

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université des Sciences et de la Technologie d'Oran  
Mohamed Boudiaf

Faculté de Chimie  
Département de Génie des matériaux

Spécialité : **Chimie**

Option : **Chimie**

## THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Présentée par: **RAHAL Farid**

**Modélisation et simulation de la pollution atmosphérique.  
Le cas de la région d'Alger.**

Soutenue le 15 Avril 2015

Devant le jury composé de:

- |                      |                                 |              |
|----------------------|---------------------------------|--------------|
| • HADJEL Mohamed     | Professeur, USTO-MB             | Président    |
| • BENHARRATS Nassira | Professeur, USTO-MB             | Rapporteur   |
| • HAMOU Ahmed        | Professeur, Univ. d'Oran        | Examineur    |
| • BOUZIANI Mustapha  | Professeur, Univ. d'Oran        | Examineur    |
| • ABDELMALEK Fatiha  | Professeur, Univ. de Mostaganem | Examinatrice |
| • ABDERRAHIM Hamza   | M.C B , IHFR Oran               | Invité       |

Année universitaire : 2014 - 2015



## Dédicace.

اللَّهُ وَالصَّالِحِينَ، رَحْمَةُ اللَّهِ

## Remerciements.

Mes premiers remerciements vont à mon Directeur de thèse, le Professeur Nassira BENHARRATS pour avoir dirigé ce travail, pour ses qualités scientifiques et humaines, sa disponibilité, tout au long de ces années, malgré ses nombreuses et lourdes obligations et responsabilités.

Je remercie vivement le Professeur HADJEL Mohamed de l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran – Mohamed BOUDIAF pour avoir accepté d'être le président de jury de ma thèse.

Pour avoir consentis d'être examinateurs de ma thèse, mes remerciements vont également au Professeur HAMOU Ahmed de l'Université d'Oran, au Professeur BOUZIANI Mustapha de l'Université d'Oran et au Professeur ABDELMALEK Fatiha de l'Université de Mostaganem. Je remercie aussi, le Docteur ABDERRAHIM Hamza de l'Institut Hydrométéorologique de Formation et de Recherches d'Oran pour avoir accepté de faire partie du Jury en tant qu'invité.

Au Docteur Nadège BLOND du Laboratoire Image Ville Environnement de l'Université de Strasbourg, j'exprime toute ma gratitude pour m'avoir accueilli à plusieurs reprises et fourni ses parfaites connaissances sur les modèles MM5, WRF, EMISENS et CHIMERE.

Mes remerciements vont également au Professeur Alain CLAPPIER du même Laboratoire pour m'avoir prodigué conseils et recommandations et fait part de sa longue expérience et de sa large vision dans le domaine de la qualité de l'air.

Pour son aide précieuse, je remercie le Professeur Jean Luc PONCHE de l'Institut de Chimie et Procédés pour l'Energie, l'Environnement et la Santé de l'Université de Strasbourg qui m'a éclairé sur son domaine de prédilection, les émissions polluantes.

Ma gratitude va à l'ensemble des membres du Laboratoire Image Ville Environnement de l'Université de Strasbourg pour leurs coopération et sollicitude et pour m'avoir permis d'utiliser les moyens et la puissance de calcul du Laboratoire afin de procéder aux simulations présentées dans cette thèse.

Pour m'avoir permis l'accès aux données utilisées dans ce travail, je suis reconnaissant au Professeur Tahar BAOUNI du Laboratoire LVUDD de l'Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger, au Professeur Menouer BOUGHEDDAOUI du Laboratoire LEPA de l'Université Saad-Dahleb de Blida, au Professeur Madani SAFAR ZITOUN de l'Université

d'Alger 2 et à M. Abderrahmane BOUKADOUM de l'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable.

Pour m'avoir reçu et fait découvrir de manière détaillée le modèle CHIMERE, ma reconnaissance va également au Docteur Laurent MENUT et son équipe du Laboratoire de Météorologie Dynamique de l'Ecole Polytechnique à Palaiseau.

Aux initiateurs du projet Euro-méditerranéen ChArMEx (Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment), j'exprime ma gratitude pour leur soutien et leur support.

Je n'omettrai pas de remercier les membres du Département de Génie des matériaux de la faculté de Chimie pour m'avoir accueilli au sein de leur structure et permis à mon travail de thèse d'aboutir.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble de mes collègues de travail de l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran – Mohamed BOUDIAF pour leur appui et assistance.

Enfin, je ne manquerai pas de remercier l'ensemble des membres de ma famille pour leur inconditionnel et parfait soutien.

# ملخص

الجزائر، العاصمة السياسية والاقتصادية للجزائر تركز وحدها جزءا كبيرا من أنشطة البلد وتعرف حركة مرور كثيفة، نشاطا اقتصاديا هاما وتكتلا بشريا كبيرا. حركة المرور على الطرق هي المصدر الرئيسي لتلوث الهواء، بدلا من غيرها من مصادر الانبعاثات، وبالتالي المساهمة الأكبر في تدهور نوعية الهواء، وهو ما تؤكدته قياسات تركيز الملوثات في منطقة الجزائر.

