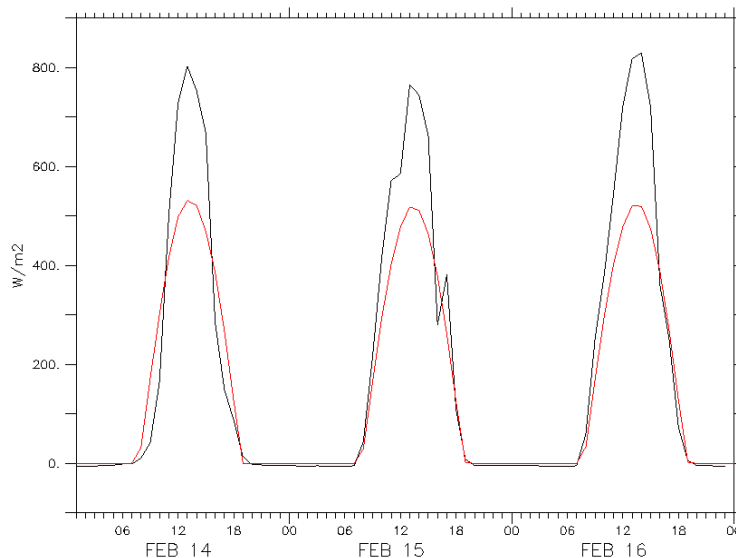


Figure 29 : Comparaison de la radiation solaire (totale) en W/m^2 entre la simulation (en rouge) et les mesures du SMN (en noir) à TEZO ou *Merced* (centre ville).

La forme des courbes mesurées et simulées est néanmoins très semblable. L'heure du maximum d'ensoleillement est bien modélisée.

Les taux d'ozone simulés sont assez proches des mesures comme le montrent les deux figures ci-dessous.

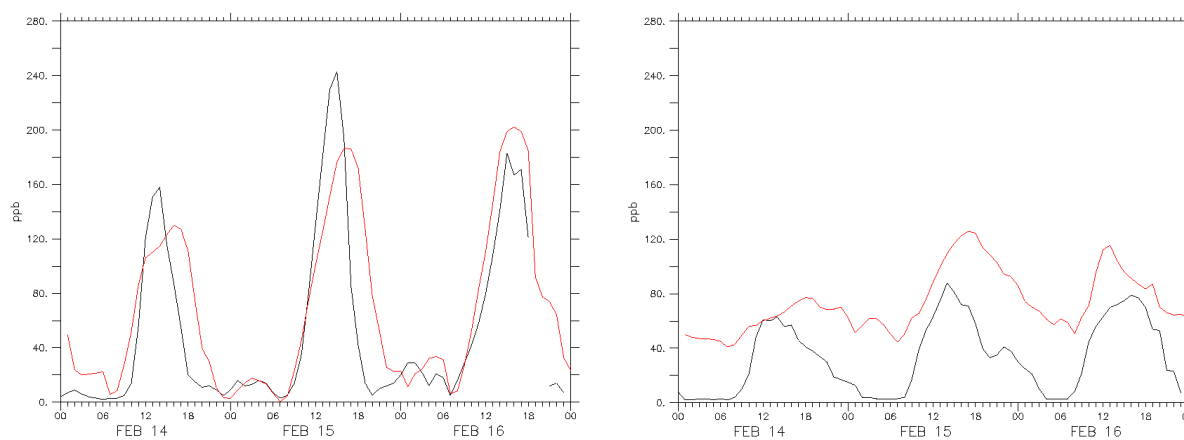


Figure 30 : Comparaison entre la concentration d'ozone simulée (en rouge) et celle mesurée par le réseau RAMA (en noir) à *Pedregal* (sud-ouest) à gauche et à *Chapingo* (est) à droite.

A *Pedregal* (figure de gauche), lieu du maximum mesuré lors de l'épisode d'ozone, les concentrations simulées sont systématiquement trop basses de 40 à 60 ppb durant l'après-midi, à l'exception du 16 février, où les taux simulés sont supérieurs aux mesures.

Les heures des maxima sont également assez régulièrement décalées de 2 à 3 heures par rapport aux mesures, sauf le 16 février où l'heure du maximum est parfaitement bien simulée. Ce décalage dans les heures des maxima simulés semble provenir des différences par rapport aux mesures relevées aux chapitres 4.6 et 4.7 (procédure classique) ou alors d'un problème de transport dû à de la diffusion numérique. La chimie ne semble pas en cause dans ce décalage, en raison de l'excellente concordance entre la simulation et les mesures dans la forme des courbes de radiation.

L'heure d'apparition de l'ozone est bien modélisée mais celle de sa disparition est à chaque fois déplacée de plus de 3 heures, ceci étant une conséquence évidente du décalage des maxima. La nuit, cependant, la destruction de l'ozone et le rythme de celle-ci sont sensiblement les mêmes entre le modèle et les mesures. Tous ces comportements sont observés pour les stations du sud-ouest et du centre ville.

Chapingo (figure de droite), à l'extrême est de Mexico City, est un exemple de ce qui est simulé en dehors de ville (à l'est, à l'ouest et au sud), la simulation suivant mal les mesures. Les heures des maxima sont à nouveau décalées (sauf le 16 février) et l'ozone n'est jamais détruit durant la nuit, contrairement à ce qu'indiquent les mesures RAMA. Les cellules de simulation sur lesquelles sont situées ces stations de mesure ne semblent pas disposer d'assez d'émissions. En effet, des émissions plus importantes provoqueraient une destruction plus forte la nuit en raison des oxydes d'azote, et des taux d'ozone probablement identiques le jour en raison du transport du panache vers la ville.

Les concentrations en dioxyde d'azote simulées à l'aide de TAPOM ne correspondent pas du tout aux mesures RAMA, comme le montre la figure ci-dessous pour le cas de Merced (centre ville).

