

QC
882
M6714
1998
EX.1

**APPLICATION DES MODÈLES NUMÉRIQUES MC2 ET
CTM À HAUTE RÉOLUTION SUR LE SUD-OUEST DU
QUÉBEC ET COMPARAISON AVEC LES MESURES
PRISES LORS DE ESOM-MERMOZ EN 1996**

par

Gilles Morneau
Mario Benjamin
Environnement Canada, région du Québec

en collaboration avec

Janusz Pudykiewicz
Direction de la recherche en qualité de l'air

Octobre 1998



QC
882
M6714
1998
Ex. 1

Rég. Québec Biblio. Env. Canada Library



Environnement
Canada
Région du Québec

Environment
Canada
Quebec Region

Table des matières

Liste des acronymes	iii
1. Introduction	1
2. Méthodologie	1
2.1 Les modèles numériques.....	2
2.2 Sélection des épisodes.....	2
2.3 Situation météorologique du 10 au 14 juin 1996.....	2
2.4 Analyses objectives pour le modèle météorologique.....	3
2.5 Domaine spatial et résolution de la grille.....	3
2.6 Inventaires d'émissions pour le modèle d'oxydants	4
2.7 Intégrations des modèles MC2 et CTM	4
2.8 Campagne de mesure ESOM-MERMOZ 1996.....	5
2.9 Comparaisons et tests de validation.....	5
3. Résultats à Saint-Anicet et L'Assomption.....	8
3.1 Séries temporelles de l'ozone au sol.....	8
3.2 Distribution spatiale de l'ozone au sol.....	8
3.3 Séries temporelles des précurseurs de l'ozone	8
3.4 Concentration d'ozone à 125 et 400 mètres.....	9
3.5 Profil vertical de l'ozone à L'Assomption.....	9
4. Comparaisons et statistiques	10
4.1 Erreur absolue et biais du modèle	10
4.2 Distribution de fréquence et 90ième percentile.....	10
4.3 Indice SUM60.....	11
5. Conclusion	11
6. Remerciements.....	12
Références.....	13
Figures	14

Liste des acronymes

ADOM	<i>Acid deposition and oxidant model</i>
CEPS1.0	<i>Canadian emissions processing systems version 1.0</i>
CMC	Centre Météorologique Canadien
COV	Composé organique volatil
CTM	<i>Chemical tracer model</i>
EMEFS-I	<i>Eulerian model evaluation and field study for acid deposition phase I</i> (Étude d'évaluation sur le terrain du modèle eulérien pour les dépôts acides)
ESOM	Étude sur les oxydants dans la région de Montréal
HAE	Heure avancée de l'est
MC2	Modèle de mésoéchelle compressible communautaire
MERMOZ	<i>Montreal experiment on regional mixing and ozone</i>
NARSTO-CE	<i>North American research strategy for tropospheric ozone - Canada east</i>
RPN	Recherche en Prévision Numérique (Environnement Canada)
TUC	Temps universel coordonné
WQC	<i>Windsor - Quebec city (corridor)</i>

Application des modèles numériques MC2 et CTM à haute résolution sur le sud-ouest du Québec et comparaison avec les mesures prises lors de ESOM-MERMOZ en 1996

1. Introduction

Les modèles de qualité de l'air sont utilisés depuis plusieurs années au Canada. Ils ont d'abord servi à comprendre la problématique des pluies acides puis, plus récemment, ont servi d'aide à la décision dans le dossier du smog et de l'ozone troposphérique. Avec l'éventuelle mise en place de plans de gestion régionaux du smog, la région du Québec doit se doter d'outils pour pouvoir répondre aux questions qui seront soulevées. Par exemple, quels sont les principaux mécanismes responsables de la formation de l'ozone troposphérique dans la région de Montréal et quelle est la contribution du transport à grande distance des polluants dans cet enjeu; quel genre de contrôle des émissions serait nécessaire pour régler le problème du smog sur le sud du Québec? Les modèles de qualité de l'air sont des outils pour nous aider à répondre à ces questions et la présente étude vise à appliquer un de ces modèles régionalement. La disponibilité d'un grand nombre d'observations de quantité de polluants prises lors de la campagne de mesure NARSTO-CE en 1996 nous permettra de valider le modèle et de contribuer à son amélioration.

Dans ce travail, nous allons tenter de répondre aux questions particulières suivantes :

- Quelle est l'échelle horizontale la mieux adaptée aux applications régionales des modèles de qualité de l'air contemporains?
- Jusqu'à quel point les modèles sont-ils utiles pour prédire la concentration d'ozone au sol sur une région donnée?
- Jusqu'à quel point les modèles sont-ils utiles pour estimer le transport transfrontalier de l'ozone et de ses précurseurs?

2. Méthodologie

L'étude consiste à simuler les conditions météorologiques d'une certaine période de l'été 1996 à l'aide d'un modèle météorologique, puis utiliser les résultats obtenus pour piloter un modèle de qualité de l'air qui calculera alors la concentration de l'ozone et de ses précurseurs. Pour reproduire le plus exactement possible les conditions météorologiques durant l'épisode choisi, le modèle météorologique sera piloté par des analyses objectives tout au long de l'intégration. Ces analyses objectives sont produites par le Centre Météorologique Canadien à l'intérieur du processus d'assimilation des données globales et régionales et constituent la meilleure représentation disponible des champs dits météorologiques de l'atmosphère. Le modèle météorologique que nous utiliserons peut alors être qualifié d'interpolateur dans le temps et dans l'espace et d'outil diagnostique pour générer les champs qui ne sont pas disponibles dans les analyses objectives, comme par exemple les variables de la couche limite et les champs de précipitations.

2.1 Les modèles numériques

Le modèle de qualité de l'air que nous allons utiliser dans cette étude est le *Chemical Tracer Model* (Pudykiewicz, Kallaur et Smolarkiewicz, 1997), que nous noterons dorénavant CTM. Ce modèle utilise un schéma précis d'advection semi-lagrangienne et incorpore la chimie de ADOM II avec ses 114 réactions parmi 47 composés chimiques (Lurmann, Lloyd et Atkinson, 1986; MacDonald *et al.*, 1993). Les variables météorologiques nécessaires au CTM pendant l'intégration, comme le vent, la température de l'air et la stabilité, sont fournies par le modèle météorologique de mésoéchelle compressible communautaire MC2 (Tanguay, Robert et Laprise, 1990; Benoit *et al.*, 1997). Le modèle météorologique MC2 est basé sur l'ensemble des équations primitives, sans la contrainte hydrostatique, qui sont résolues par une méthode semi-implicite et semi-lagrangienne. Le paramétrage physique utilisé avec MC2 est la version opérationnelle présentement en utilisation au Centre Météorologique Canadien. Les modèles MC2 et CTM ont été largement utilisés ensemble dans le cadre de l'évaluation scientifique des NO_x et des COV au Canada en 1996 alors qu'ils ont été comparés à d'autres modèles et aux observations¹.

2.2 Sélection des épisodes

Nous voulons étudier le modèle de qualité de l'air pendant une période de temps où les concentrations d'ozone au sol ont atteint des valeurs près ou au-dessus de l'objectif canadien de 82 parties par milliard (ppb). Pendant la campagne de mesure ESOM-MERMOZ de 1996, de telles concentrations ont été observées sur le sud du Québec les 11 et 12 juin en après-midi, puis pendant quatre jours consécutifs à partir du 4 août à l'est de Montréal. Malheureusement, un seul épisode a pu être simulé avec les modèles numériques dans le contexte de cette étude à cause des ressources de calcul limitées. La période choisie est l'épisode de juin 1996, la raison principale motivant ce choix étant la disponibilité d'un plus grand nombre d'observations entre les 10 et 14 juin que durant l'épisode du mois d'août. La simulation du mois d'août est reportée à une date ultérieure.

Pour étudier la période du 10 au 14 juin 1996, les modèles météorologique et chimique seront intégrés à partir du 7 juin, d'abord pour avoir à notre disposition plus de données pour les comparaisons et les statistiques, puis pour permettre au transport à longue distance de s'effectuer préalablement à la date ciblée pour l'étude.

2.3 Situation météorologique du 10 au 14 juin 1996

La situation météorologique pendant l'épisode choisi était caractérisée par un centre de haute pression sur l'Atlantique et différents systèmes de basses pressions sur le centre et le nord du continent, engendrant une faible circulation de sud à sud-ouest sur le sud du Québec jusqu'au 14 juin alors que les vents tournaient vers l'ouest après le passage d'un creux. Sur le sud du Québec, le temps a été généralement nuageux avec averses et vents légers du nord-est à sud-est le 10 juin, puis généralement ensoleillé avec vents légers du sud les 11 et 12 avec quelques averses durant la nuit. Le 13 juin, le temps a été nuageux avec averses et orages accompagnés de vents légers du sud à sud-ouest. Le 14, du temps généralement nuageux avec averses dispersées a été observé le matin, suivi d'un dégagement en après-midi accompagné de vent virant à l'ouest et augmentant à modérés.

¹ *Modelling of ground-level ozone in the Windsor-Québec City Corridor and in the Southern Atlantic Region*. Rapport du WQC Corridor and Southern Atlantic Region modelling and measurement working group. Environnement Canada, 1997, 265 p.

2.4 Analyses objectives pour le modèle météorologique

Les analyses objectives des champs météorologiques pour la période du 7 au 15 juin 1996 ont été extraites des archives du CMC. Ces analyses sont disponibles toutes les six heures sur une grille de résolution de 35 km sur l'Amérique du Nord. Elles incluent des champs bi-dimensionnels (pression de surface, humidité du sol, température de surface et profonde, épaisseur et couverture de la neige, albédo et couverture de glace) ainsi que les champs tri-dimensionnels (température virtuelle, humidité spécifique et vent horizontal) sur 28 niveaux sigma. Les champs géophysiques de surface non disponibles dans les analyses objectives, qui sont le type de végétation, le masque terre-mer, la longueur de rugosité et la variance de la topographie, ont été extraits de fichiers climatologiques et maintenus constants tout au long de l'intégration des modèles. Les analyses objectives fournissent les conditions initiales de l'intégration de MC2 ainsi que les conditions aux frontières latérales tout au long de l'intégration pour piloter le modèle.

2.5 Domaine spatial et résolution de la grille

Le domaine à l'intérieur duquel se fera l'intégration des deux modèles MC2/CTM doit tout d'abord être déterminé. Le but de l'étude étant d'étudier l'ozone troposphérique et ses précurseurs sur le sud du Québec, le transport à grande distance doit être pris en compte en raison de son influence sur la photochimie locale. Le domaine idéal devrait en conséquence recouvrir un territoire incluant toutes les sources de polluants pouvant affecter la chimie locale sur le sud du Québec. Comme le temps de vie des précurseurs de l'ozone peut atteindre quelques jours dans l'atmosphère, un tel domaine devrait couvrir toute l'Amérique du Nord. Malheureusement, les ressources de calcul disponibles imposent un compromis. Nous devons choisir un domaine assez grand pour couvrir les principales sources de polluants affectant le sud du Québec mais sans excéder la capacité des calculateurs. Le facteur le plus restrictif au niveau des ressources de calcul est la taille de la grille du modèle CTM qui ne peut excéder 70 par 70 points avec 20 niveaux verticaux. Cette considération nous suggère une grille carrée de 100 points par côté avec 29 niveaux verticaux pour MC2, qui laisserait assez de place pour une zone de transition de 15 points de largeur autour du domaine pour le pilotage latéral. La largeur de l'éponge pour le pilotage de MC2 a été fixée à 10 points. Le nombre de niveaux verticaux dans la grille de MC2 a été fixé à 29, ce qui est une valeur typique pour les études de mésoéchelle.

Afin de déterminer l'échelle horizontale la mieux adaptée pour les applications régionales des modèles, ceux-ci seront intégrés avec deux résolutions différentes. On entend ici par résolution la distance séparant deux points de grille adjacents. Comme les analyses objectives de départ sont disponibles sur une grille ayant une résolution de 35 km et que le paramétrage actuel des modèles numériques est valide jusqu'à une résolution d'environ 12 km, il a été décidé d'effectuer l'intégration de MC2 et CTM sur une grille de 35 km de résolution d'abord, puis sur une grille de 12 km de résolution. La première grille sera qualifiée de grille grossière et la seconde de grille fine. Notons que les modèles résolvent leurs équations sur une projection stéréographique polaire vraie à 60° N et que conséquemment les résolutions de 12 et 35 km sont aussi vraies à cette même latitude. La figure 2.1 illustre le domaine couvert par la grille de MC2 aux deux résolutions une fois la zone de transition pour le pilotage de 10 points enlevée. Le centre des deux grilles a été décalé vers le sud-ouest de la zone d'intérêt afin d'inclure le plus possible les effets du transport à grande distance, les vents dominants sur la région étant du sud-ouest. On remarque sur la figure 2.1 que la superficie couverte par la grille fine est beaucoup plus petite que celle couverte par la grille grossière, puisque le

nombre de points de grille est identique aux deux résolutions. Le domaine d'intégration à haute résolution ne contient pas les sources importantes de polluants du Midwest et des régions industrielles de la côte est des États-Unis au sud de New York. Nous sacrifions ainsi le transport à grande distance en faveur d'une résolution de grille plus fine. Une façon de tenir compte du transport à grande distance des polluants provenant de l'extérieur de la grille fine serait d'utiliser les résultats de CTM sur la grille grossière pour fixer les conditions aux frontières latérales de la grille fine lors de l'intégration du modèle à haute résolution. Nous souhaitons faire cette expérimentation lors d'une prochaine étude.