إنجاز بفضل النمذجة لمسح الانبعاثات الناتجة عن حركة المرور على الطرق في منطقة الجزائر العاصمة يعتبر خطوة أساسية لتوصيف تركيز الملوثات مع التوزيع المكاني والزمني. يتم إضافة إلى ذلك المسح ، الانبعاثات الناتجة عن الصناعة و احتراق النفايات ، لأجل السماح بنمذجة نقل الملوثات وتفاعلاتها الكيميائية . هذه النمذجة تولد معدلات تركيز الملوثات، موزعة في المكان والزمان، والتي يتم إجراء مقارنتها مع القياسات المأخوذة على أرض الواقع من أجل تحقيق المصادقة على سلسلة النمذجة. سلسلة النمذجة المبنية هي أداة لفهم أفضل لظاهرة تلوث الهواء في منطقة الجزائر من خلال المساعدة على اتخاذ القرارات في الوقت المناسب والسريع في اتجاه الحفاظ على البيئة بشكل عام وصحة المواطن بشكل خاص.

الكلمات الرئيسية: تلوث الهواء، النمذجة، مسح الانبعاثات ، كيمياء-نقل.

## Résumé.

Alger, capitale politique et économique de l'Algérie draine à elle seule une large partie des activités du pays en connaissant une circulation automobile intense, une activité économique importante et une concentration humaine considérable.

Le trafic routier y est responsable de la plus grande part des rejets polluants dans l'atmosphère, bien plus que les autres sources d'émissions, contribuant ainsi à une dégradation de la qualité de l'air, qui est confirmée par les mesures des concentrations des polluants dans la région d'Alger.

La réalisation, grâce à la modélisation, d'un cadastre des émissions issues du trafic routier dans la région d'Alger est une étape indispensable afin de caractériser les concentrations des polluants avec une répartition spatiale et temporelle.

L'ajout à ce cadastre des émissions issues de l'industrie et de la combustion des déchets permet la modélisation du transport des polluants et de leurs interactions chimiques. Cette modélisation génère des taux de concentrations des polluants, répartis dans l'espace et le temps, permettant leurs comparaisons aux mesures prises sur le terrain afin d'aboutir à une validation de la chaîne de modélisation.

La plate-forme de modélisation construite est un outil pour mieux appréhender le phénomène de la pollution de l'air dans la région d'Alger, en aidant à la prise de décisions opportunes et rapides dans le sens de la préservation de l'environnement en général et de la santé du citoyen en particulier.

**Mots clés** : Pollution atmosphérique, Modélisation, Cadastre des émissions, Chimie-Transport.

## Abstract.

Algiers is the political and economic capital of Algeria. The city drains a large part of the activities of the country with an intense road traffic, an important economic activity and considerable human concentration.

This road traffic is the main source of air pollution, rather than other sources of emissions, thus contributing to a deterioration of air quality, which is confirmed by measurements of concentrations pollutants in the Algiers region.

The achievement, through modeling, an emissions cadastre from road traffic in the region of Algiers is an essential step to characterize pollutants concentrations with a spatial and temporal distribution.

Adding to that cadastre of emissions from industry and waste combustion allows the modeling of the transport of pollutants and their chemical interactions. This modeling generates rates of pollutant concentrations, distributed in space and time, allowing comparisons to their measures taken on the ground order to arrive at a validation of the modeling chain.

Modeling platform built is a tool to better understand the phenomenon of air pollution in the Algiers region by helping to take timely and quick decisions in the direction of preservation of the environment in general and the health of the citizen in particular.

**Keywords:** Air Pollution, Modeling, Cadastre emissions, Chemistry-Transport.

# Table des matières.

Introduction générale.....	21
Chapitre I : Caractéristiques générales de la pollution atmosphérique.....	25
I.1 Introduction.....	26
I .2 Définitions. ....	26
I .3 Les mécanismes de la pollution atmosphérique.....	27
I .3.1 Les émissions.....	28
I .3.2 Le transport et la dispersion.....	28
I .3.3 Les transformations chimiques.....	29
I .4 La pollution photochimique à l’ozone.....	30
I .5 Impact sanitaire de la pollution atmosphérique.....	31
I .6 La surveillance de la qualité de l’air.....	33
I .7 Prévision des pics de pollution atmosphérique.....	34
I .8 La réduction de la pollution atmosphérique.....	35
I .9 Législation concernant la pollution atmosphérique. ....	36
I .10 Conclusion.....	37
Chapitre II : Le cadastre des émissions de polluants atmosphériques.....	39
II.1 Introduction.....	40
II.2 Applications et utilisations du cadastre des émissions.....	40
II.3 Utilisateurs potentiels du cadastre des émissions.....	41
II.4 Méthodologies pour la construction des cadastres d’émissions.....	41
II.5 Les principes de la méthodologie CORINAIR.....	42
II.6 Le programme EMEP.....	44
II.7 Le calcul des émissions.....	45
II.8 La résolution spatiale et temporelle des cadastres des émissions.....	46
II.8 .1 La résolution spatiale des cadastres des émissions.....	46
II.8 .2 La résolution temporelle des cadastres des émissions.....	47
II.9 Les principales sources de pollution prises en compte dans le cadastre des émissions.....	48
II.9.1 Le transport routier.....	48
II.9.2 Energie et industrie.....	48