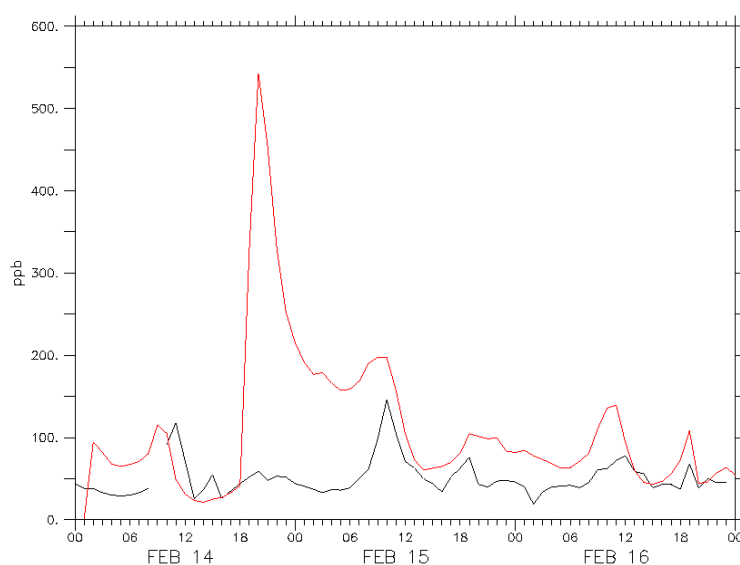


Figure 31 : Comparaison entre la concentration de dioxyde d'azote simulée (en rouge) et celle mesurée par le réseau RAMA (en noir) à Merced (centre ville)

Durant le soir et la nuit du 14 au 15 février, les taux de dioxyde d'azote simulés sont jusqu'à 10 fois supérieurs aux mesures. Ce problème est dû à une hauteur de mélange relativement basse et surtout à une vitesse des vents très faible le soir du 14 février, env. 2 m/s, à comparer avec 6 et 5 m/s respectivement les 15 et 16 février, à la même heure. Les pics du matin et du soir sont de façon générale trop prononcés dans la simulation, ceux-ci valant parfois jusqu'au double de ce qui est mesuré par les stations RAMA.

En toute rigueur, il serait mieux de comparer la quantité totale des oxydes d'azote (NO_x) par rapport aux mesures. Mais comme le réseau RAMA ne mesure que le dioxyde d'azote parmi les NO_x , la comparaison ne peut être faite que sur NO_2 .

5.6 Développement du panache simulé par TAPOM

Ce chapitre explique le développement du panache d'ozone simulé avec le modèle TAPOM. L'aspect global du panache est comparé aux scénarii établis au paragraphe 3.2.

5.6.1 14 février

L'analyse de la simulation FVM (sans *nesting*) dans le chapitre 4.7.1 a montré que le vent soufflait globalement de nord à nord-est dès la matinée et que ce comportement n'évoluait pas durant la journée. Le panache d'ozone est donc poussé durant toute la journée vers le sud, comme montré dans la figure ci-dessous à gauche.

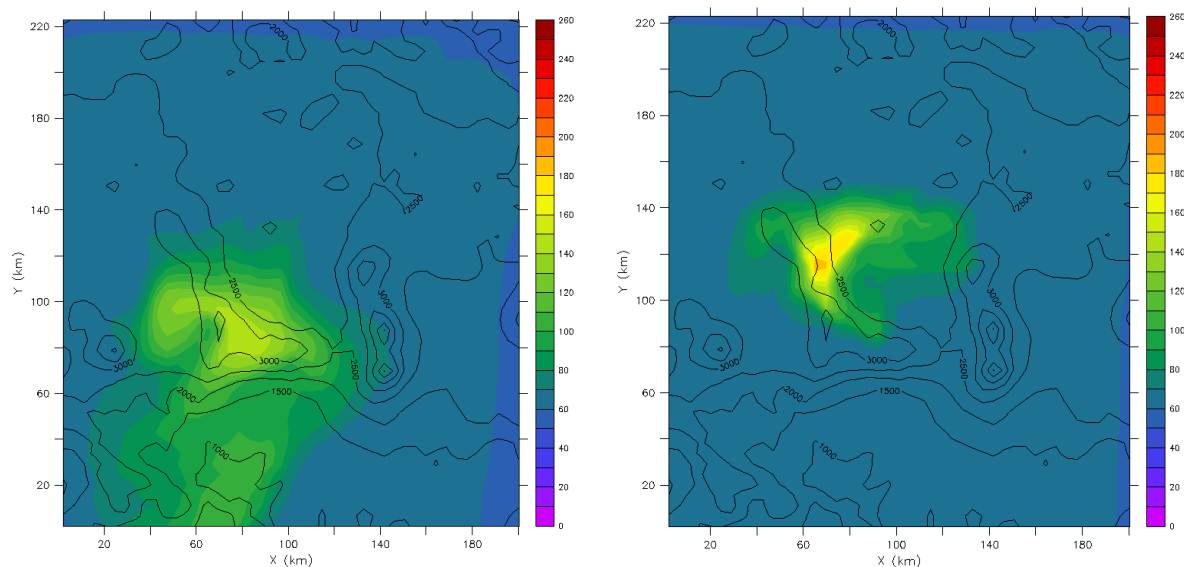


Figure 32 : Comparaison au sol entre un panache d'ozone simulé avec la procédure normale de FVM (à gauche) et avec la météo *nestée* (à droite), le 14 février à 15h.

Le panache d'ozone simulé avec la météo classique est formé dès onze heures du matin et n'évolue guère après 14h, restant accroché de manière très diffuse aux montagnes du sud-ouest. La destruction nocturne de l'ozone est observée dès 19h. La simulation ne suit pas le scénario établi à partir des mesures RAMA, le panache devant normalement se déplacer progressivement sous l'effet des vents depuis le sud-ouest vers le nord en passant par l'ouest vers 14h (voir figure 3).

Le résultat de la simulation utilisant la météorologie avec la procédure de *nesting* produit un panache meilleur car plus concentré. Cependant, il prend naissance à l'ouest, en raison d'une convergence simulée à cet endroit (voir figure 21 à droite), alors que les mesures le situe plutôt au sud-ouest en début d'après-midi, comme le montre la figure 3 (en haut à droite). Le reste de la journée, la simulation place la position du panache aux mêmes endroits que les mesures, à 15h au nord-ouest ainsi que le montre la figure ci-dessus et d'avantage vers le nord en fin d'après-midi.