2.6 Inventaires d'émissions pour le modèle d'oxydants

Le cycle de vie d'un polluant atmosphérique est composé de son injection dans l'atmosphère, du transport et de la diffusion par le vent, des transformations chimiques ou photochimiques avec d'autres composés et finalement de son retour à la surface terrestre par les processus de déposition. Le modèle CTM aidé du modèle météorologique MC2 simule la plupart de ces processus excepté l'émission dans l'atmosphère. Ce processus est fourni par une base de données distincte qui doit être mise à jour régulièrement pour refléter les changements dans les sources de polluants. Idéalement, ces données devraient aussi être disponibles à la résolution requise par le modèle. Les champs d'émissions qui seront utilisés dans cette étude sont ceux utilisés lors de l'évaluation scientifique des NO_x et des COV au Canada en 1996 et basés sur les inventaires d'émissions de 1985. Ces données sont décrites en détail à l'appendice 3B du rapport d'évaluation². Signalons que les émissions biogéniques de cette base de données sont valides pour la période de la campagne de mesure EMEFS-I du mois d'août 1988 et non pour la période du 7 au 14 juin 1996 pour laquelle elle sont utilisées. La disponibilité éventuelle du processeur d'émissions canadien CEPS1 permettra d'utiliser des données d'émissions plus récentes et d'obtenir des valeurs plus réalistes des champs d'émissions qui dépendent de la température, notamment les émissions biogéniques.

2.7 Intégrations des modèles MC2 et CTM

Les modèles MC2/CTM seront utilisés pour simuler la période du 7 au 14 juin 1996. Le modèle météorologique MC2 sera intégré une journée à la fois avec de nouvelles conditions initiales. L'intégration débute à 1800 TUC la veille et se poursuit pendant 30 heures. Les premières 6 heures permettent au modèle d'atteindre son équilibre interne et sont par la suite rejetées, ce qui laisse 24 heures de champs météorologiques pour piloter le modèle de qualité de l'air CTM. La série d'intégrations de MC2 sur la grille grossière sera pilotée par les analyses objectives fournies par le CMC, tandis que celle sur la grille fine sera pilotée par les résultats obtenus sur la grille grossière, ce qu'on appelle une cascade. Les champs obtenus de MC2 sont sauvegardés à toutes les heures pour les besoins de CTM. Le pas de temps de MC2 est fixé à 450 secondes pour l'intégration sur la grille grossière et est réduit à 150 secondes sur la grille fine.

Le modèle de qualité de l'air est intégré sur une sous-grille de 70 points par 70 points de la grille de MC2 pour chacune des deux résolutions. La grille de CTM est obtenue en prenant le domaine libre de la grille MC2 et en retranchant une bande de 5 points de grille de chacun des quatre côtés. Le pas de temps du modèle est d'une heure et il est intégré 24 heures à la fois.

² *Modelling of ground-level ozone in the Windsor-Québec City Corridor and in the Southern Atlantic Region*. Rapport du WQC Corridor and Southern Atlantic Region modelling and measurement working group. Environnement Canada, 1997, 265 p.

La concentration des composés chimiques aux frontières latérales n'est pas traitée de façon particulière (par exemple initialisée à une valeur de fond ou bien, pour l'intégration à 12 km, prise de l'intégration à 35 km). On reconnaît que ceci est une faiblesse sur laquelle on se penchera au cours des projets futurs, surtout en ce qui concerne la grille fine intérieure.

2.8 Campagne de mesure ESOM-MERMOZ 1996

Plusieurs observations de polluants atmosphériques tels que O₃, NO_x, CO et COV ont été prises dans le sud du Québec durant l'été 1996 lors de la campagne de mesure ESOM-MERMOZ. La figure 2.2 illustre le réseau de qualité de l'air comprenant des stations rurales et urbaines fournissant des observations de surface, ainsi que deux stations (Saint-Anicet et L'Assomption) effectuant des mesures en altitude. Les polluants mesurés aux stations de surface incluent O₃, NO₂, NO, SO₂ et CO. À Saint-Anicet et à L'Assomption, les concentrations de certains COV et plusieurs variables météorologiques sont aussi mesurées à la surface. On y a mesuré aussi le profil vertical de température, d'humidité et de vent à l'aide de radio-sondages, ainsi que le profil vertical d'ozone au moyen de ballons captifs. Les observations de surface sont généralement disponibles toutes les heures alors que les sondages en altitude sont disponibles quelques heures le matin puis en fin d'après-midi. Le tableau 2.1 contient la liste des stations qui ont été utilisées dans l'analyse des résultats de MC2/CTM dans cette étude.

2.9 Comparaisons et tests de validation

Cette étude se propose de vérifier jusqu'à quel point le modèle CTM reproduit la chimie de l'ozone troposphérique sur le sud du Québec et si un accroissement de la résolution horizontale de la grille du modèle améliore les résultats, au prix de ressources de calcul additionnelles. Nous allons comparer les observations de surface et d'altitude avec les résultats de CTM obtenues sur les grilles de 12 et 35 km de résolution. Nous ne ferons pas la validation du modèle météorologique MC2 dans cette étude-ci. Une évaluation sommaire du modèle MC2 pour la période qui nous intéresse est disponible dans le rapport de projet MERMOZ³.

Les premiers résultats qui seront montrés à la section suivante sont les séries temporelles de l'ozone au sol à Saint-Anicet et à L'Assomption, suivies de la concentration d'ozone à 125 mètres et à 400 mètres au-dessus du sol à L'Assomption. Nous allons aussi examiner les séries temporelles des concentrations des précurseurs de l'ozone à L'Assomption, soient les NO_x et quelques COV.

Les seconds résultats qui seront montrés sont les sondages d'ozone par ballons captifs à L'Assomption du 10 au 14 juin 1996. Les sondages seront comparés aux profils verticaux de l'ozone simulés par le modèle.

Enfin, on comparera les concentrations d'ozone mesurées à la surface par tout le réseau avec les simulations du modèle en amont, en aval et dans la région urbaine de Montréal. Le sud du Québec sera divisé conséquemment en trois sous-régions (voir tableau 2.1) :

³ MERMOZ Project Report. Recherche en Prévision Numérique, Environnement Canada, 1997.

- 1- le nord-est de Montréal (noté NE dans le tableau 2.1) qui inclut toutes les stations rurales du nord-est ainsi qu'une station semi-urbaine (Varenes), pour un total de 7 stations;
- 2- le sud-ouest de Montréal (noté SW) qui inclut toutes les stations rurales du sud-ouest plus une station semi-urbaine (Dorval), pour un total de trois stations;
- 3- la zone urbaine qui regroupe les 10 stations de l'île de Montréal et de la banlieue (notée MTL).

Nous allons calculer le biais moyen et l'erreur absolue du modèle par sous-région en utilisant d'une part toutes les 24 heures de la journée, puis d'autre part en omettant les heures de la nuit (entre 21h00 et 6h00 HAE). Nous allons aussi calculer le biais et l'erreur absolue du modèle dans la prédiction du maximum quotidien d'ozone par sous-région. Puis la distribution de fréquence de la concentration d'ozone observée sera comparée à celle du modèle. Enfin, comme dernier test, nous allons comparer la sommation des concentrations horaires supérieures à 60 ppb pour chaque station, indice qu'on appelle SUM60. Même si cet indice est habituellement utilisé pour évaluer les effets des concentrations élevées d'ozone sur la végétation pendant la période de croissance, ce test nous fournira néanmoins une indication du biais et de l'erreur du modèle pour ce court épisode de 7 jours.

Tableau 2.1

Localisation des stations de surface utilisées dans l'analyse des résultats du modèle. Le type de station indique si elle est rurale (R), semi-urbaine (SU) ou urbaine (U). On définit trois sous-régions, à savoir le nord-est de Montréal, noté NE, le sud-ouest de Montréal noté SW et la zone urbaine notée MTL.

Code	Nom de la station	Type	Latitude (degré N)	Longitude (degré W)	Sous-région
WHM	Varenes	SU	45,717	73,383	NE
WEW	L'Assomption	R	45,817	73,433	NE
WBZ	Saint-Anicet	R	45,117	74,283	SW
WVY	Sainte-Françoise	R	46,450	71,917	NE
LON	Longueuil (Curé Poirier)	U	45,514	73,486	MTL
BRO	Brossard(Parc Oc.)	SU	45,439	73,469	MTL
LAV	Laval (Aréna Chomedey)	U	45,547	73,747	MTL
REM	Saint-Rémi	R	45,205	73,644	SW
CHR	Charette	R	46,436	72,886	NE
ZEP	Saint-Zéphirin	R	46,042	72,660	NE
TIN	Tingwick	R	45,901	71,939	NE
SIM	Saint-Simon	R	45,709	72,835	NE
BOT	Jardin Botanique	U	45,557	73,574	MTL
ONT	Rue Ontario	U	45,522	73,558	MTL
AUT	Décarie-Duncan	U	45,502	73,656	MTL
MTN	Montréal-Nord (Parc Pilon)	U	45,587	73,636	MTL
PEL	Peel-Maisonneuve	U	45,501	73,575	MTL
VER	Verdun (St-Joseph)	U	45,472	73,575	MTL
ROX	Roxboro (4e Ave)	U	45,487	73,805	MTL
DOR	Dorval	SU	45,434	73,729	SW

3. Résultats à Saint-Anicet et L'Assomption

3.1 Séries temporelles de l'ozone au sol

La concentration de l'ozone de surface en fonction du temps est illustrée sur les figures 3.1a et 3.1b, qui comparent les quantités observées avec les valeurs prévues par le modèle CTM sur les grilles de 12 et 35 km à L'Assomption et Saint-Anicet. Les valeurs du modèle à chaque station ont été obtenues par interpolation linéaire des valeurs aux points de grille. On remarque que CTM reproduit bien les pics d'après-midi des 11 et 12 juin à L'Assomption. Cependant, le maximum du 10 juin prévu par le modèle ne s'est pas matérialisé dans les observations. Rappelons que du temps brumeux avec averses a prévalu cette journée-là et que CTM ne contient pas les processus de déposition humide ni de chimie en milieu aqueux. À Saint-Anicet, les résultats de CTM sur les deux grilles diffèrent sensiblement et on note que les observations se situent en général entre les deux solutions durant les après-midi. Cependant, la solution sur la grille de 12 km est plus près des observations durant la nuit.

3.2 Distribution spatiale de l'ozone au sol

La distribution spatiale de la concentration d'ozone et des vents de surface d'après les modèles pour le 10 juin à 15h00 HAE (1900 TUC) est illustrée sur la figure 3.2a. On voit clairement le maximum prédit de 80 à 90 ppb dans la région de L'Assomption qui ne fut pas observé, possiblement à cause du temps nuageux avec averses qui a prévalu toute la journée.

Les figures 3.2b et 3.2c illustrent le maximum quotidien de la concentration d'ozone des 11 et 12 juin simulé par le modèle. Durant ces deux jours, le maximum observé dans la région de L'Assomption au nord-est de Montréal est bien simulé par le modèle.

Les figures 3.2a et 3.2c mettent en évidence un transport de polluants originaires des régions de New York et Philadelphie le long de la vallée de la rivière Hudson vers le nord, puis dans la vallée du Richelieu à l'est de Montréal dans des conditions de vents du sud. Le modèle indique que cet apport de polluants combiné avec l'apport de Montréal produit des concentrations élevées d'ozone dans la région de L'Assomption quand les vents sont du sud. L'analyse des observations à l'Assomption durant ESOM-MERMOZ 1996 appuie ce fait, les concentrations maximales d'ozone au sol étant observées par vents du sud-sud-est (Robichaud et Benjamin, 1998).

3.3 Séries temporelles des précurseurs de l'ozone

Les séries temporelles des oxydes d'azote NO, NO₂ et NO_x à L'Assomption sont illustrées sur les figures 3.3. Les résultats sur la grille fine sont les plus près des observations lorsque les concentrations sont basses. Cependant, les pics du petit matin observés les 11, 12 et 13 juin sont mieux captés par le modèle sur grille de 35 km.

Les figures 3.4a à 3.4f illustrent les concentrations de quelques composés organiques volatils mesurées à L'Assomption en comparaison avec les résultats de CTM sur les grilles de 12 et 35 km. Les résultats du modèle concordent avec les observations la plupart du temps à l'exception du méthyle-éthyle-cétone (MEK) pour lequel le modèle prédit des concentrations trop élevées. Des concentrations élevées de propane, de toluène et d'isoprène observées le 11 juin n'ont pas été simulées adéquatement par le modèle. La situation est bien spécifique pour

ce jour-là, les mesures de plusieurs composés, dont les trois mentionnés, se trouvant bien à l'écart des valeurs observées généralement durant tout l'été 1996 (A. Robichaud, communication personnelle). L'analyse des données de l'été 1996 à L'Assomption (Robichaud et Benjamin, 1998) révèle des concentrations de propane et de toluène 10 fois supérieures à la moyenne estivale ce jour-là, tandis que les concentrations d'isoprène étaient 3 fois plus élevées que la moyenne.

3.4 Concentration d'ozone à 125 et 400 mètres

Les figures 3.5a et 3.5b illustrent la concentration d'ozone à 125 mètres et à 400 mètres au-dessus du sol en fonction du temps à L'Assomption. Les valeurs du modèle à L'Assomption ont été obtenues par interpolation linéaire des valeurs aux points de grille, tout comme dans les séries temporelles des champs de surface. D'après la figure 3.5a, on constate que les concentrations d'ozone du modèle sont toujours trop élevées le matin à 125 mètres. Nous allons examiner ce fait plus en profondeur à la prochaine section (3.5). En revanche, l'après-midi, la solution sur la grille de 12 km est près des valeurs observées. À 400 mètres, la figure 3.5b indique que les valeurs du modèle sur grille de 12 km concordent mieux avec les observations, mais les concentrations simulées sont encore trop élevées le matin des 10 et 11 juin. Le 13 juin, le modèle nous indique une variation diurne notable à 400 mètres alors que les valeurs observées ne montrent aucune tendance associée à ce cycle quotidien.