II.9.3 Résidentiel et tertiaire.....	49
II.9.4 Biogènes et autres.....	49
II.10 Conclusion.....	49
Chapitre III : Modélisation du transport et des transformations chimiques des polluants atmosphériques.....	51
III.1 Introduction.....	52
III.2 Différents types de modélisation mathématique.....	52
III.3 Structure générale d'un modèle déterministe de la pollution atmosphérique.....	53
III.3.1 Les émissions.....	54
III.3.2 La chimie.....	55
III.3.2.1 La composition chimique de l'atmosphère.....	55
III.3. 2.2 Le temps de vie des polluants atmosphériques.....	55
III.3.2.3 La chimie de l'atmosphère.....	56
III.3.2.4 Le mécanisme chimique.....	57
III.3.3 La topographie.....	57
III.3.4 La météorologie.....	58
III.3.4.1 La structure de l'atmosphère.....	58
III.3.4.2 Le rôle du vent dans le transport des polluants.....	60
III.3.4.3 Le rôle de la turbulence.....	60
III.3.5 Autres processus.....	61
III.3.5.1 Dépôt sec.....	61
III.3.5.2 Dépôt humide.....	61
III.4 Intégration numérique d'une modélisation Eulérienne.....	61
III.5 Les modèles de chimie–transport les plus courants.....	63
III.6 Stockage et manipulation des données de la modélisation de la qualité de l'air....	64
III.7 Conclusion. ....	65
Chapitre IV: Modélisation des émissions des polluants atmosphériques de la région d'Alger.....	66
IV.1 Introduction.....	67
IV.2 Modèle utilisé.....	68
IV.3 Présentation de la zone d'étude.....	69
IV.2 Calcul des émissions totales.....	71
IV.2.1 Les polluants choisis.....	71
IV.2.2 Choix des catégories de véhicules.....	73

IV.2.3 L'estimation des facteurs d'émissions.....	75
IV.2.4 Le choix des catégories de rues.....	79
IV.2.5 Estimation du total des émissions.....	82
IV.3 Répartition spatiale et temporelle des émissions.....	87
IV.3.1 Répartition temporelle.....	87
IV.3.2 Répartition spatiale.....	88
IV.3.3 Estimation des incertitudes.....	91
IV.4 Prise en compte des autres sources d'émissions.....	92
IV.4.1 Les émissions d'origine industrielle.....	93
IV.4.2 Les émissions de combustion des déchets.....	93
IV.4.3 Cartographie de l'ensemble des émissions.....	94
IV.5 Conclusion.....	95
Chapitre V: Modélisation de la qualité de l'air dans la région d'Alger.....	96
V.1 Introduction.....	97
V.2 La modélisation de la météorologie.....	98
V.2.1 Présentation du modèle météorologique MM5.....	98
V.2.2 Architecture globale du modèle météorologique MM5.....	99
V.2.3 Situation météorologique dans la zone d'étude.....	101
V.2.4 Les données météorologiques utilisées dans le modèle CHIMERE.....	103
V.3 Modélisation de la qualité de l'air.....	103
V.3.1 Présentation du modèle CHIMERE.....	103
V.3.2 Le développement du modèle CHIMERE.....	104
V.3.3 Les processus physico-chimiques.....	104
V.3.4 Les données en entrée.....	105
V.3.5 Le mécanisme chimique.....	106
V.3.6 Exécution du modèle CHIMERE.....	107
V.3.7 Les simulations avec le modèle CHIMERE.....	108
V.3.8 La simulation du monoxyde de carbone.....	110
V.3.9 La simulation de l'ozone.....	111
V.4 Validation des résultats.....	114
V.5 Conclusion.....	118
Conclusion générale .....	120
Références bibliographiques.....	123
Annexe I : Le mécanisme chimique MELCHIOR .....	130

Annexe II : Les variables du modèle météorologique MM5.....	139
Annexe III : Les variables du modèle CHIMERE sous le format NetCDF .....	142
Annexe IV : SAMASAFIA, le réseau de surveillance de la qualité de l'air à Alger.....	147

## Liste des figures.

<b>Figure I.1</b> : Mécanismes de la pollution atmosphérique.....	28
<b>Figure I.2</b> : Zones du corps humain affectées en fonction de la nature du polluant.....	31
<b>Figure I.3</b> : Fraction de particules déposées dans les voies respiratoires en fonction de la taille des particules.....	32
<b>Figure II.1</b> : Grille des émissions du cadastre EMEP (mailles 50 x 50 km).....	45
<b>Figure III.1</b> : Structure générale d'un modèle déterministe de la qualité de l'air.....	54
<b>Figure III.2</b> : Temps de vie des polluants atmosphériques.....	56
<b>Figure III.3</b> : Structure globale de l'atmosphère.....	59
<b>Figure III.4</b> : Exemple des différents maillages Eulériens utilisés : 0D (t), 1D (t, x), 2D (t, x, z) et 3D (t, x, y, z).....	62
<b>Figure IV.1</b> : Topographie du massif de Bouzaréah à l'ouest d'Alger.....	69
<b>Figure IV.2</b> : La zone d'étude de la région du Grand Alger selon les densités de population.....	70
<b>Figure IV.3</b> : Profil moyen journalier des teneurs en PM <sub>10</sub> relevé par la station de mesure de Bab El Oued à Alger- Février 2006.....	72
<b>Figure IV.4</b> : Distribution par classes des niveaux d'exposition journaliers et des impacts associés (consultations).....	72
<b>Figure IV.5</b> : Regroupement des types de véhicules par catégories et leurs proportions... ..	74
<b>Figure IV.6</b> : Les parts des types de véhicules dans les émissions à chaud en fonction du cycle de conduite dans la région d'Alger selon les données de l'année 2006.....	76
<b>Figure IV.7</b> : Emissions à froid selon la méthodologie Copert 4.....	77
<b>Figure IV.8</b> : Facteurs d'émissions moyens du CO à froid et à chaud en cycle urbain par catégorie de véhicule dans la région d'Alger.....	78
<b>Figure IV.9</b> : Facteurs d'émissions par évaporation par catégorie de véhicule en Algérie – 2006 – Copert 4 Version 7.1.....	79
<b>Figure IV.10</b> : Longueurs des rues pour chaque cellule de la grille couvrant la zone d'étude.....	81
<b>Figure IV.11</b> : Débits en UVP dans la région d'Alger à l'heure de pointe du soir.....	82
<b>Figure IV.12</b> : Densité du réseau routier (km/km <sup>2</sup> ) à Alger répartie par commune.....	84
<b>Figure IV.13</b> : Réseau routier vectorisé du centre ville d'Alger.....	85