Le début de la journée est encore mal simulé par cette procédure de *nesting* probablement en raison de l'influence trop précoce des vents provenant du sud. En milieu et en fin d'après-midi, lorsque l'influence de ces vents devient plus prononcée, la simulation se rapproche d'avantage de la réalité, car les vents du sud ont une intensité plus proche de celle des mesures.

5.6.2 15 février

Le 15 février, avec la procédure classique de FVM, la forme du panache est identique durant toute l'après-midi, l'ozone étant plus concentré au fur et à mesure de l'avancée de la journée. C'est pourquoi, les figures ci-dessous présentent la situation de l'ozone en fin d'après-midi lorsque sa concentration est maximale selon la simulation.

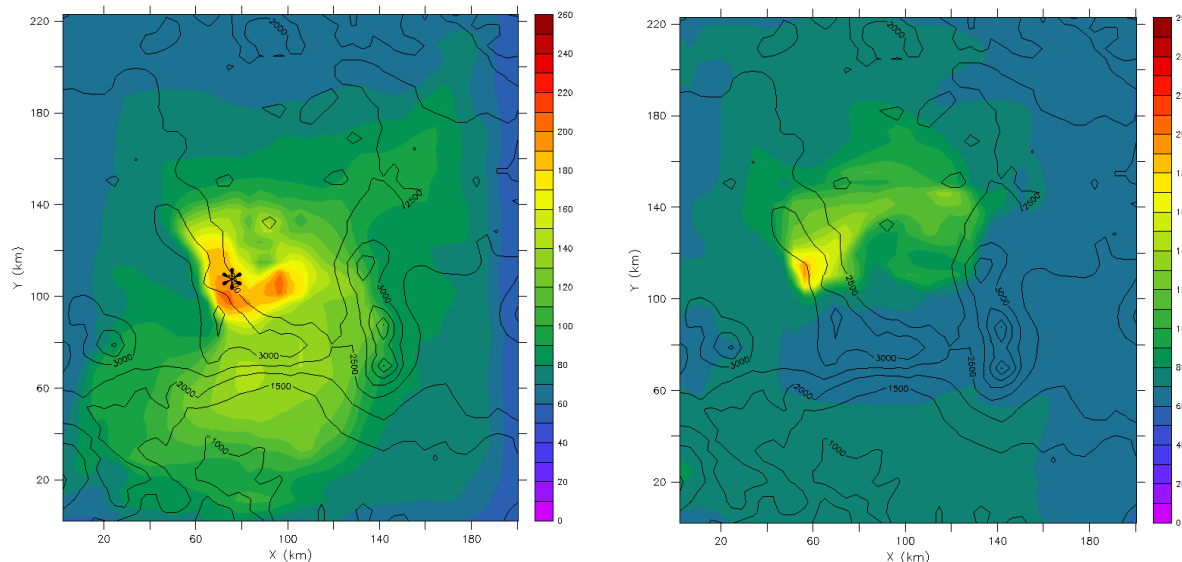


Figure 33 : Comparaison au sol entre un panache d'ozone simulé avec une météorologie classique (à gauche) et avec la météo utilisant le *nesting* (à droite) le 15 février à 17h.

Avec la procédure classique, la situation est simulée de façon trop grossière comme le montre la figure ci-dessus à gauche. L'ozone est bien trop dispersé, ce qui conduit à un maximum qui n'est pas bien défini géographiquement. De plus, les stations périphériques sont largement exposées au nuage d'ozone, ce qui n'est pas le cas dans les mesures. *Cuajimalpa*, station de mesure la plus à l'ouest de Mexico (voir l'astérisque sur la figure), en est un exemple. Le panache reste situé à l'ouest de la ville durant toute l'après-midi, le taux maximum n'étant atteint qu'à 17h, ce qui correspond à un décalage par rapport aux mesures de une à deux heures, comme discuté dans le paragraphe 5.5.

Deux maxima, séparés par une zone de faible taux d'ozone, sont visibles sur cette figure, l'un à l'ouest et l'autre au centre ville. Cette structure en "sandwich" n'est cependant pas décrite par l'hypothèse établie au paragraphe 3.2. En effet, une coupe horizontale en y montre que cette structure ne provient pas d'un déplacement des polluants en altitude de l'ouest vers le centre ville, comme posé dans cette hypothèse. De plus, la différence n'est que de 10 ppb entre les zones à faible et à forte concentration, tandis qu'elle est d'env. 40 ppb dans les mesures.

L'utilisation de la météo *nestée* (figure de droite) permet une description plus fine de la situation avec un panache moins volumineux. Cependant, celui-ci est situé trop à l'ouest en raison de la zone de convergence des vents simulée trop au nord, comme visible sur la figure 22 à droite. Il est clair néanmoins que la forme du panache est bien meilleure dans ce cas. Certains réglages plus fins dans la procédure de *nesting* pourraient peut-être permettre de corriger l'influence trop prononcée des vents du sud, cet effet semblant être responsable de la différence entre cette simulation et les mesures.

Un calcul de *nesting* sur le modèle TAPOM pourrait également être mis au point, moyennant une adaptation du cadastre d'émission à la résolution choisie pour la petite grille. Ainsi une meilleure description serait apportée à la fois dans la météorologie et dans le transport et la chimie, conduisant à des résultats de bien meilleure qualité.

5.6.3 16 février

Bien qu'assez proche, la météorologie simulée les 15 et 16 février avec la procédure classique ne produit pas tout à fait le même panache. Le nuage d'ozone du 16 est situé plus au sud et l'heure du maximum apparaît plus tôt. C'est pourquoi les figures ci-dessous présentent la situation à 15h.