3.5 Profil vertical de l'ozone à L'Assomption

Les profils verticaux des concentrations d'ozone à L'Assomption ont été obtenus des sondages par ballons captifs. La hauteur maximale pour laquelle nous avons des observations est d'environ 400 mètres au-dessus du sol. Quelques sondages sont disponibles les matins et quelques autres les après-midi entre le 10 et le 14 juin 1996. La figure 3.6 montre les données de neuf sondages côte-à-côte avec la structure verticale de l'ozone extraite des simulations du modèle CTM sur chacune des deux grilles. Les graphes indiquent qu'en général la concentration d'ozone est trop élevée dans le modèle, mais que la solution sur la grille de 12 km est la plus près des observations. Il sera intéressant de comparer le modèle avec les sondages effectués à Saint-Anicet afin de déterminer si le biais du modèle est aussi positif en amont de Montréal. Malheureusement, aucun sondage d'ozone n'est disponible à Saint-Anicet durant la période du 10 au 14 juin 1996. Cette analyse se fera lors d'un prochain projet, ce qui établira un niveau de confiance à associer à tout calcul de transport atmosphérique et de flux horizontal de l'ozone et de ses précurseurs sur le sud du Québec.

On note aussi sur la figure 3.6 que la couche de surface à l'intérieur de laquelle la concentration d'ozone demeure basse (e.g. sous 20 ppb) la nuit jusque tard le matin n'est pas assez profonde dans la simulation du modèle. Le 12 juin à 1100 TUC et le 13 juin à 1000 TUC, l'épaisseur observée de cette couche est d'environ 150 mètres alors que le modèle indique au plus 50 à 60 mètres. De plus, après 1200 TUC, cette couche disparaît complètement dans le modèle alors qu'elle continue d'être observée. Cette faiblesse du modèle est possiblement due au traitement de la couche limite dans le modèle météorologique MC2 et devrait être examinée plus en détail.

4. Comparaisons et statistiques

Nous allons comparer dans cette section les concentrations d'ozone obtenues du réseau de mesure en surface avec les simulations du modèle. Les valeurs du modèle aux points de grille ont été interpolées linéairement aux coordonnées des stations énumérées dans le tableau 2.1. Les comparaisons seront compilées en prenant toutes les stations ensemble puis en les séparant en trois sous-régions.

4.1 Erreur absolue et biais du modèle

La figure 4.1 illustre le biais moyen du modèle (valeur prédite moins valeur observée) et l'erreur absolue moyenne sur les deux grilles en utilisant toutes les valeurs horaires de concentrations d'ozone. On compare aussi sur cette figure les valeurs horaires durant le jour entre 7h00 et 20h00 HAE pour vérifier l'habileté du modèle à simuler la production photochimique d'ozone. On constate à l'examen de la figure que la solution du modèle sur la grille de 12 km a le plus petit biais et la plus petite erreur absolue pour toutes les régions, que ce soit pour la journée entière ou pour le jour seulement. Le biais moyen est positif et varie entre 3 et 7 ppb et l'erreur absolue moyenne varie entre 12 et 15 ppb. Le biais et l'erreur du modèle sont quelque peu plus élevés en prenant les valeurs de jour seulement qu'en prenant toutes les 24 heures, ce qui indique qu'il surestime possiblement la production photochimique d'ozone.

La figure 4.2 compare le maximum quotidien prévu et observé par sous-région. Les deux sous-régions rurales, en amont et en aval de Montréal, sont comparées séparément puis prises ensemble. Ce test n'est pas synchronisé dans le temps ni dans l'espace. Pour une journée donnée, la valeur maximale observée à l'intérieur d'une sous-région est comparée au maximum prévu par le modèle pour cette même journée parmi toutes les stations de la sous-région. Encore une fois, on constate que le modèle sur la grille fine obtient les meilleurs résultats pour toutes les sous-régions, avec une erreur absolue de 14 ppb et un biais positif de 11 ppb. Le biais et l'erreur du modèle sur la grille fine montrent peu de variation d'une sous-région à l'autre, à la différence de la solution sur la grille grossière où l'erreur pour la sous-région du sud-ouest est clairement plus élevée que pour la sous-région du nord-est.

4.2 Distribution de fréquence et 90ième percentile

La distribution de fréquence des concentrations d'ozone au sol est illustrée sur la figure 4.3. Le graphe du haut montre les données pour les 10 stations rurales seulement et celui du bas inclut les données de toutes les 20 stations. À l'examen des graphes, on note que pour la période à l'étude le modèle ne prédit pas assez souvent les basses concentrations (sous 20 ppb) et prédit trop souvent les concentrations élevées (au-delà de 60 ppb). Les solutions du modèle sur les deux grilles sont similaires au centre de la distribution (20-60 ppb), mais la grille de 12 km donne de meilleurs résultats que la grille de 35 km aux deux extrémités de la distribution.

L'analyse du rang percentile se veut un complément à l'analyse de la distribution de fréquence. Le 90ième percentile indique la valeur de la concentration sous laquelle 90 pour-cent des valeurs sont observées ou prédites. La figure 4.4 montre le 90ième percentile de la concentration d'ozone observée et prédite pour chacune des sous-régions. Dans les deux sous-régions rurales, le graphe indique que 10 pour-cent des observations sont au-dessus de 48 ppb tandis que le modèle donne une valeur de 52 à 56 ppb sur la grille fine et près de 70

ppb sur la grille grossière. On en conclut que le modèle prédit trop souvent des concentrations élevées, mais que la solution sur la grille de 12 km est plus près des observations que celle sur la grille de 35 km.

4.3 Indice SUM60

L'indice SUM60 a été développé afin d'évaluer les dommages subits par la végétation en raison des concentrations d'ozone supérieures à 60 ppb, mais est aussi utilisé comme indicateur des effets potentiels des concentrations élevées d'ozone. Cet indice est défini comme la somme de toutes les concentrations horaires au-dessus de 60 ppb à l'intérieur d'un intervalle de temps. Dans notre cas, la sommation a été effectuée à l'intérieur de la période du 8 juin à 0000 TUC jusqu'au 14 juin à 2400 TUC. Le biais moyen et l'erreur absolue moyenne du modèle dans l'estimation de l'indice SUM60 sont illustrés sur la figure 4.5. Le biais est positif comme anticipé. La solution du modèle sur la grille de 12 km génère un indice qui a définitivement la plus faible erreur, de l'ordre de huit fois inférieure à l'erreur de la solution sur la grille de 35 km.

5. Conclusion

En se basant sur les résultats de la période du 8 au 14 juin 1996, cette étude a démontré que le modèle CTM reproduit les caractéristiques principales de la concentration d'ozone et des oxydes d'azote précurseurs. Les sorties du modèle ont été comparées aux mesures en surface et en altitude prises lors de la campagne ESOM-MERMOZ de l'été 1996. Les observations d'ozone au sol d'un réseau de 20 stations ont été utilisées pour calculer les statistiques. Nous avons aussi analysé les précurseurs de l'ozone et les profils verticaux mesurés à L'Assomption.

Durant la période du 8 au 14 juin 1996, le modèle surestime en général la concentration d'ozone au sol sur le sud du Québec, que ce soit sur la grille fine ou la grille grossière. Le modèle surestime aussi la concentration d'ozone à tous les niveaux jusqu'à 400 mètres à L'Assomption. La solution du modèle sur la grille fine est la plus près des observations au sol, le biais moyen étant trois fois plus petit et l'erreur absolue moyenne 25 pour-cent plus petite que ceux de la solution sur la grille grossière.

Nous avons noté une faiblesse dans le traitement de la couche de surface par le modèle. Durant la nuit la profondeur de la couche de faible concentration d'ozone est trop petite et cette couche disparaît trop tôt le matin. Le problème pourrait résider dans le traitement de la couche limite du modèle météorologique MC2, mais ceci reste à vérifier.

Les graphes de distribution de fréquence indiquent que le modèle prédit trop souvent des concentrations d'ozone au sol supérieures à 40 ppb, la solution sur la grille de 12 km de résolution étant toutefois clairement plus près des observations.

Dans ce rapport, nous avons souligné quelques points à améliorer :

- 1- Incorporation du transport à grande distance des polluants provenant de l'extérieur du domaine lors des intégrations sur la grille fine;
- 2- Utilisation d'inventaires d'émissions plus récents et de meilleure qualité;
- 3- Intégration du modèle sur une plus longue période de temps afin de couvrir une plus grande panoplie de conditions météorologiques;

4- Analyse plus détaillée des profils verticaux de l'ozone et des variables météorologiques en utilisant les observations de Saint-Anicet et L'Assomption.

À la lumière des résultats obtenus, nous recommandons de poursuivre l'utilisation des modèles à haute résolution pour les enjeux régionaux, et que d'autres simulations et comparaisons soient faites sur des périodes plus longues et pour d'autres épisodes.

6. Remerciements

Les auteurs de cette étude tiennent à remercier le programme scientifique des NO_x et des COV pour son appui financier. Un merci particulier à S. Venkatesh pour nous avoir alloué les ressources nécessaires à l'utilisation de MC2 sur le super-ordinateur du CMC ainsi qu'à Jocelyn Mailhot, Robert Benoit et Michel Desgagné de RPN pour leur support et formation à l'utilisation de MC2. Les observations des stations de la Communauté Urbaine de Montréal ont été fournies par Claude Gagnon et celles des stations rurales du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec par Richard Leduc. Tom Dann d'Environnement Canada a fourni les analyses de COV et d'aldéhydes à L'Assomption. Des remerciements sont également adressés à Alain Robichaud pour l'information et le calcul des indices SUM60. Les auteurs voudraient finalement remercier Marc Beauchemin pour sa contribution à la révision du texte et les commentaires qu'il nous a fournis.

RÉFÉRENCES

- Benoit, R., M. Desgagné, P. Pellerin, S. Pellerin, Y. Chartier et S. Desjardins. 1997. "The Canadian MC2: A Semi-Lagrangian, Semi-Implicit Wideband Atmospheric Model Suited for Finescale Process Studies and Simulation". *Monthly Weather Review*, vol. 125, p. 2382-2415.
- Lurmann, F. W., A. C. Lloyd et R. Atkinson. 1986. "A Chemical Mechanism for Use in Long-Range Transport/Acid Deposition Computer Modeling". *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, no. D10, p. 10905-10936.
- MacDonald, A. M., C. M. Banic, W. R. Leitch et K. J. Puckett. 1993. "Evaluation of the Eulerian Acid Deposition and Oxidant Model (ADOM) with Summer 1988 Aircraft Data". *Atmospheric Environment*, vol. 27A, p. 1019-1034.
- Pudykiewicz, J. A., A. Kallaur et P. K. Smolarkiewicz. 1997. "Semi-Lagrangian modelling of tropospheric ozone". *Tellus*, vol. 49B, p. 231-248.
- Robichaud, A. et M. Benjamin. 1998. "Analyse statistique multivariée des données de surface à la station de L'Assomption (ESOM-96)". Rapport interne, Direction de l'environnement atmosphérique, région du Québec, mai 1998. (Disponible auprès de : Mario Benjamin, Environnement Canada, 100 Alexis-Nihon, 3e étage, Saint-Laurent, Canada H4M 2N8; courriel : mario.benjamin@ec.gc.ca)
- Tanguay, M., A. Robert et R. Laprise. 1990. "A semi-implicit semi-Lagrangian fully compressible regional forecast model". *Monthly Weather Review*, vol. 118, p. 1970-1980.

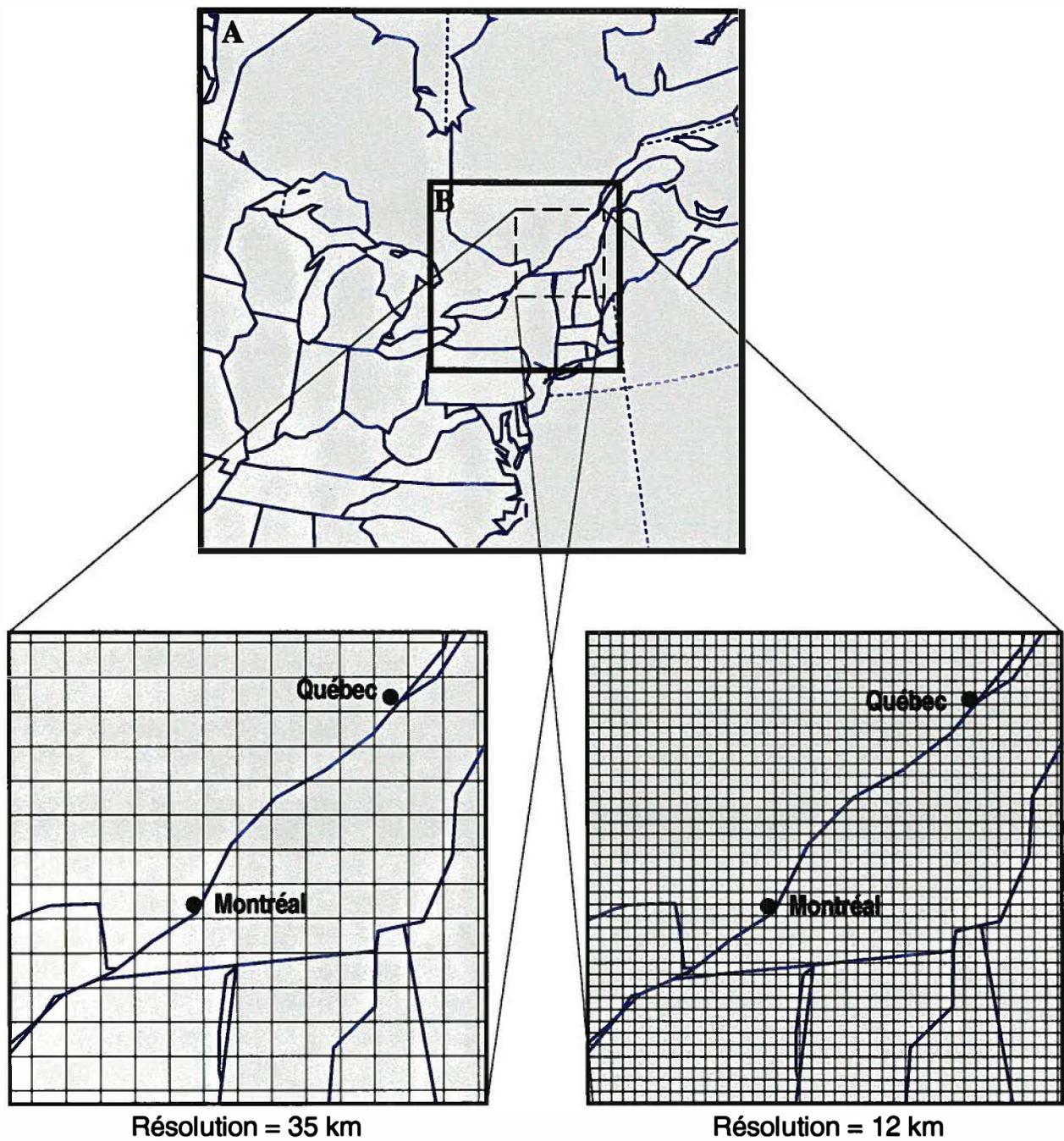


Figure 2.1 La figure du haut illustre le domaine libre de la grille de MC2 d'une taille de 80 par 80 points. A: la grille grossière de résolution 35 km; B: la grille fine de résolution 12 km. Les figures du bas montrent les détails de la grille aux deux résolutions sur le sud du Québec.