<b>Figure IV.14</b> : Amplitudes des pourcentages des incertitudes des polluants étudiés lors de la première et de la deuxième simulation à l'aide du modèle EMISENS appliqué à la zone du Grand - Alger.....	86
<b>Figure IV.15</b> : Profils moyens journaliers exprimés en U.V.P (unité de véhicule particulier) pendant la période Février-Mars 2006 dans l'agglomération algéroise.....	87
<b>Figure IV.16</b> : Trafic moyen journalier par maille dans la zone d'étude pour la période de Mars 2006.....	89
<b>Figure IV.17</b> : Comparaison des émissions de NOx entre le jour ouvrable et le jour chômé (Vendredi) du mois de Mars 2006 dans la région du Grand Alger.....	91
<b>Figure IV.18</b> : Distribution spatiale des incertitudes du monoxyde de carbone dans la région du Grand Alger.....	92
<b>Figure IV.19</b> : Emissions d'oxydes d'azote, à 14h00 (heure locale), issues du trafic routier, des industries et de la combustion des déchets dans la zone d'étude.....	94
<b>Figure V.1</b> : Schéma de discrétisation spatiale.....	98
<b>Figure V.2</b> : Architecture générale et imbrication des différents modules composant le modèle MM5.....	99
<b>Figure V.3</b> : Domaines imbriqués de simulation avec le modèle MM5.....	101
<b>Figure V.4</b> : Champs du vent près du sol (u, v) simulé par le modèle MM5 pour le 12 Août 2006. Les lignes pleines représentent les limites de la côte.....	102
<b>Figure V.5</b> : Interactions entre les différents modèles et les résolutions des domaines choisis.....	106
<b>Figure V.6</b> : Les différents modules liés au modèle CHIMERE.....	107
<b>Figure V.7</b> : Les 3 domaines imbriqués de simulation du modèle CHIMERE.....	108
<b>Figure V.8</b> : Les domaines D02 et D03 de simulation du modèle CHIMERE.....	109
<b>Figure V.9</b> : Concentrations du monoxyde de carbone (ppb) dans la zone d'étude pour le 11/02/2006 à 8H00 (heure locale) simulées avec le modèle CHIMERE.....	110
<b>Figure V.10</b> : Concentrations d'Ozone simulés, sur le domaine DOM02 par le modèle CHIMERE pour le 11 Août 2006 de 10h00 UTC à 17h00UTC.....	112
<b>Figure V.11</b> : Simulation , sur le domaine DOM03 , avec le modèle CHIMERE des concentrations d'ozone en ppb dans la zone d'étude pour le 12/08/2006 à 11h00 (heure locale).....	113
<b>Figure V.12</b> : Séries temporelles des concentrations horaires d'ozone simulées par le modèle CHIMERE et mesurées par la station de surveillance de Benaknoun du 21/08/2006-00h00 au 26/08/2006-00h00.....	114

**Figure V.13:** Comparaison des ratios de NO<sub>x</sub> / CO issues des mesures de concentrations avec les rapports de NO<sub>x</sub>/CO des émissions du cadastre construit avec le modèle Emisens.. 115

**Figure V.14 :** Régression des valeurs des concentrations moyennes mesurées avec celles de la moyenne des émissions d'oxyde d'azote, pour toutes les heures des jours ouvrables et des jours fériés du mois de Février 2006 pour la zone d'étude..... 116

**Figure V.15:** Comparaison des ratios de NO<sub>x</sub> / CO déduit du cadastre des émissions avec des ratios de concentration calculées à partir de mesures de la concentration..... 117

**Figure V.16:** Comparaison entre les données observées et les données simulées avec le modèle CHIMERE pour le monoxyde de carbone (ppb) durant les jours ouvrables de la première semaine de Février 2006..... 117

**Figure V.17 :** Régression des données observées et les données simulées avec le modèle CHIMERE pour le monoxyde de carbone (ppb) durant les jours ouvrables de la première semaine de Février 2006..... 118

## Liste des tableaux.

<b>Tableau N° I.1 :</b> Objectifs et Valeurs limites de la qualité de l'air établis par le Décret exécutif N° 06-02 du 07 janvier 2006.....	37
<b>Tableau N° I.2 :</b> Seuils d'information et d'alerte établis par le Décret exécutif N° 06-02 du 07 janvier 2006.....	37
<b>Tableau IV.1:</b> Emissions des polluants en Tonnes/année en Algérie pour l'année 1995..	67
<b>Tableau IV.2 :</b> Aperçu des facteurs d'émissions du CO pour les 3 cycles de conduite selon le type de véhicule.....	74
<b>Tableau N° IV.3 :</b> Les vitesses selon les catégories de rue choisies.....	80
<b>Tableau IV.4 :</b> Estimation des flux de véhicules en veh.km.h-1 pour la zone d'étude.....	82
<b>Tableau N° IV.5 :</b> Moyenne des émissions et leurs incertitudes totales.....	82
<b>Tableau IV.6:</b> Pourcentage des incertitudes des paramètres en entrée les plus sensibles pour chaque polluant.....	83
<b>Tableau IV.7 :</b> Moyenne des émissions et incertitudes à l'issue de la seconde simulation.....	85
<b>Tableau IV.8 :</b> Pourcentage des écarts types des paramètres les plus sensibles après la seconde simulation.....	86
<b>Tableau IV.9:</b> Clés de répartition des émissions totales de l'industrie à Alger en fonction de la surface des zones industrielles.....	93
<b>Tableau IV.10 :</b> Clés de répartition des émissions totales en fonction de la capacité de chaque décharge.....	94
<b>Tableau V.1 :</b> Variables météorologiques utilisées par le modèle CHIMERE.....	103
<b>Tableau V.2:</b> Caractéristiques des différents domaines utilisés pour la modélisation CHIMERE.....	109