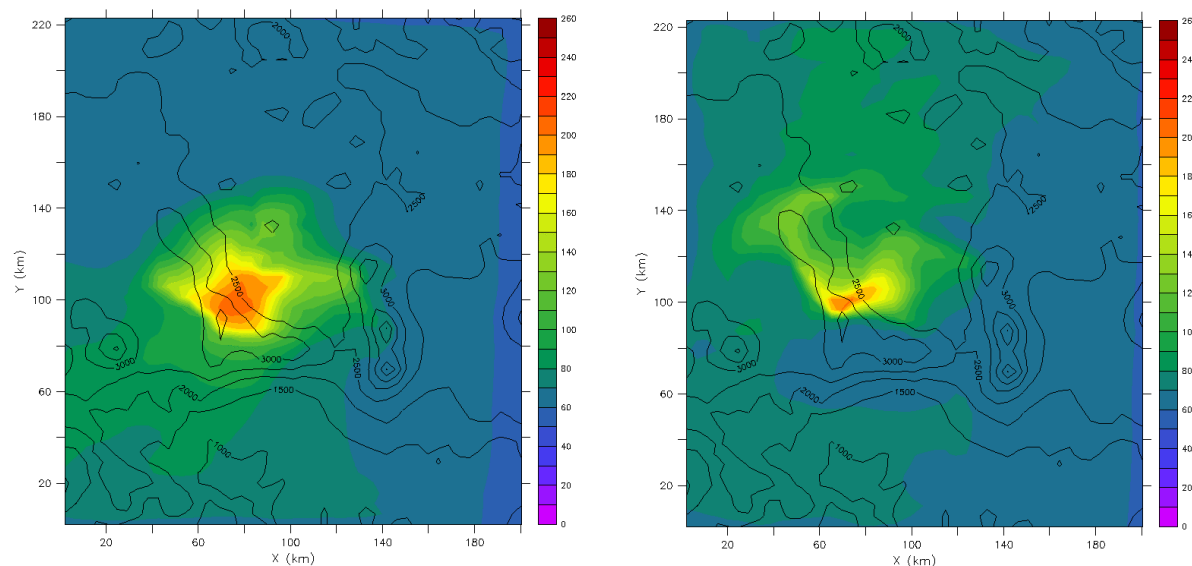


Figure 34 : Comparaison au sol entre un panache d'ozone simulé avec la procédure normale de FVM (à gauche) et avec la procédure de *nesting* (à droite) le 16 février à 15h.

Sur la figure de gauche, la simulation est plus proche des mesures que dans le cas des 14 et 15 février (sans *nesting*). La position du panache et l'heure du maximum sont bien décrits. A nouveau cependant le panache est trop étalé, *Cuajimalpa* étant exposé au maximum alors que les mesures ne l'indiquent toujours pas. Cette description est donc de nouveau trop grossière.

Pour le cas du 16 février, la météo avec *nesting* (figure de droite) donne un excellent résultat puisque le panache est très étroit et concentré sur les régions du sud-ouest de la ville. Bien que la même convergence des vents soit observée pour les 15 et 16 février (voir figures 22 et 23 à droite), l'influence des vents du sud semble mieux prise en compte le 16 février. Aucune station périphérique n'est touchée par le panache d'ozone, conformément aux mesures.

Tout comme FVM, aucune dérive liée à la modélisation de trois jours successifs n'est constatée dans le modèle TAPOM le 16 février.

6 Conclusion

Ce travail a montré que la qualité des données du modèle NCEP n'était pas suffisante pour les utiliser telles quelles comme données d'entrée du modèle FVM, la température semblant être la pierre d'achoppement. Une étude devrait être réalisée pour définir quelle qualité est souhaitable et quel traitement il est nécessaire d'appliquer sur ces données pour l'obtention de résultats encore plus satisfaisants.

La surface urbaine étendue (grand *landuse*) utilisée par le module de paramétrisation de la ville (FVM) permet désormais une description bien meilleure de la météorologie au centre ville et dans la périphérie. Des progrès sont encore possibles dans les modules simulant la radiation solaire (FVM et TAPOM).

La simulation de la météorologie pour l'épisode de pollution du début du mois de février 2002 est très nettement améliorée par l'emploi d'une technique de *nesting*. La différence majeure par rapport à une simulation classique est l'apparition d'une zone de convergence des vents à l'ouest de Mexico. La petite grille de simulation employée dans cette méthode est mieux à même de décrire les vents de pente provenant du sud. Cependant, le développement de ces vents est simulé trop tôt dans la journée et parfois de façon trop importante. Un *nesting* avec une petite grille à résolution encore meilleure pourrait, par une description plus fidèle de la topographie, être à même de résoudre les problèmes restants.

Une étude selon *Stein-Alpert* a permis de montrer que l'influence du jour précédant l'épisode de pollution proprement dit est très importante, une réintroduction de 70 ppb provenant du 14 février étant constatée au sud de la ville dans l'après-midi du 15 février. L'ouest et le centre sont presque uniquement influencés par le 15 février lui-même. La simulation de deux jours précédant le 15 février n'apporte pas d'amélioration dans les résultats. Globalement, aucune dérive conséquente à la simulation de trois jours d'affilée n'a été constatée dans aucun des deux modèles. Le rythme de production de l'ozone est relativement bien simulé, même si des décalages dans les maxima de près de 3 heures sont observés les 14 et 15 février. Quant au dioxyde d'azote, ses pics sont trop prononcés en raison d'un problème lié principalement à la vitesse des vents.

L'utilisation d'une météorologie *nestée* permet une amélioration dans la simulation des panaches d'ozone, notamment en les concentrant d'avantage géographiquement. Des réglages plus fins au niveau de la procédure de *nesting* devraient permettre de corriger les quelques écarts constatés par rapport aux mesures.

Ce travail s'est concentré sur l'amélioration de la description de la météorologie et sur l'influence de celle-ci sur les résultats du modèle de transport et de chimie. Il reste cependant un travail important à faire sur les données d'entrée du modèle TAPOM, notamment au niveau des émissions, pour caler parfaitement les simulations sur les mesures. Une procédure de *nesting* pourrait aussi être développée pour ce modèle moyennant une adaptation du cadastre d'émission. Enfin, un élément non pris en compte dans ce travail est le volcanisme, très présent dans cette région. Ce facteur a une influence non négligeable sur la chimie, dans la mesure où les volcans rejettent des quantités très importantes de soufre et de particules. Au côté des particules émises par la ville elle-même (non prises en compte dans ce travail), celles provenant des volcans pourraient participer à la diminution de la visibilité diurne à Mexico. L'impact sur la ville des polluants d'origine volcanique pourrait aussi être étudié.