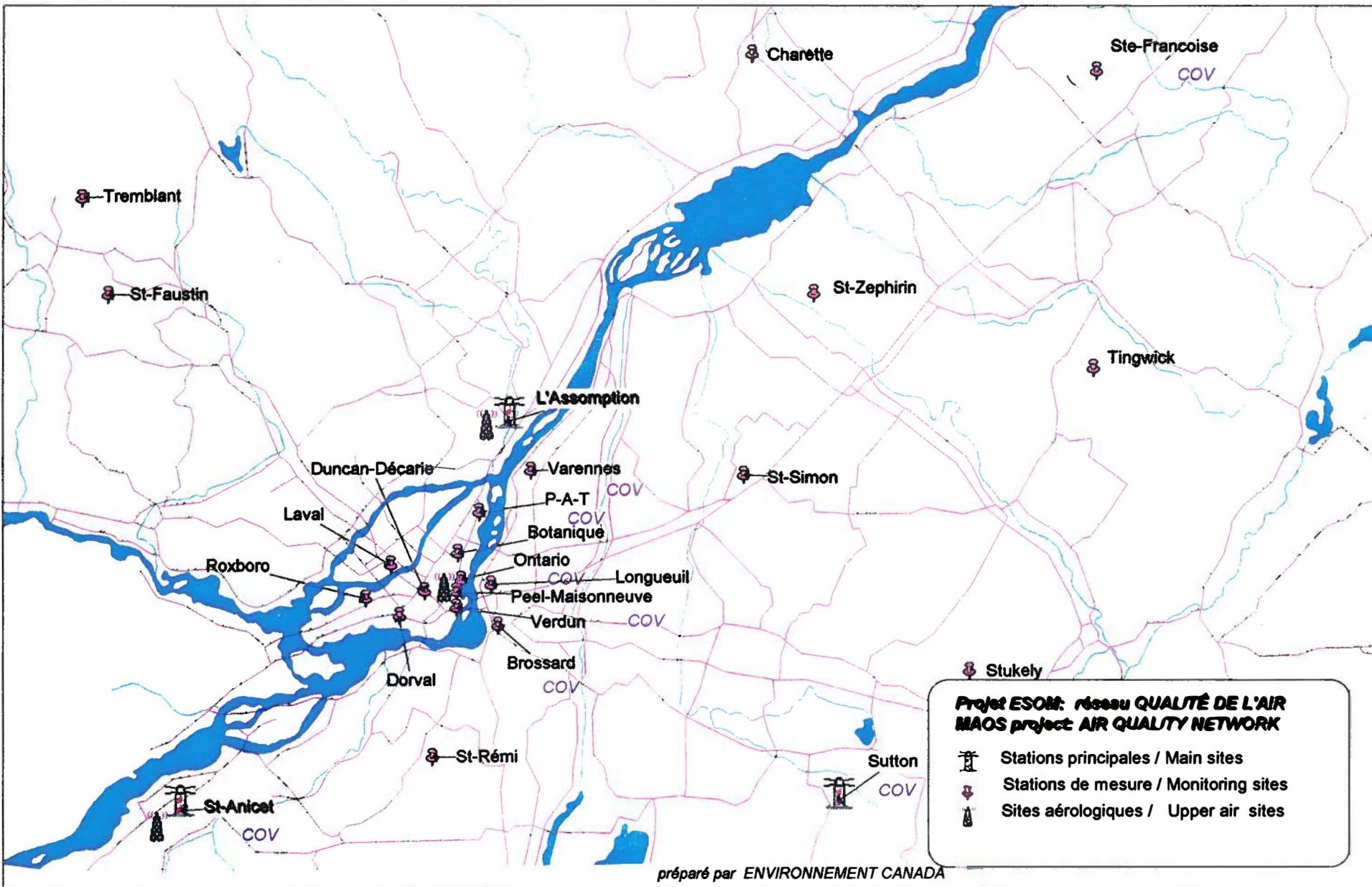
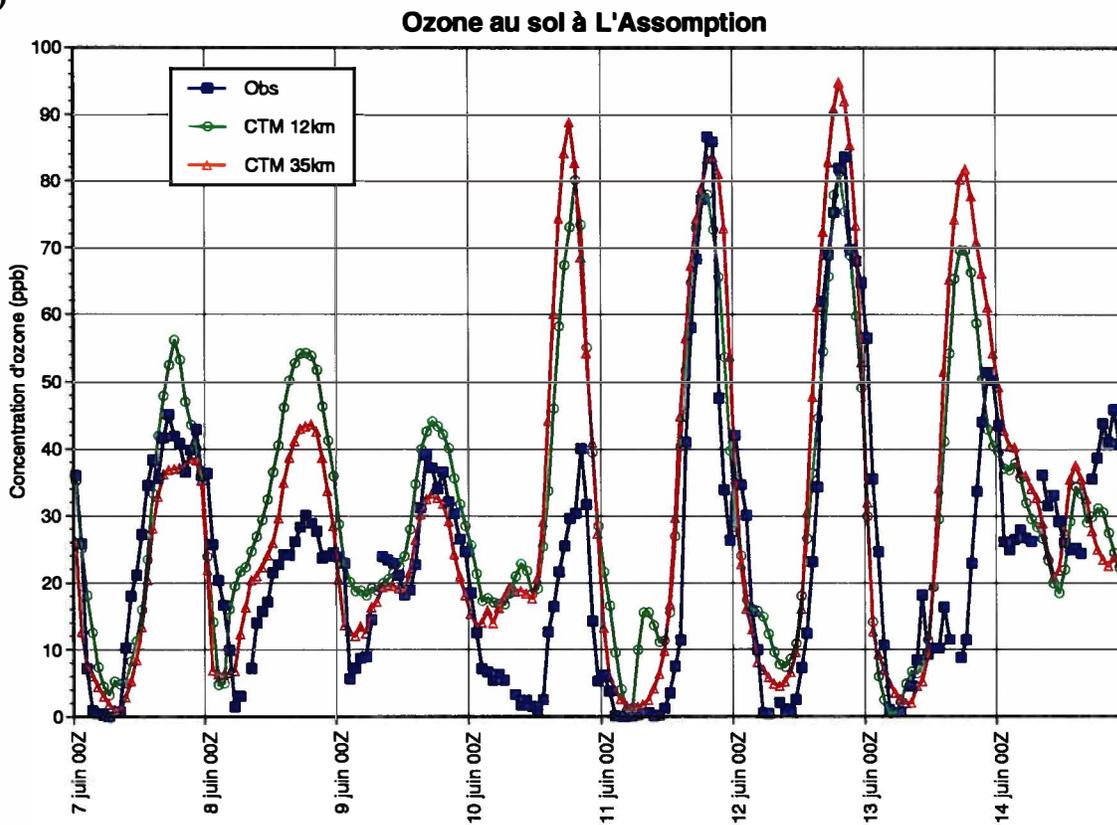


Figure 2.2

(a)



(b)

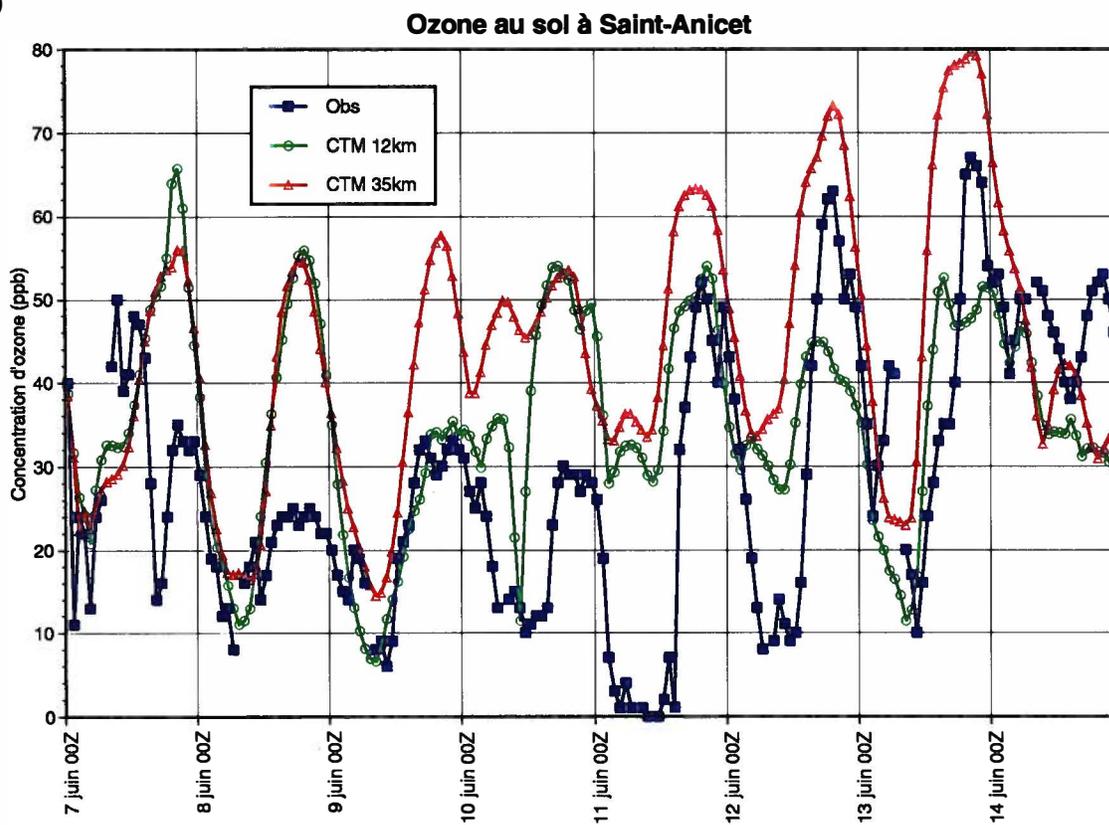


Figure 3.1 Séries temporelles de la concentration d'ozone au sol à L'Assumption (a) et à Saint-Anicet (b).

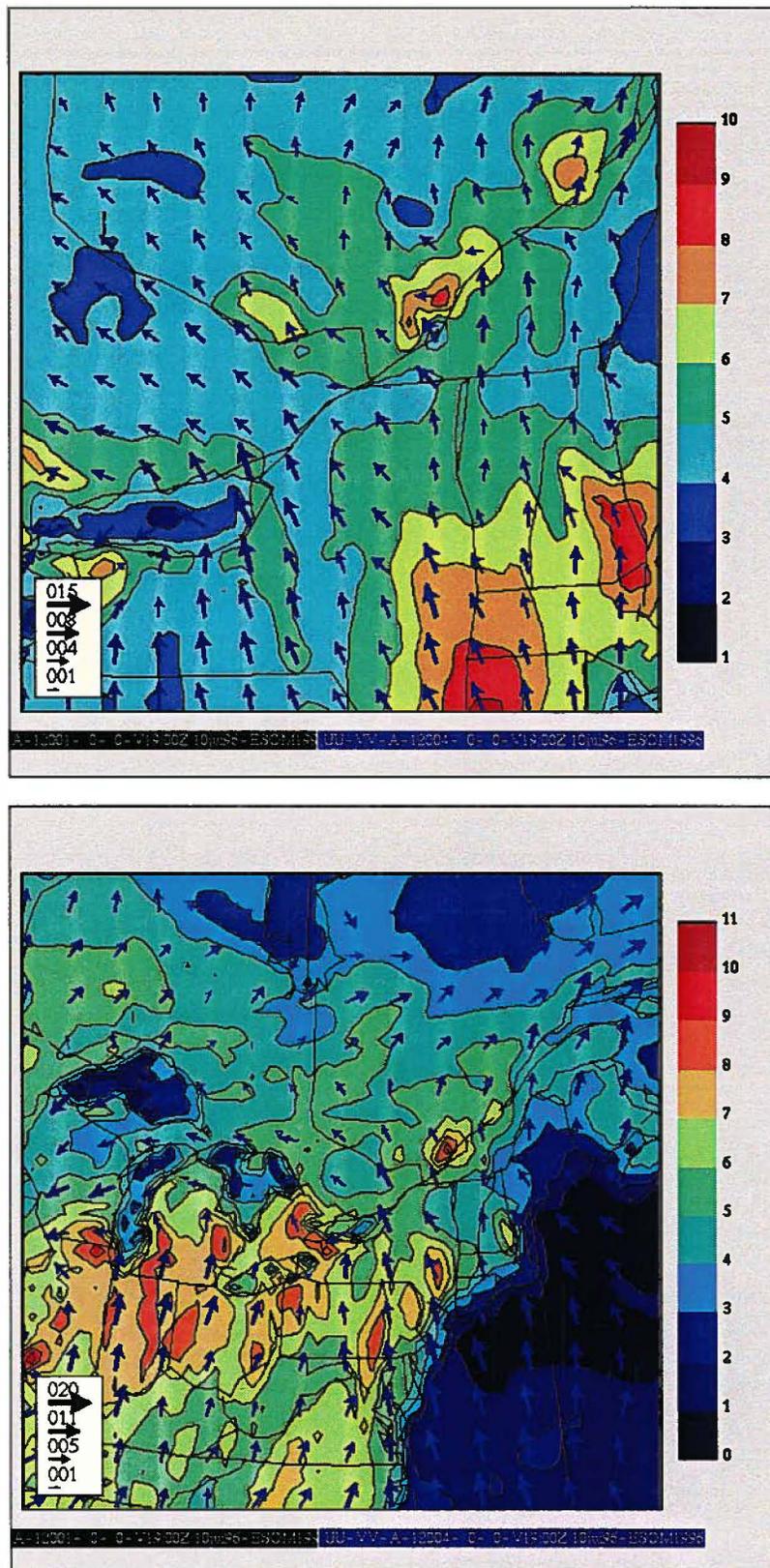


Figure 3.2a Champs de surface de concentration d’ozone et de vent valides le 10 juin à 15h00 HAE (1900 TUC) prédits par MC2/CTM. La figure du haut est la solution sur la grille de 12 km de résolution et la figure du bas est celle sur la grille de 35 km de résolution. Les unités de concentration d’ozone sur les figures sont des dizaines de ppb (10 ppb).