## **Abréviations et acronymes.**

<b>ALADIN</b>	<b>A</b> ire <b>L</b> imitée <b>A</b> daptation dynamique <b>D</b> éveloppement <b>I</b> nter <b>N</b> ational – Modèle météorologique utilisé par Météo-Algérie.
<b>AIRQUAL</b>	Modèle de chimie-transport – France.
<b>APHEIS</b>	<b>A</b> ir <b>P</b> ollution and <b>H</b> ealth: <b>E</b> uropean <b>I</b> nformation <b>S</b> ystem.
<b>AVN</b>	Global Aviation Model -Service National Météorologique Américain (National Weather Service).
<b>CAMx</b>	<b>C</b> omprehensive <b>A</b> ir quality <b>M</b> odel with <b>e</b> xtensions. Modèle photochimique eulérien prenant en compte les polluants gazeux et particulaires à l'échelle urbaine. – Etats-Unis.
<b>CALGRID</b>	<b>C</b> alifornia <b>G</b> rid Model. Modèle de chimie-transport – Etat- unis.
<b>CBM IV</b>	<b>C</b> arbon <b>B</b> ond <b>M</b> echanisms. Mécanisme chimique – Etas-unis.
<b>CLA</b>	<b>C</b> ouche <b>L</b> imite <b>A</b> tmosphérique
<b>COPERT</b>	<b>C</b> OMputer <b>P</b> rogram to calculate <b>E</b> mission from <b>R</b> oad <b>T</b> ransport– Union Européenne.
<b>CORINAIR</b>	<b>C</b> ORE <b>I</b> Nventory <b>A</b> IR emissions – Union Européenne.
<b>COV</b>	<b>C</b> omposés <b>O</b> rganiques <b>V</b> olatils.
<b>COVNM</b>	<b>C</b> omposés <b>O</b> rganiques <b>V</b> olatils <b>N</b> on <b>M</b> ethaniques.
<b>CTM</b>	<b>C</b> hemistry <b>T</b> ransport <b>M</b> odel.
<b>EDF</b>	<b>E</b> lectricité <b>d</b> e <b>F</b> rance– France
<b>EDGAR</b>	<b>T</b> he <b>E</b> missions <b>D</b> atabase for <b>G</b> lobal <b>A</b> tmospheric <b>R</b> esearch.
<b>EIS</b>	<b>É</b> valuation d' <b>I</b> mpact sur la <b>S</b> anté.
<b>EMA</b>	<b>E</b> ntreprise du <b>M</b> éto d' <b>A</b> lger – Algérie.
<b>EMEP</b>	<b>E</b> uropean <b>M</b> onitoring and <b>E</b> mission <b>P</b> rogram– Union Européenne.
<b>EMISENS</b>	<b>E</b> MIssion <b>S</b> ENSitivity – Modèle sur les émissions du trafic routier.
<b>EZM</b>	<b>E</b> umac <b>Z</b> ooming <b>M</b> odel. Chaîne de modélisation composée du modèle météorologique MEMO et du modèle de chimie-transport MARS – Union Européenne.
<b>GIEC</b>	<b>G</b> roupe <b>I</b> ntergouvernemental sur l' <b>E</b> volution du <b>C</b> limat.
<b>GLCF</b>	<b>G</b> lobal <b>L</b> and <b>C</b> over <b>F</b> acility.
<b>GMT</b>	<b>G</b> eneric <b>M</b> apping <b>T</b> ools – Outil open-source de cartographie. Université de Columbia - États-Unis.
<b>GNC</b>	<b>G</b> az <b>n</b> aturel comprimé.
<b>GOCART</b>	<b>T</b> he <b>G</b> eorgia <b>T</b> ech/ <b>G</b> oddard <b>G</b> lobal <b>O</b> zone <b>C</b> hemistry <b>A</b> erosol <b>R</b> adiation <b>T</b> ransport.