7 Bibliographie

- [1] : Muller, C., *Simulation de la circulation atmosphérique dans le bassin de Mexico*, Travail pratique de diplôme, EPFL, Lausanne (2002)
- [2] : Helfer, P., *Simulation de la qualité de l'air sur la ville de Mexico*, Travail pratique de diplôme, EPFL, Lausanne (2002)
- [3] : Martilli, A., *Development of an urban turbulence parameterisation for mesoscale atmospheric models*, Thèse n° 2445, EPFL, Lausanne (2001)
- [4] : Stockwell, W.R., Kirchner, F., Kuhn, M., *A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling*, Journal of Geophysical Research, **102**, n° D15, 18'927 - 18'946 (1998)
- [5] : Molina, M. J., Molina, L. T., *Air quality in the Mexico megacity*, Kluwer Academic Publishers (2002)
- [6] : Molina, M., Molina, L., *Integrated strategy for air quality management in the Mexico City Metropolitan Area*, MIT, Cambridge (2000)
- [7] : Clappier, A., *Modélisation numérique des polluants atmosphériques*, LPAS, EPFL, Lausanne (2001)
- [8] : Van den Bergh, H., *Pollution atmosphérique I*, EPFL, Lausanne (2001)
- [9] : Williams, M.D., Brown, M.J., *An exploration of measures for comparing measurements with the results from meteorological models for Mexico City*, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, **37**, 81-94 (1997)
- [10] : Raga, G.B., Castro, T., Baumgardner, D., *The impact of megacity pollution on local climate and implications for the regional environment : Mexico City*, Atmospheric Environment, **35**, 1805-1811 (2001)
- [11] : Raga, G.B., Raga, A.C., *On the formation of an elevated ozone peak in Mexico City*, Atmospheric Environment, **34**, 4097-4102 (2000)
- [12] : Raga, G.B., Baumgardner, D., Kok, G., Rosas, I., *Some aspects of boundary layer evolution in Mexico City*, Atmospheric Environment, **33**, 5013-5021 (1999)
- [13] : Fast, J.D., Zhong, Shiyuan, *Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin*, Journal of Geophysical Research, **103**, n° D15, 18'927-18'946 (1998)
- [14] : Schenker, U., *Influence of meteorological parameters on air quality simulations in Mexico City*, Travail pratique de diplôme, EPFL, Lausanne (2003)
- [15] : *Les grandes cités : Mexico*, Editions Time-Life (1979)

8 Annexes

8.1 Détails sur les modèles numériques utilisés dans ce travail

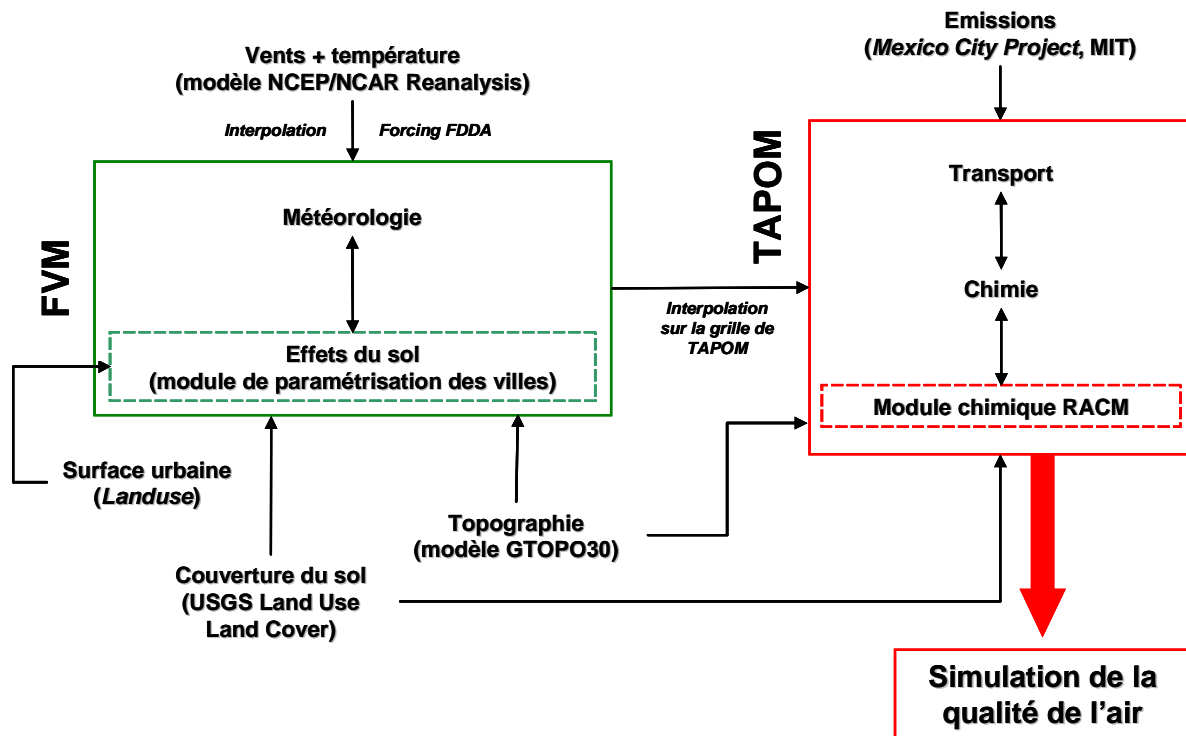


Figure 35 : Données entrant et sortant des modèles numériques utilisés dans ce travail

8.2 Détails sur la classification des stations de mesure

Le tableau ci-dessous permet la correspondance entre les abréviations utilisées par le réseau RAMA et les noms des lieux associés à ces stations de mesure.