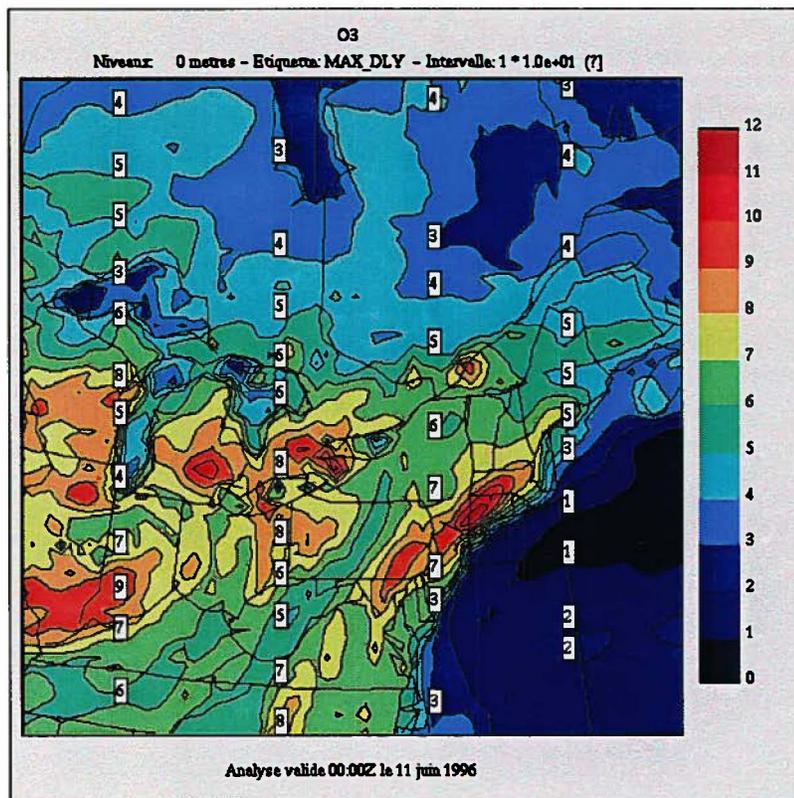
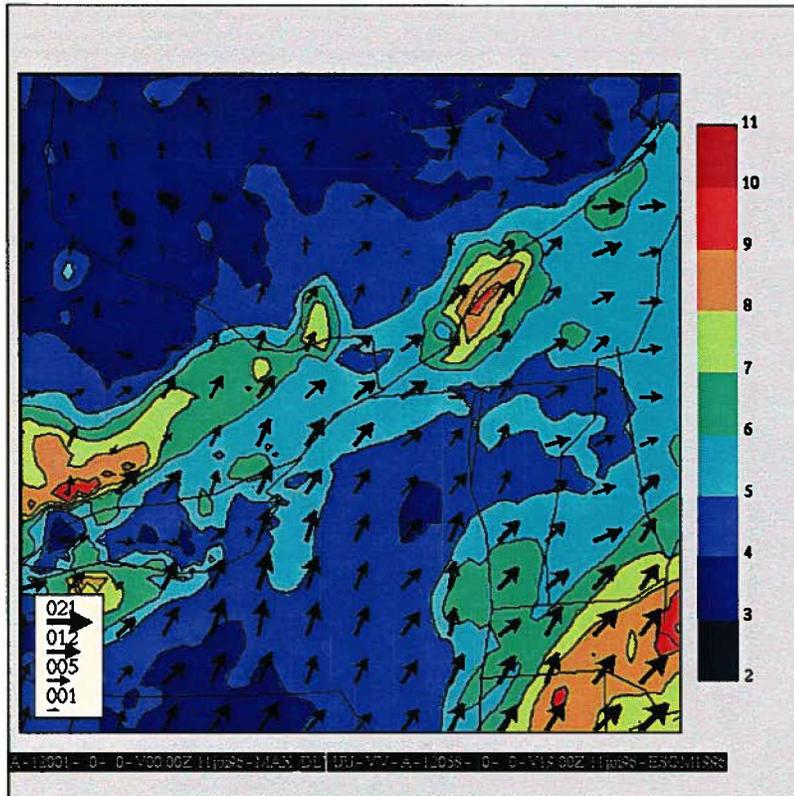


Figure 3.2b Concentration maximale d'ozone au sol prédite par le modèle pour le 11 juin 1996 sur la grille fine (haut) et sur la grille grossière (bas). Les unités de concentration d'ozone sur l'échelle de droite sont des dizaines (10) de ppb. Les vents du modèle au niveau 300 mètres à 15h00 ont été superposés au champ d'ozone sur la figure du haut.

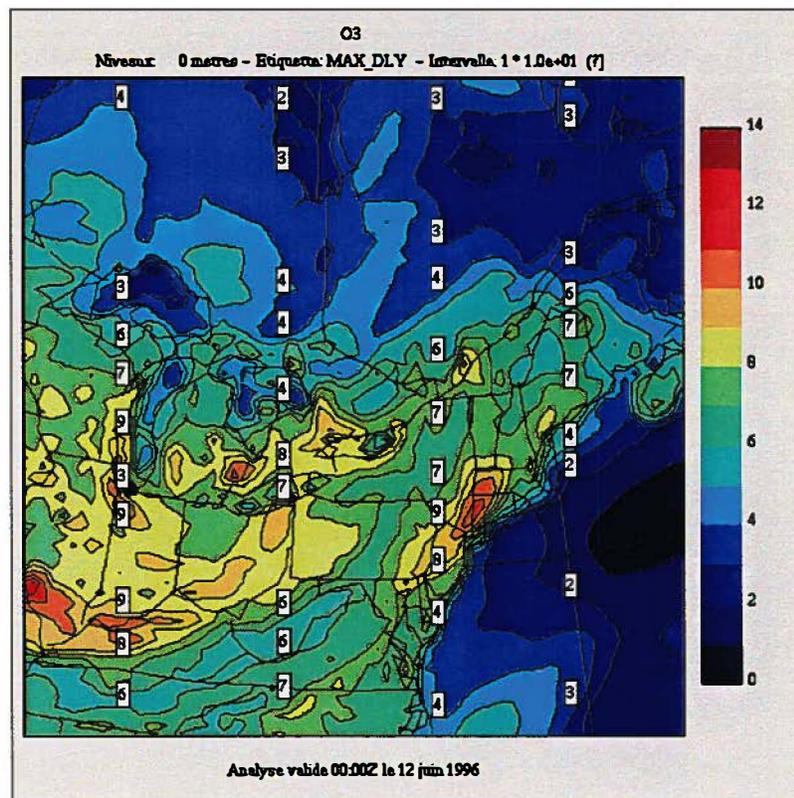
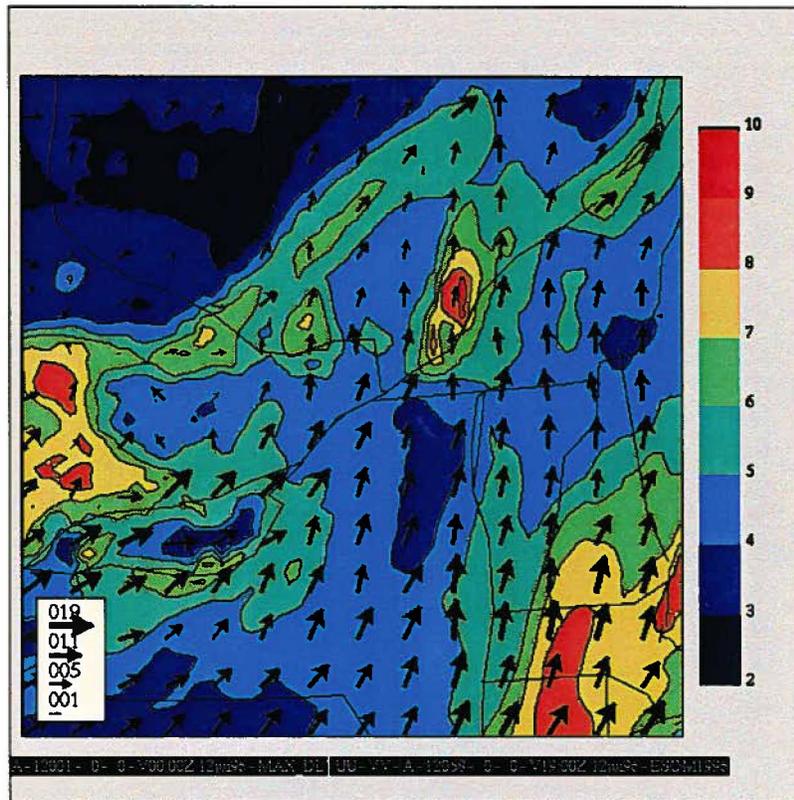


Figure 3.2c Concentration maximale d’ozone au sol prédite par le modèle pour le 12 juin 1996 sur la grille fine (haut) et sur la grille grossière (bas). Les unités de concentration d’ozone sur l’échelle de droite sont des dizaines (10) de ppb. Les vents du modèle au niveau 300 mètres à 15h00 ont été superposés au champ d’ozone sur la figure du haut.

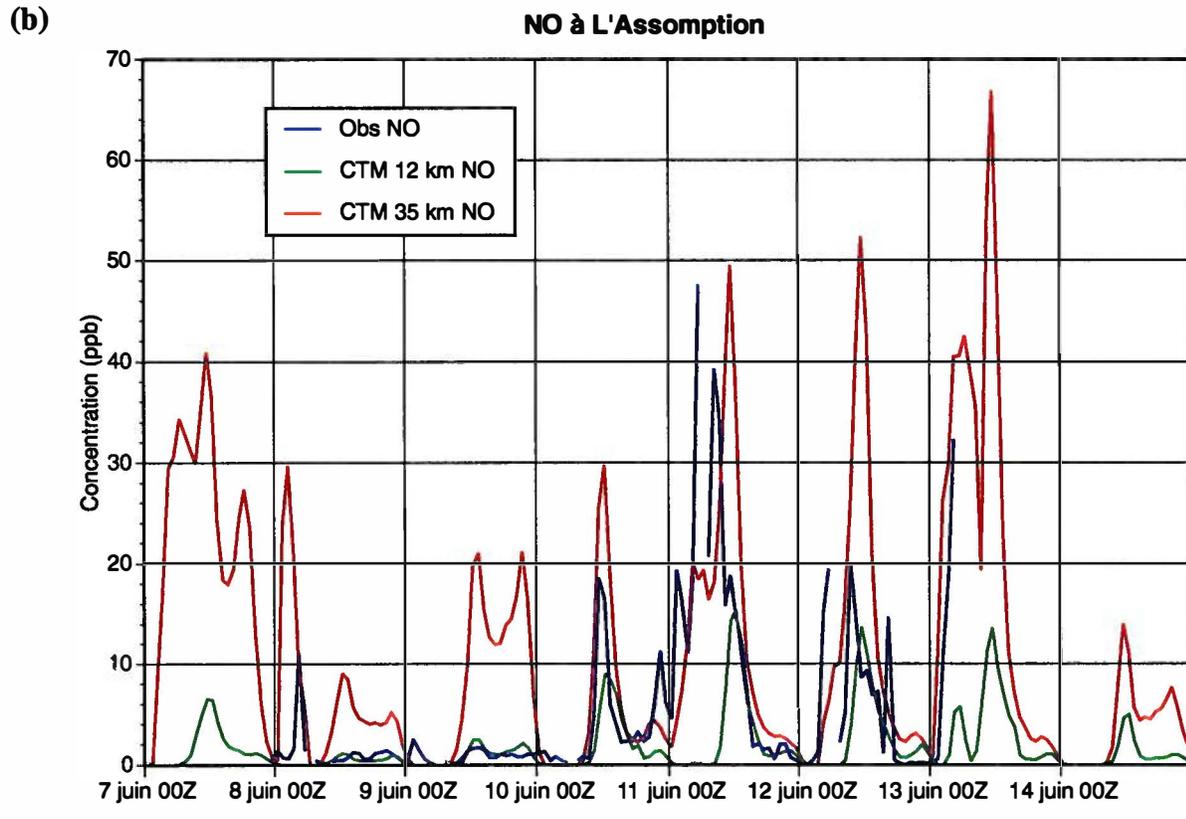
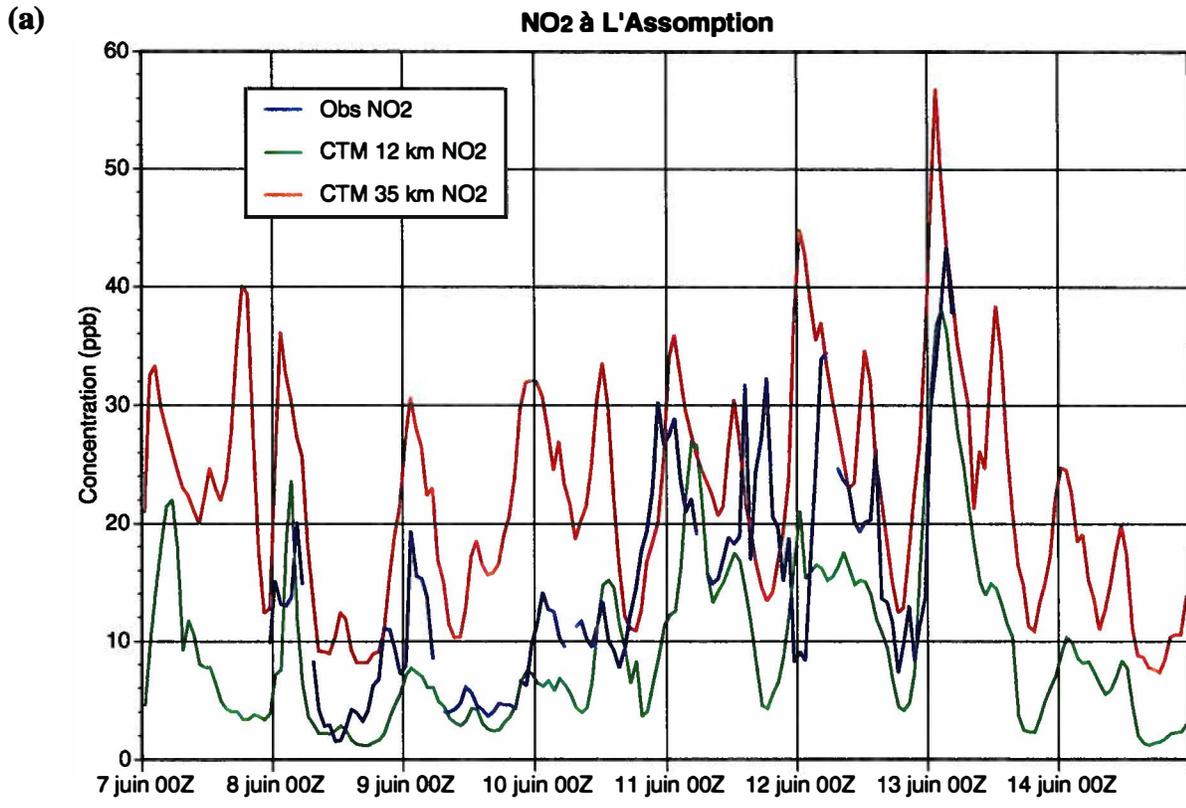