<b>GPL</b>	<b>G</b> az de <b>P</b> étrole <b>L</b> iquéfié (butane et propane).
<b>GPL</b>	<b>G</b> eneral <b>P</b> ublic <b>L</b> icense - Licence libre.
<b>Hermes</b>	Modèle météorologique développé par EDF – France.
<b>HAP</b>	<b>H</b> ydrocarbures <b>a</b> romatiques <b>p</b> olycycliques.
<b>HPC</b>	<b>H</b> igh <b>P</b> erformance <b>C</b> omputing – Calcul intensif.
<b>IFP</b>	<b>I</b> nstitut <b>F</b> rançais du <b>P</b> étrole – France.
<b>IPSL</b>	<b>I</b> nstitut <b>P</b> ierre <b>S</b> imon <b>L</b> aplace – France.
<b>LEPA</b>	<b>L</b> aboratoire d' <b>E</b> nergie et de <b>P</b> ollution de l' <b>A</b> ir - Université Saad -Dahleb de Blida.
<b>LISA</b>	<b>L</b> aboratoire <b>I</b> nteruniversitaire des <b>S</b> ystèmes <b>A</b> tmosphériques – France.
<b>LMD</b>	Laboratoire de <b>M</b> étéorologie <b>D</b> ynamique – France.
<b>LVUDD</b>	<b>L</b> aboratoire <b>V</b> ille <b>U</b> rbanisme et <b>D</b> éveloppement <b>D</b> urable - Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger.
<b>JORA</b>	<b>J</b> ournal officiel de la <b>R</b> épublique <b>A</b> lgérienne.
<b>OCDE</b>	<b>O</b> rganisation de <b>C</b> oopération et de <b>D</b> éveloppement <b>E</b> conomique.
<b>OMS</b>	<b>O</b> rganisation <b>M</b> ondiale de la <b>S</b> anté.
<b>ONDD</b>	<b>O</b> bservatoire <b>N</b> ational de l' <b>E</b> nvironnement et du <b>D</b> éveloppement <b>D</b> urable – Algérie.
<b>MARS</b>	<b>M</b> odel for the <b>A</b> tmospheric <b>D</b> ispersion of <b>R</b> eactive <b>S</b> pecies. Modèle de chimie-transport – Union Européenne.
<b>MELCHIOR</b>	<b>M</b> odèle d' <b>E</b> tude <b>L</b> agrangienne de la <b>C</b> HImie de l' <b>o</b> zone à l' <b>É</b> chelle <b>R</b> égionale.
<b>MEMO</b>	<b>M</b> esoscale <b>M</b> odel. Modèle météorologique – Union Européenne.
<b>Meso-NH Chimie</b>	Modèle de chimie-transport – France.
<b>MINERVE</b>	<b>M</b> odélisation des <b>i</b> ntempéries de <b>n</b> ature <b>e</b> xtrême du <b>R</b> hône <b>v</b> alaisan et de leurs <b>e</b> ffets. Modèle météorologique – Suisse.
<b>MM5</b>	Fifth-Generation NCAR / Penn State <b>M</b> esoscale <b>M</b> odel. Modèle météorologique – Etats-Unis.
<b>MOZART</b>	<b>M</b> odel for <b>O</b> zone <b>A</b> nd <b>R</b> elated chemical <b>T</b> racers.
<b>NetCDF</b>	<b>N</b> etwork <b>C</b> ommon <b>D</b> ata <b>F</b> orm – Format de fichier scientifique.
<b>NCAR</b>	<b>N</b> ational <b>C</b> enter for <b>A</b> tmospheric <b>R</b> esearch - Etats-Unis.
<b>NOx</b>	<b>N</b> O + <b>N</b> O <sub>2</sub> .
<b>PAN</b>	<b>P</b> eroxy <b>a</b> cétyl <b>n</b> itrate.

<b>PM</b>	<b>P</b> articulate <b>M</b> ater.
<b>PM<sub>10</sub></b>	Particule dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 µm.
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	Particule dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 µm.
<b>ppb</b>	<b>P</b> art <b>p</b> er <b>b</b> illion (en français : partie par milliard).
<b>ppm</b>	<b>P</b> art <b>p</b> er <b>m</b> illion (en français : partie par million).
<b>RACM</b>	<b>R</b> egional <b>A</b> tmospheric <b>C</b> hemistry. <b>M</b> odelling. Mécanisme chimique – Union Européenne.
<b>SIG</b>	<b>S</b> ystème d' <b>I</b> nformation <b>G</b> éographique.
<b>SNAP</b>	<b>S</b> electe <b>d</b> <b>N</b> omenclature for <b>A</b> ir <b>P</b> ollution - Union Européenne.
<b>TRI</b>	<b>T</b> oxics <b>R</b> elease <b>I</b> nventory - Agence américaine de protection de l'environnement.
<b>TUV</b>	<b>T</b> ropospheric <b>U</b> ltraviolet and <b>V</b> isible model.
<b>UAM V</b>	<b>U</b> rban <b>A</b> irshed <b>M</b> odel with <b>V</b> ariable <b>G</b> rid. Modèle de chimie-transport - Etat- unis.
<b>UCAR</b>	<b>U</b> niversity <b>C</b> orporation for <b>A</b> tmospheric <b>R</b> esearch – Etat-unis.
<b>UV</b>	Rayonnement <b>U</b> ltra <b>V</b> iolet.
<b>UVP</b>	<b>U</b> nité de <b>v</b> éhicule <b>p</b> articulier.
<b>WRF</b>	<b>W</b> eather <b>R</b> esearch and <b>F</b> orecasting. Modèle météorologique – Etats-Unis.

## **Introduction générale.**

A l'aube du 21<sup>ème</sup> siècle, la modélisation et la prévision de la qualité de l'air représentent à la fois un défi et un problème scientifique, qui a récemment vu le jour en Algérie en raison de la prise de conscience croissante de l'effet de la pollution atmosphérique sur la santé, l'environnement, les écosystèmes et le climat.

La pollution atmosphérique correspond à une modification de la concentration moyenne naturelle d'une espèce chimique gazeuse ou particulaire dans l'atmosphère et peut être d'origine biogénique dont les principales sources naturelles sont l'érosion éolienne, les feux, les émissions de gaz biogéniques des écosystèmes et les éruptions volcaniques.

Elle peut être d'origine anthropique, engendrées essentiellement par les combustions des ressources naturelles fossiles (gaz, pétrole, charbon) ou de la biomasse et par l'évaporation de solvants et autres produits volatils.

Au cours de ces dernières décennies, l'industrialisation des sociétés a entraîné une consommation croissante de l'énergie fossile qui a graduellement mais rapidement amplifié le phénomène. Les pays développés ainsi que les pays émergents, subissent une dégradation de la qualité de l'air à laquelle sont soumis leurs populations et leurs environnements.