Station de mesure	Abréviation	Station de mesure	Abréviation
Lagunilla	LAG	Hangares	HAN
Vallejo	VAL	UAM Iztapalapa	UIZ
Santa Ursula	SUR	Aragón	ARA
Tacuba	TAC	Netzahualcóyotl	NET
ENEP Acatlán	EAC	Inst. Mex. del Petróleo	IMP
Los Laureles	LLA	Benito Juárez	BJU
La Presa	LPR	Taxqueña	TAX
La Villa	LVI	Metro Insurgentes	MIN
San Agustín	SAG	Cuitláhuac	CUI
Azcapotzalco	AZC	Tultitlán	TLI
Tlalnepantla	TLA	Atizapán	ATI
Xalostoc	XAL	Villa de las Flores	VIF
Merced	MER	Cuajimalpa	CUA
Pedregal	PED	Tlalpan	TPN
Cerro de la Estrella	CES	Chapingo	CHA
Plateros	PLA	Tláhuac	TAH

Tableau 5 : Correspondance entre les abréviations des stations de mesure du réseau RAMA et les noms des lieux sur lesquels se situent ces stations.

Les paragraphes ci-dessous justifient le choix des regroupement des stations de mesure du réseau RAMA et expliquent comment la figures 2 a été construite.

8.2.1 15 février

Cinq regroupements ont été faits pour le 15 février. La classe 1 (centre ville) regroupe les stations qui présentent un pic unique à 16h et un petit épaulement vers 19h. La deuxième classe contient trois stations de mesure du nord qui ont mesuré également un pic à 16h, mais avec une intensité moindre. En effet, si la classe 1 a mesuré un taux d'ozone voisin de 160 ppb, la classe 2 n'a vu que 120 ppb à la même heure.

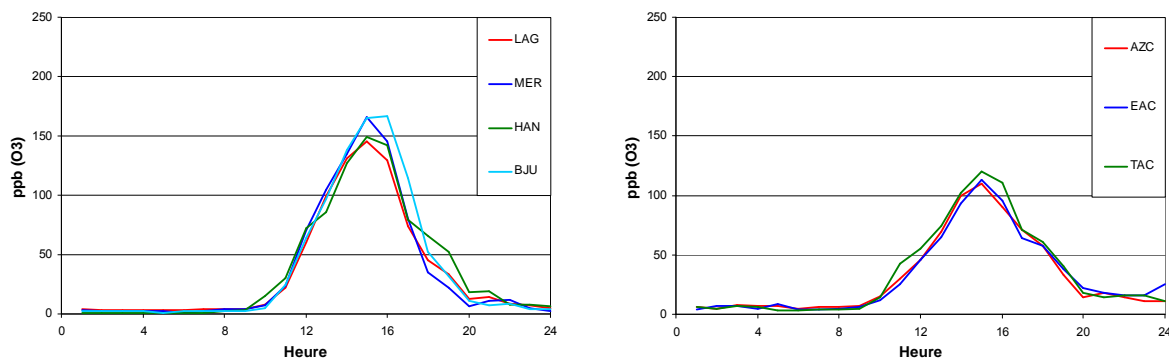


Figure 36 : Concentration d'ozone au cours du temps. A gauche, la classe 1 (centre ville). A droite, la classe 2 (nord-ouest et centre ouest).

Les deux stations du sud-ouest ayant mesuré la concentration maximale en ozone sont regroupées dans la classe 3. Bien que les deux maxima diffèrent d'environ 2h, la forme et la valeur du maximum sont de bons indices pour regrouper ces deux stations dans la même classe. Trois stations de mesure se retrouvent dans la classe représentant le comportement du nord de Mexico. Bien que les trois courbes ne présentent pas la même intensité, ces stations sont assez proches pour être mises dans la même catégorie. En effet, les trois présentent un pic à 15h et un autre à 18h.

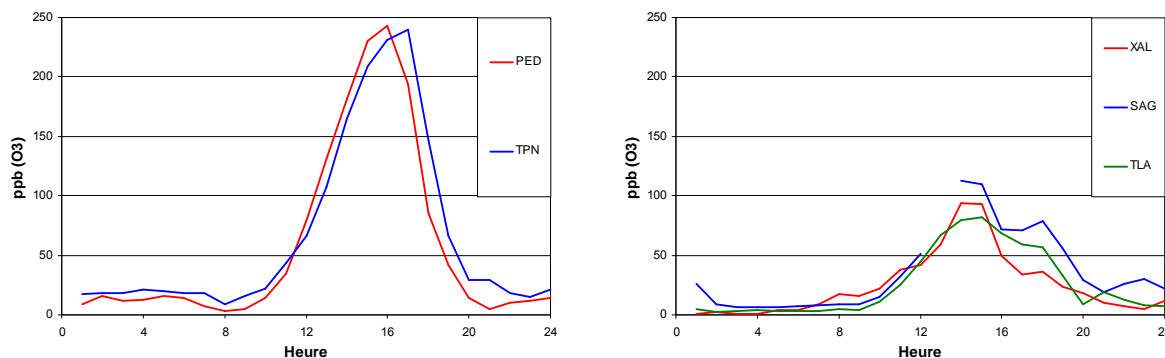


Figure 37 : Concentration d'ozone au cours du temps. A gauche, la classe 3 (sud-ouest). A droite, la classe 4 (nord).

Enfin, un comportement assez proche a été relevé pour trois stations du centre ouest qui montrent toutes un pic unique vers 16h, mais d'intensité différente, variant de 120 à 160 ppb.

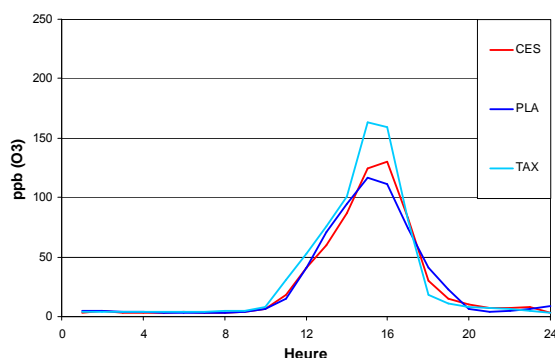


Figure 38 : Concentration d'ozone au cours du temps. Classe 5 (centre ouest).