Figure 3.3 Séries temporelles de la concentration des oxydes d'azote à L'Assomption, (a) NO₂, (b) NO et (c) NO_x (page suivante).

(c)

NO_x à L'Assomption

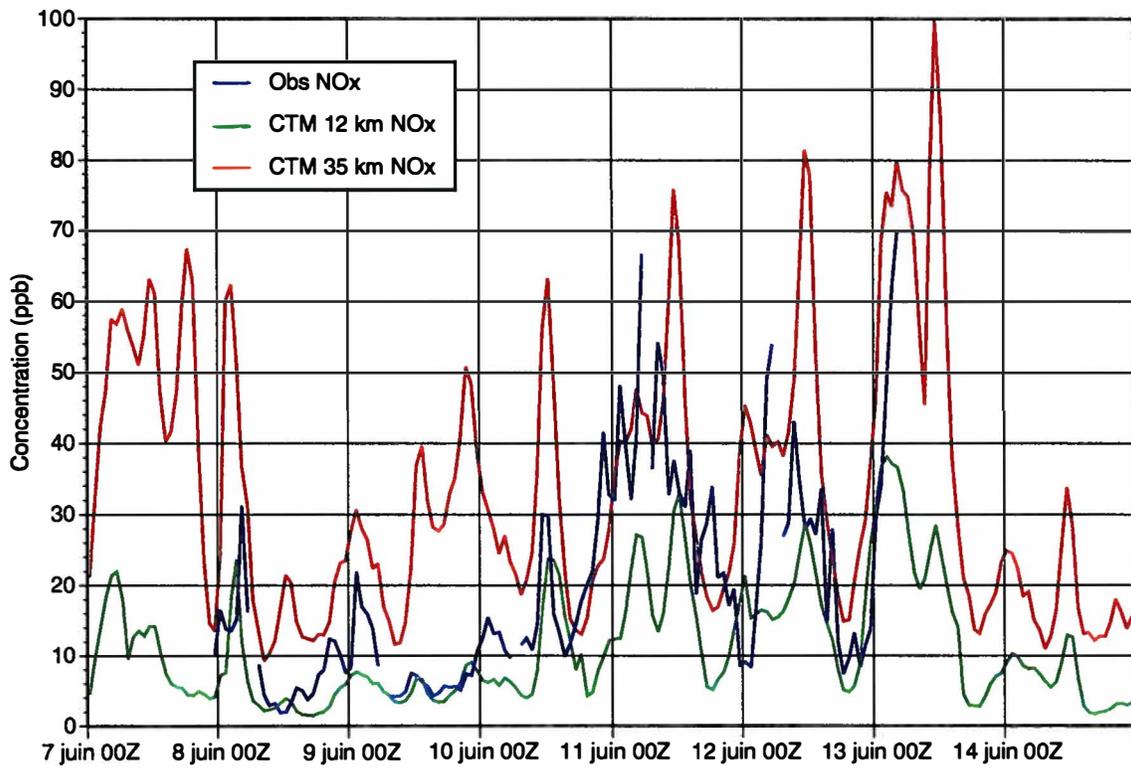


Figure 3.3c Série temporelle de la concentration des NO_x à L'Assomption.

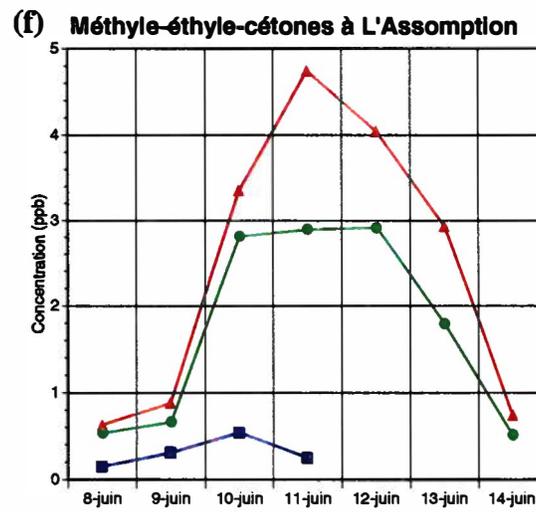
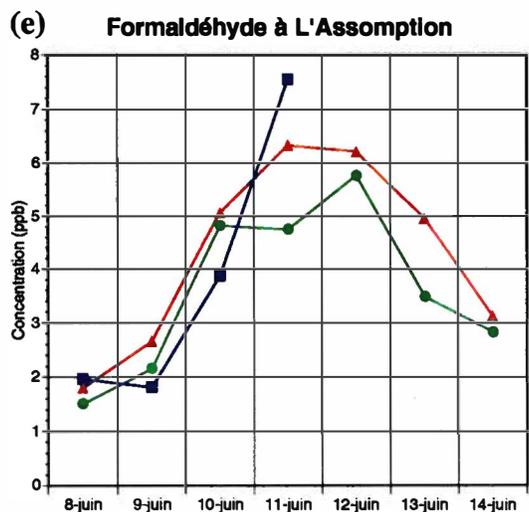
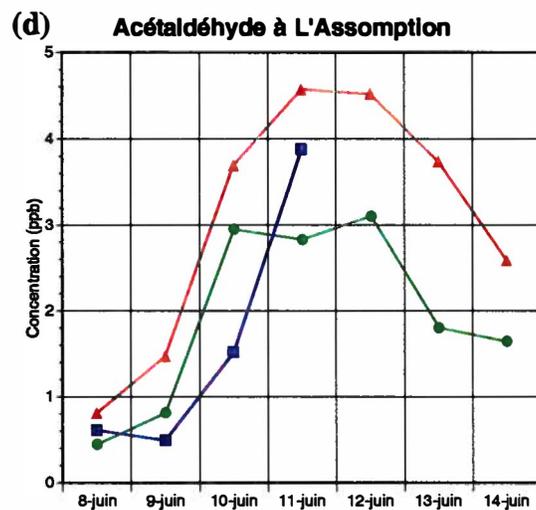
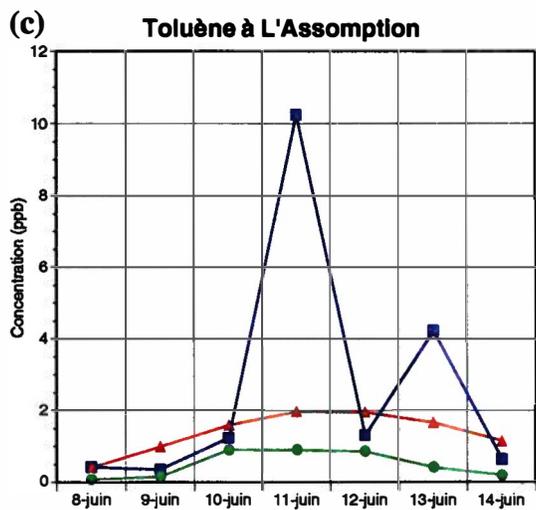
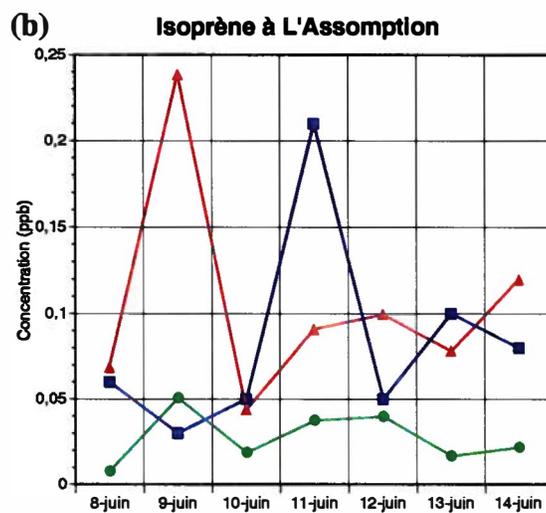
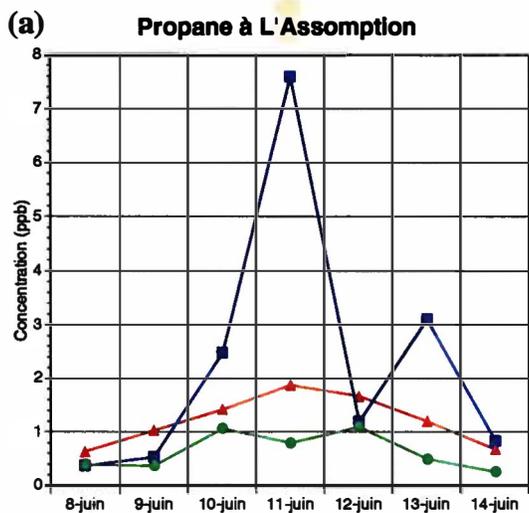
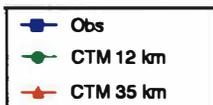


Figure 3.4 Comparaison entre les valeurs observées de certains COV à L'Assomption et les valeurs du modèle.