La pollution atmosphérique représente un véritable enjeu de santé publique et environnemental que ce soit au niveau local, régional ou planétaire. Les polluants émis dans l'atmosphère ne restent pas confinés près de la source d'émission ou à l'environnement local, et peuvent être transportés sur de longues distances, et créer plusieurs problèmes environnementaux régionaux et mondiaux (Köne et Al., 2014).

En effet, sur le plan local, la pollution de l'air peut affecter la santé humaine et animale par exposition à des substances toxiques. Elle agit sur la flore directement par voie chimique ou indirectement par une modification des équilibres dans les sols. Enfin, elle agit sur les matériaux et le bâti par les effets de corrosion et de salissure.

Sur le plan régional, deux phénomènes peuvent être distingués : les pluies acides et la pollution photochimique. Les pluies acides résultent des rejets d'oxydes d'azote et de soufre qui se combinent avec les eaux de pluie, pour former l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) et l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Cette acidification peut provoquer l'eutrophisation des eaux de surface c'est-à-dire une modification et une dégradation du milieu aquatique, liées en général à un apport excessif de substances nutritives, sous forme de nitrates et de phosphates, qui augmentent la production d'algues et d'espèces aquatiques. En outre, les pluies acides constituent un facteur important du dépérissement forestier. Quand à la pollution

photochimique, elle est à l'origine de la formation de l'ozone troposphérique dont les effets néfastes sur la santé et l'environnement sont largement connus.

Sur le plan planétaire, la destruction de la couche d'ozone liée à des émissions de composées chimiques chlorés suffisamment stables pour accéder à la stratosphère où ils sont dissociés par le rayonnement ultraviolet. Le chlore ainsi libéré, s'attaque alors aux molécules d'ozone, leur diminution entraînant une augmentation de l'effet de serre (Werner, 2009).

De plus, les émissions des gaz à effets de serre contribuent au réchauffement climatique. Les questions liées au changement climatique et aux effets sanitaires de la pollution ne se substituent pas mais s'additionnent. Leurs sources comme leurs conséquences sont imbriquées. En effet, elles ont les mêmes origines sous forme de sources naturelles et surtout de sources humaines, en forte augmentation au niveau planétaire. Des polluants de l'air comme l'ozone ou les particules agissent sur le changement climatique : l'ozone a tendance à réchauffer l'atmosphère, les aérosols à la refroidir. Inversement, les changements climatiques pourraient induire des canicules plus fréquentes et auront donc un impact sur les niveaux d'ozone à l'échelle de la troposphère.

En 2014, le GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat – IPCC en Anglais) a publié son cinquième rapport auquel ont collaboré 831 experts pour sa rédaction et qui repose sur une évaluation globale de près de 30.000 études. Cette synthèse affirme que la température moyenne à la surface de la planète a augmenté de 0,85° C entre 1880 et 2012, à une vitesse inédite jusqu'alors. Celle à la surface des océans de 0,11° C par décennie entre 1971 et 2010. Si le réchauffement climatique se poursuit, le rapport prévient que les conséquences seront lourdes en termes de sécurité alimentaire, de disponibilité en eau potable, de risques d'inondations et de tempêtes, avec une hausse probable des déplacements des populations et de conflits pour l'accès aux ressources (IPCC, 2014).

L'Organisation mondiale de la santé (O.M.S) a établi en Septembre 2011 une base de données sur la pollution de l'air dans 1100 villes de 91 pays. La situation est la plus grave dans les pays en développement rapide, alors qu'elle est plus ou moins sous contrôle dans les pays les plus avancés. L'O.M.S a fixé un seuil de 20 ug/m<sup>3</sup> pour la concentration annuelle moyenne des particules fines d'une taille égale ou inférieure à 10 micromètres. Sur 91 pays qui ont fourni des données, des villes dépassent ce seuil dans 80 pays. La ville d'Alger en fait partie avec un taux annuel moyen des PM<sub>10</sub> de 42 ug/m<sup>3</sup>. L'O.M.S estime qu'une réduction de la concentration annuelle moyenne de particules PM<sub>10</sub> de 70 à 20 microgrammes par mètre cube devrait entraîner une baisse de 15% de la mortalité due à la pollution de l'air.

En Mars 2014, cette même organisation onusienne a indiqué que près de 7 millions de personnes sont décédées prématurément en 2012 du fait de l'exposition à la pollution de l'air. Ces chiffres confirment que la pollution atmosphérique est désormais le principal risque environnemental pour la santé dans le monde et qu'on pourrait sauver des millions de vies en luttant ce type de pollution.

Ce qui doit alerter les algériens est l'étude de Lelieveld et Al.,2013, qui place l'Algérie, en compagnie de Macao et de Taiwan, en tête des pays concernés par la mortalité prématurée liée à la pollution par l'ozone troposphérique.

L'Algérie, de par sa croissance économique et démographique, est plus que jamais concernée par ce phénomène, particulièrement ses grandes agglomérations urbaines, notamment la région d'Alger qui est la plus significative, de par sa qualité de pôle politique, économique, administratif et urbain.

Certes, un réseau de mesure est installé depuis 2002 à Alger et un projet de loi prévoit la mise en place de sites de surveillance de la pollution atmosphérique dans les villes de plus de 500 000 habitants (Abderrahim, 2012), mais tout réseau de mesure aussi dense qu'il soit, ne pourra pas caractériser la qualité de l'air dans tout point de la zone surveillée. En complément, la modélisation et la simulation doivent être utilisées pour renseigner sur les concentrations des polluants dans l'ensemble de la région étudiée.