La station *Taxqueña*, bien que de concentration maximale 160 ppb, n'a pas été mise dans la première classe car aucun épaulement à 19h n'est visible.

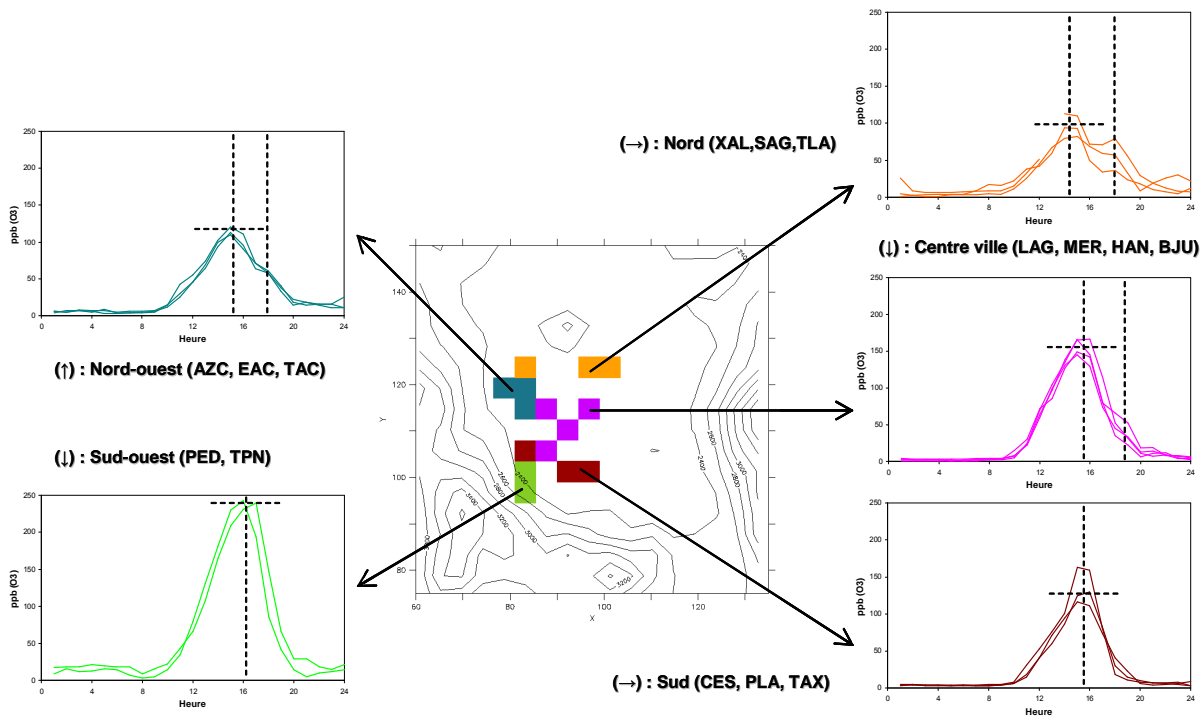


Figure 39 : Résumé de la classification des stations de mesures pour le 15 février

8.2.2 16 février

Pour le 16 février, 5 classes ont pu être identifiées. La classe 1 (centre ville) regroupe l'ensemble des stations présentant un pic unique aux alentours de 16 heures et un épaulement vers 19 heures. La classe 2 (nord-ouest et centre ouest) regroupe les stations présentant deux maxima d'ozone à 14 heures et 17 heures, à l'exception d'une station (*Benito Juárez*) qui ne présente qu'un seul pic à 16 heures et qui présente des similitudes avec la classe 1.

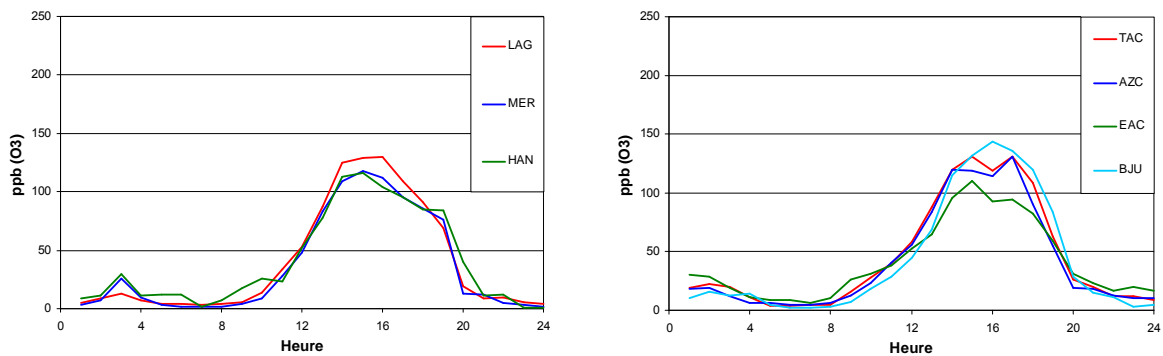


Figure 40 : Concentration d'ozone au cours du temps. A gauche, la classe 1 (centre ville). A droite, la classe 2 (nord-ouest et centre ouest).

La classe 3 regroupe les deux stations du sud ouest présentant le taux maximum d'ozone (170 ppb). Une des deux stations (*Pedregal*) présente deux maxima très proches aux alentours de 16 et 18 heures. La classe 4 groupe les stations du nord de la ville présentant des replats durant toute l'après-midi (à l'exception de *Xalostoc* qui semble un peu influencée par les stations de la classe 2).