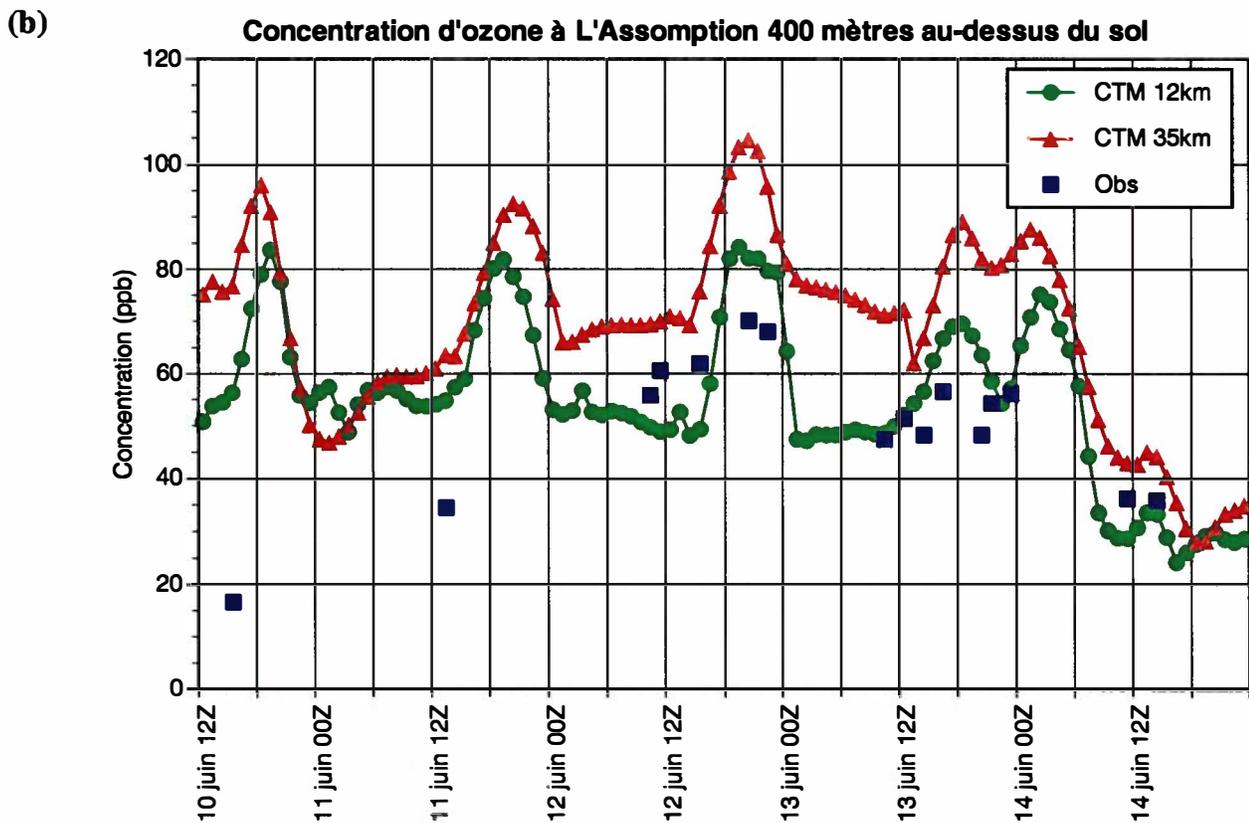
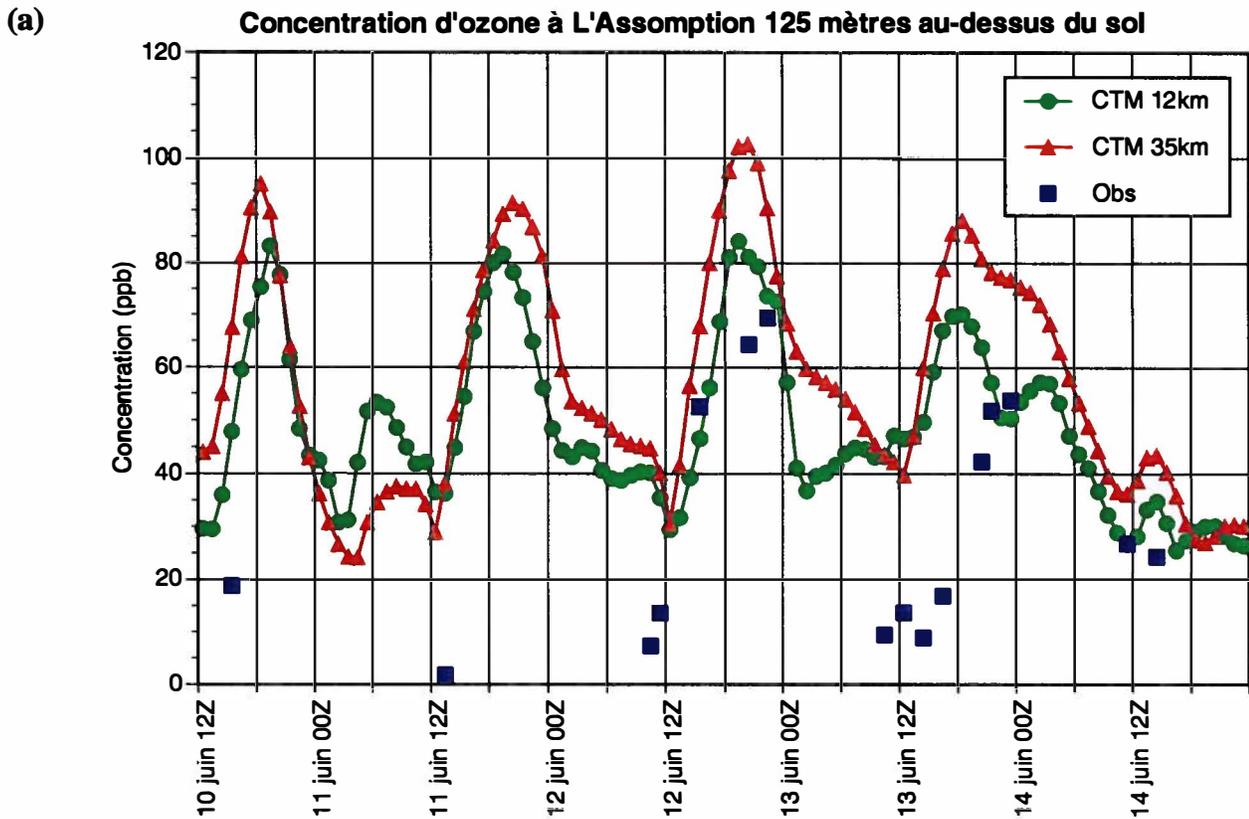


Figure 3.5 Séries temporelles de la concentration d'ozone à L'Assomption (a) 125 mètres au-dessus du sol et (b) 400 mètres au-dessus du sol.

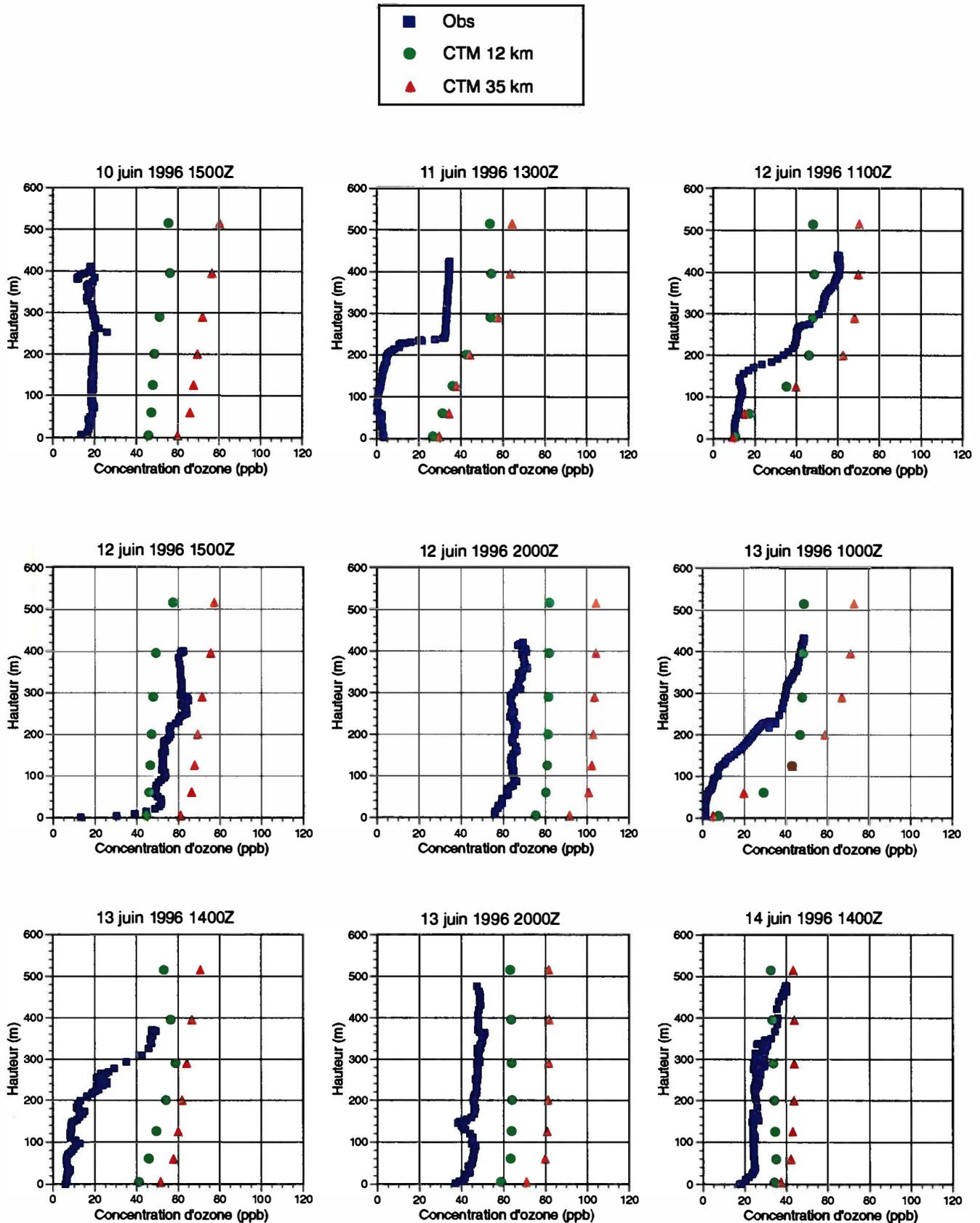


Figure 3.6 Profils verticaux de la concentration d'ozone à L'Assomption obtenus des sondages par ballons captifs en matinée et en après-midi entre le 10 et le 14 juin 1996.

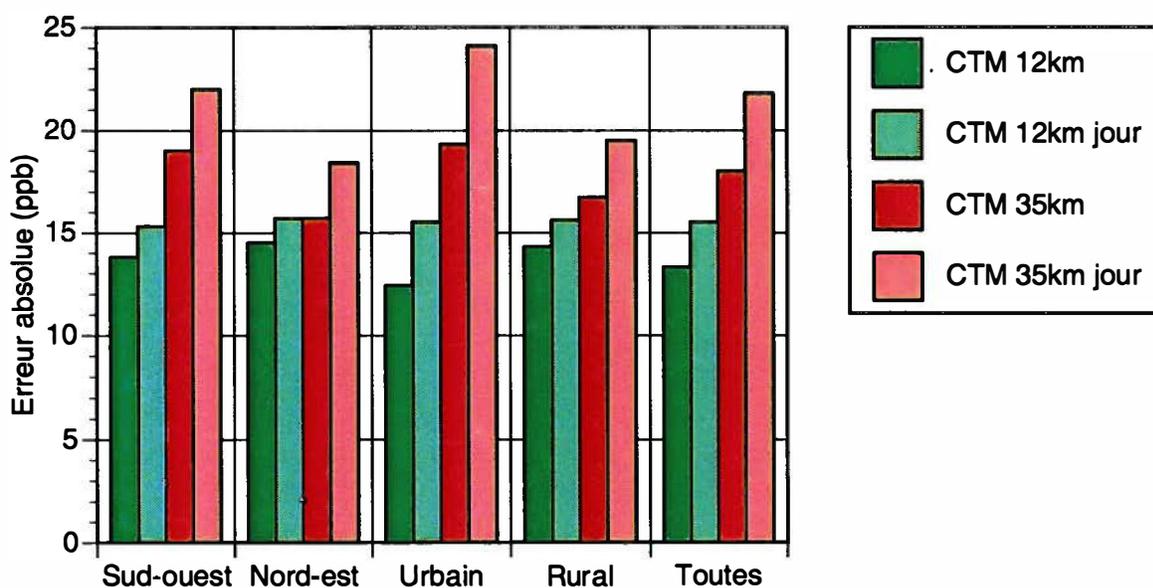
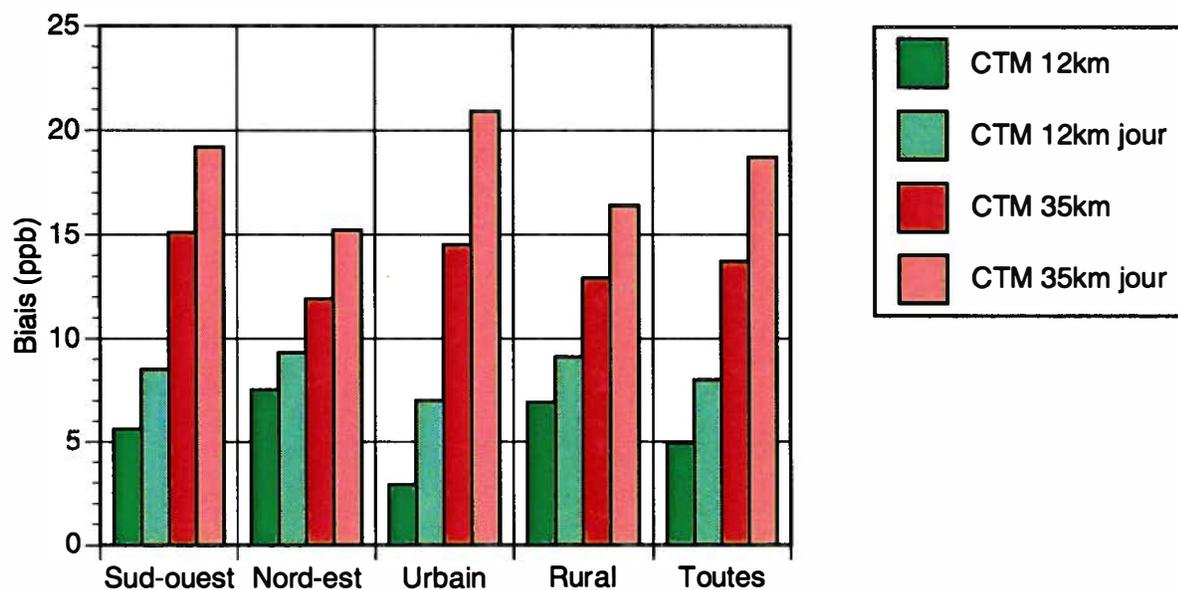


Figure 4.1 Erreur moyenne du modèle pour chaque sous-région calculée avec toutes les heures d'observations (excepté pour les statistiques de jour où seulement les heures entre 7h00 et 20h00 sont utilisées). La région rurale est l'ensemble des sous-régions nord-est et sud-ouest. La figure du haut illustre le biais moyen du modèle et la figure du bas l'erreur absolue moyenne.