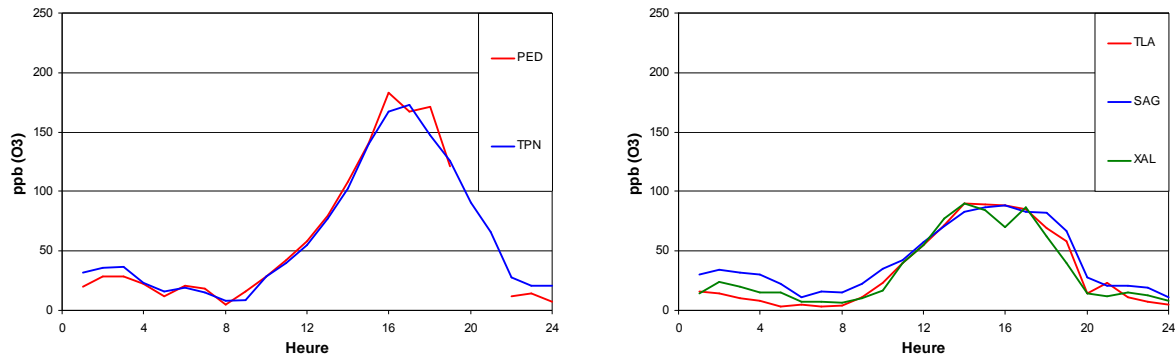


Figure 41 : Concentration d'ozone au cours du temps. A gauche, la classe 3 (sud-ouest). A droite, la classe 4 (nord).

La dernière classe regroupe les stations du centre et du sud-est qui présentent des caractéristiques communes mais variant selon l'heure.

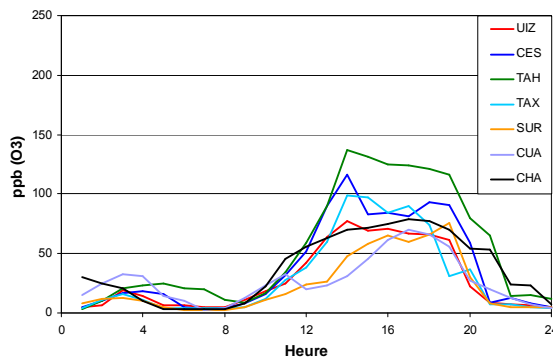


Figure 42 : Concentration d'ozone au cours du temps. Classe 5 (centre et sud, caractéristiques communes variant selon l'heure).

On peut par exemple identifier un comportement commun entre trois stations (*UAM Iztapalapa*, *Cerro de la Estrella* et *Tláhuac*) qui présentent toutes un pic à 14 heures (classe 5a) et ajouter la station qui n'a le même comportement que jusqu'à 17 heures. Dans la seconde partie de l'après-midi, la station *Santa Ursula* remplace *Taxqueña*. La classe 5b regroupe les stations présentant un très faible pic à 16 heures et un pic du soir vers 19 heures. La station *Tláhuac* présente encore un épaulement à 21 heures, différant des autres stations de sa classe en raison de son éloignement (extrême sud de la ville).

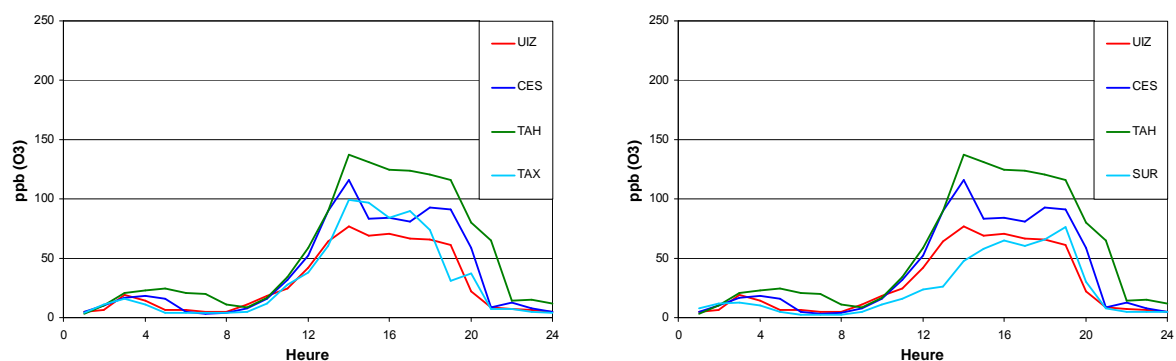


Figure 43 : Concentration d'ozone au cours du temps. A gauche, la classe 5a (*Taxqueña* ne fait partie de cette classe que jusqu'à 17 heures). A droite, la classe 5b (*Santa Ursula* ne fait partie de cette classe qu'à partir de 17 heures).

8.3 Détails sur la hauteur de mélange

La figure ci-dessous compare une simulation avec la grande et la petite surface urbaine au niveau des courbes de température potentielle.

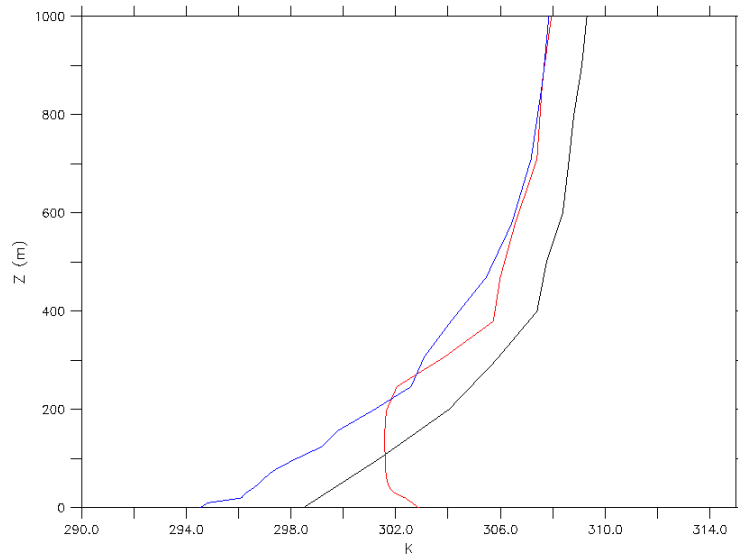


Figure 44 : Température potentielle en fonction de l'altitude à Cuautitlán, le 15 février à 6h. En rouge, une simulation avec le grand *landuse*. En bleu, une simulation avec le petit *landuse*. Mesures RAMA en noir.

La courbe de température potentielle simulée avec la petite surface urbaine est très proche des mesures.