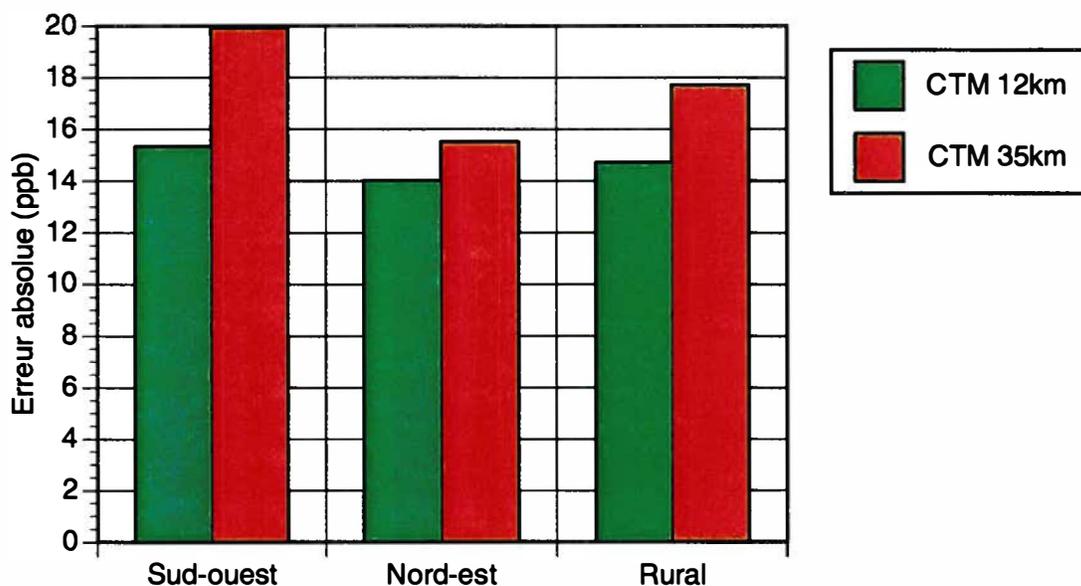
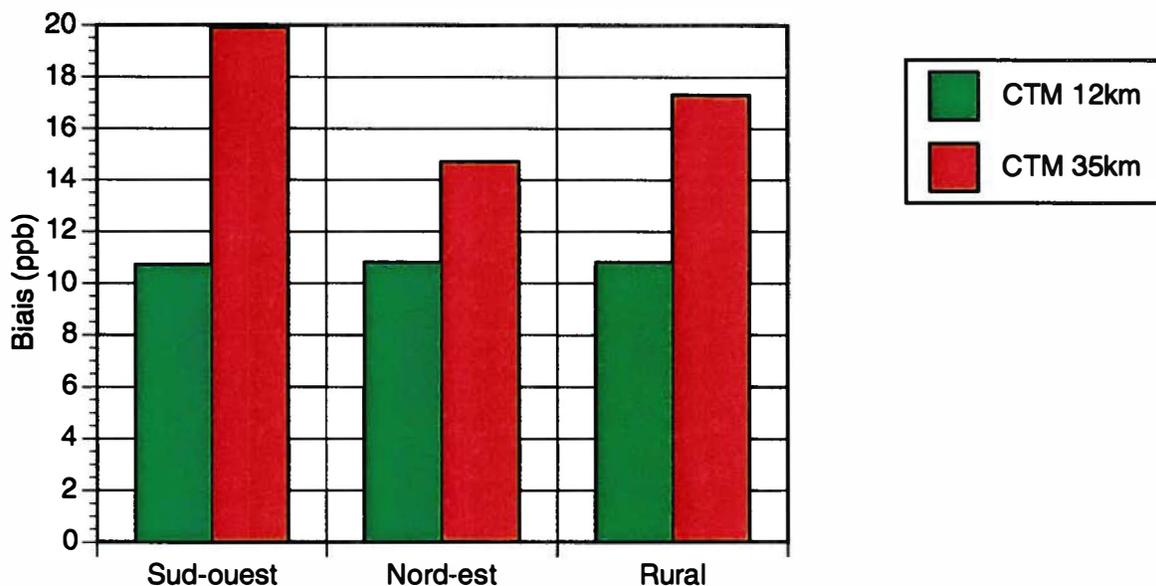


Figure 4.2 Erreur moyenne du modèle dans la prédiction du maximum quotidien d’ozone pour chacune des deux sous-régions rurales. Pour une journée et une sous-région donnée, la concentration maximale observée à l’intérieur de cette sous-région est comparée à la concentration maximale prédite par le modèle dans la même sous-région, peu importe si l’heure ou la station coïncident. La figure du haut illustre le biais moyen du modèle et la figure du bas l’erreur absolue moyenne.

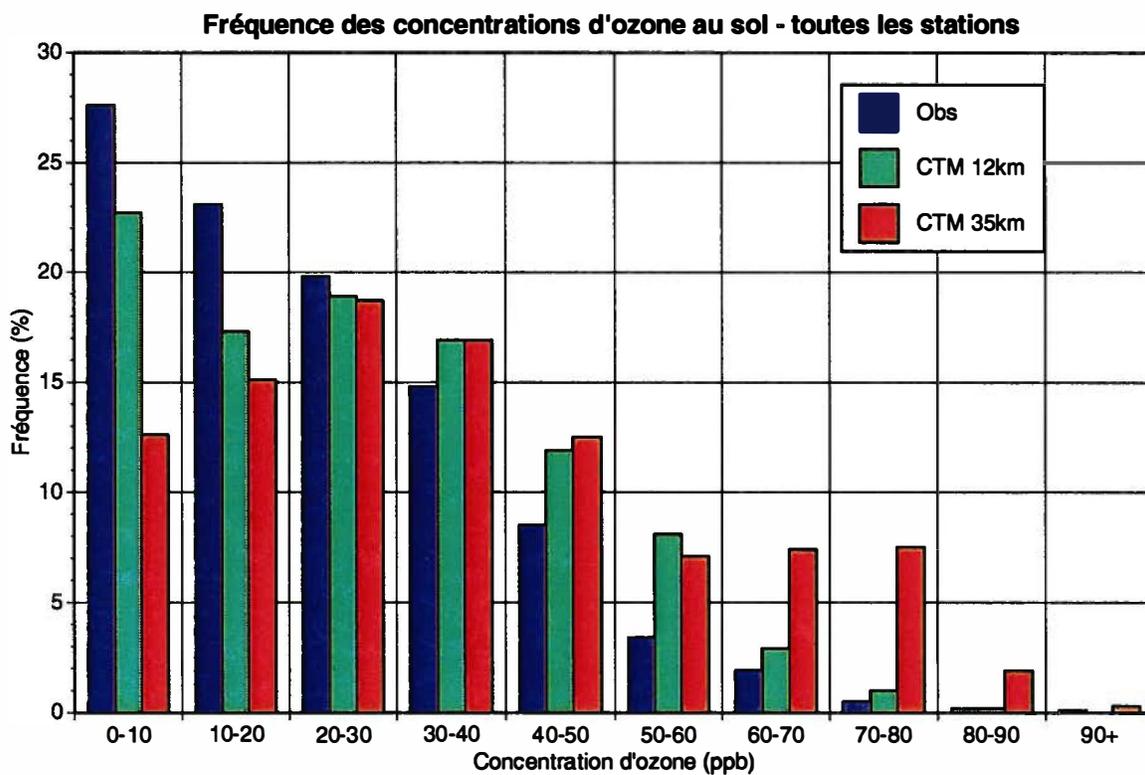
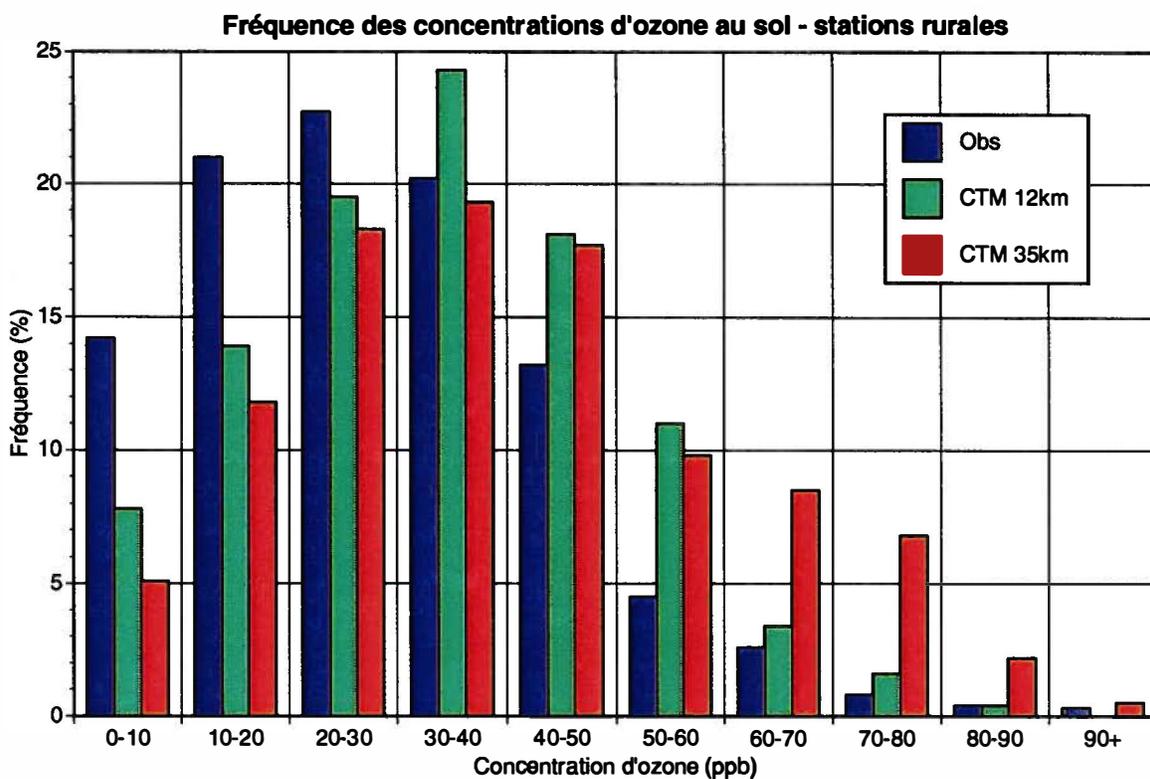


Figure 4.3 Distribution de fréquence de la concentration d'ozone obtenue des valeurs horaires observées et des valeurs prédites par le modèle. Haut: stations non urbaines seulement (10 stations, sous-régions SW et NE). Bas: toutes les 20 stations.

90ième percentile de la concentration d'ozone par région

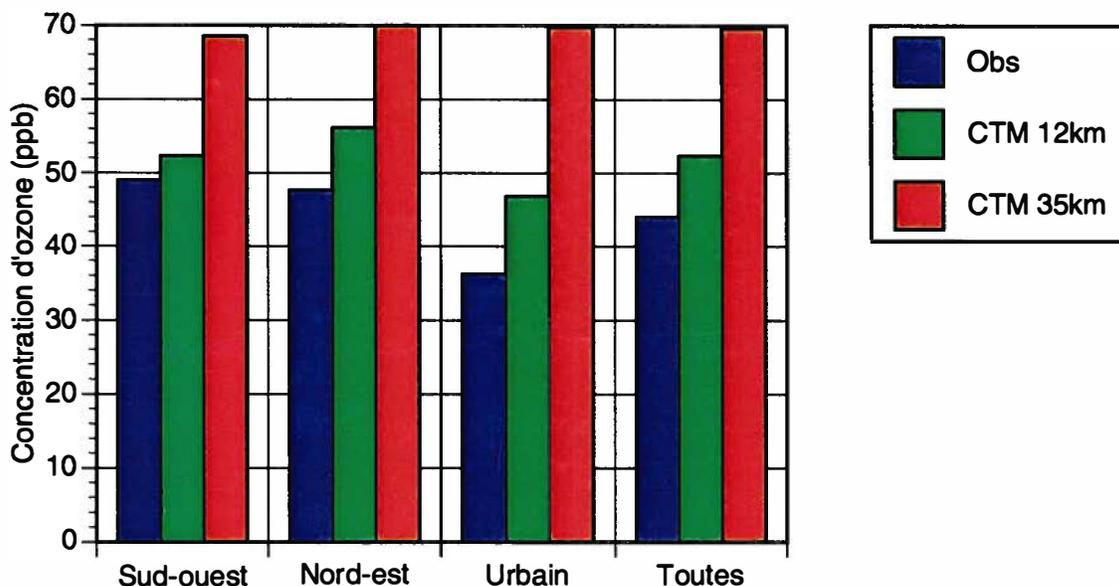


Figure 4.4 90ième percentile de la concentration d'ozone, toutes heures incluses, d'après les observations et d'après le modèle sur chacune des deux grilles. Le 90ième percentile correspond à la concentration sous laquelle 90 pour cent des observations, ou des prédictions selon le cas, se situent.

Calcul de SUM60 : biais et erreur absolue du modèle

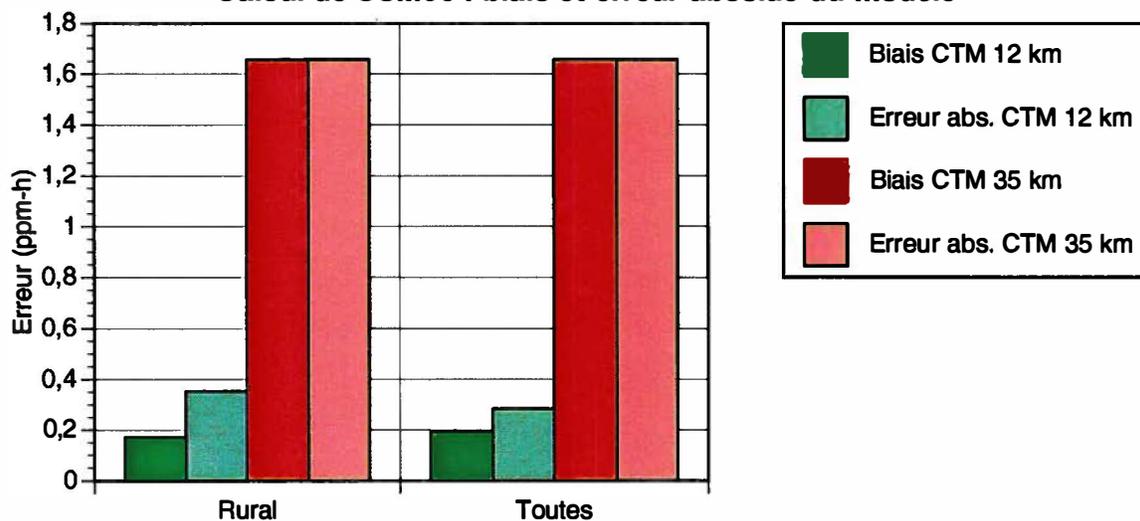


Figure 4.5 Biais moyen et erreur absolue moyenne du modèle dans le calcul de l'indice SUM60. Le biais et l'erreur ont été calculés en utilisant d'abord les 10 stations des deux sous-régions rurales, puis toutes les 20 stations du réseau. La sommation pour l'indice SUM60 a été calculée sur une période de sept jours, du 8 juin au 14 juin 1996.