La conception de stratégies de qualité de l'air est une tâche complexe pour les autorités locales. Ils doivent imposer le respect des normes de qualité de l'air en réduisant les émissions de précurseurs locaux pour différents polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre, à travers un ensemble d'actions dans un budget limité. La définition de stratégies efficaces requiert des informations précises et détaillées sur la situation locale, et des outils rapides et simples à traiter. L'une des approches les plus couramment utilisés est l'analyse de scénario. Cette méthodologie permet l'utilisation de modèles déterministes de chimie-Transport pour évaluer les effets sur la qualité de l'air de politiques de réduction des émissions (Carnevale et Al., 2014)

La lutte contre le phénomène de la pollution atmosphérique passe par la prise de décisions opportunes qui doivent reposer sur des études poussées, notamment à l'aide de la modélisation afin de simuler les processus physico-chimiques qui régissent l'évolution des concentrations des espèces chimiques présentes dans l'atmosphère.

La modélisation déterministe de la qualité de l'air suppose de bien connaître les polluants émis et leurs conditions de dispersion. Mais avant de pouvoir utiliser ce genre de modèle, il est essentiel de réaliser un cadastre des émissions polluantes afin d'alimenter le modèle

calculant la dispersion atmosphérique et les transformations chimiques, pour pouvoir déterminer la qualité de l'air dans la zone d'étude.

L'objectif de la présente thèse est d'étudier et de construire la chaîne de modélisation nécessaire à la caractérisation de la qualité de l'air, qui touche les émissions polluantes, les conditions météorologiques, les transformations chimiques et le transport des polluants. Il est important que les résultats des simulations soient cohérents avec les données observées sur les concentrations des polluants. Dans ce but, plusieurs comparaisons sont effectuées validant ainsi la chaîne de modélisation conçue.

Ce travail de recherche s'articule en cinq chapitres autour de la modélisation et de la simulation de la pollution atmosphérique.

Tout d'abord une introduction générale qui est un préliminaire présentant la problématique traitée ainsi que le processus de l'organisation de cette thèse.

Le premier chapitre de la thèse est consacré à l'étude des caractéristiques générales de la pollution atmosphérique. Nous présentons dans le second chapitre les méthodes de construction des cadastres d'émissions polluantes. La modélisation du transport et des transformations chimiques des polluants atmosphériques est énoncée dans le troisième chapitre.

Nous avons développé, pour la région d'Alger, un cadastre d'émissions que nous avons exposé dans le quatrième chapitre de la thèse en mettant l'accent sur les sources mobiles des émissions. En effet, le trafic routier représente une importante part des émissions polluantes. La combinaison des méthodes "top-down" et "bottom-up" permet de contourner l'insuffisance des données disponibles pour la zone d'étude. L'étude de sensibilité que nous avons accomplie permet de cerner les paramètres à améliorer.

Les sources habituelles et permanentes de la pollution atmosphérique dans la zone d'étude étant identifiées, il importe dès lors d'étudier leurs impacts grâce à la modélisation de la qualité de l'air à laquelle nous avons consacré le cinquième chapitre. Nous avons d'abord modélisé la météorologie ensuite le transport et les transformations chimiques des polluants dans la région d'Alger en utilisant comme données d'entrée, le cadastre d'émissions construit et présenté dans le quatrième chapitre. Nous y avons examiné les performances et les insuffisances.

Nous avons tenté dans notre conclusion de replacer le phénomène de la pollution atmosphérique dans un contexte plus vaste selon des perspectives à long terme, embrassant plusieurs aspects liés à l'origine première des émissions polluantes et reposant sur la plateforme de modélisation développée.

# **Chapitre I**

## **Caractéristiques générales de la pollution atmosphérique.**

## **I.1 Introduction.**

L'atmosphère est un mélange de gaz contenant essentiellement de l'azote (78 %) et de l'oxygène (21 %). La quantité restante est constituée de gaz sous forme de traces (vapeur d'eau, gaz carbonique, ozone, hélium, argon, néon, krypton, xénon, ...). Des poussières d'origines minérales et organiques en suspension dans l'air s'ajoutent à cette composition. Ainsi, les polluants font partie d'un infime pourcentage de l'atmosphère mais dont les conséquences peuvent être graves si leurs concentrations sont trop fortes.

L'existence d'une espèce chimique dans l'air n'est pas néfaste en soi mais c'est son taux de concentration qui détermine son caractère polluant.

Ces hausses de concentrations entraînent des dommages à la santé humaine et à l'environnement et endommagent également à long terme, les ressources nécessaires au développement durable de la région touchée par ce phénomène.

La pollution atmosphérique obéit à des mécanismes qui font que les polluants émis subissent une dispersion due aux conditions météorologiques ainsi que des transformations chimiques pour enfin constituer les immissions. Les immissions étant les concentrations de polluants dans l'air ambiant et représentent le stade final du cycle de la pollution atmosphérique.

## **I.2 Définitions.**

De manière générale, la pollution atmosphérique se définit comme étant toute modification de l'atmosphère ambiante apparaissant sous trois formes, soit gazeuse par la présence de gaz nouveaux ou par l'augmentation de concentration de certains gaz, soit solide par la présence de poussières en suspension de taille plus ou moins grande, soit plus rarement liquide causée par les aérosols ou le brouillard.

L'Organisation de Coopération et de Développement Economique (O.C.D.E) définit la pollution atmosphérique comme « l'introduction par l'homme directe ou indirecte de substances ou d'énergie dans l'atmosphère qui entraîne des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux systèmes écologiques, à porter atteinte aux agréments ou à gêner les autres utilisations légitimes de l'environnement ».

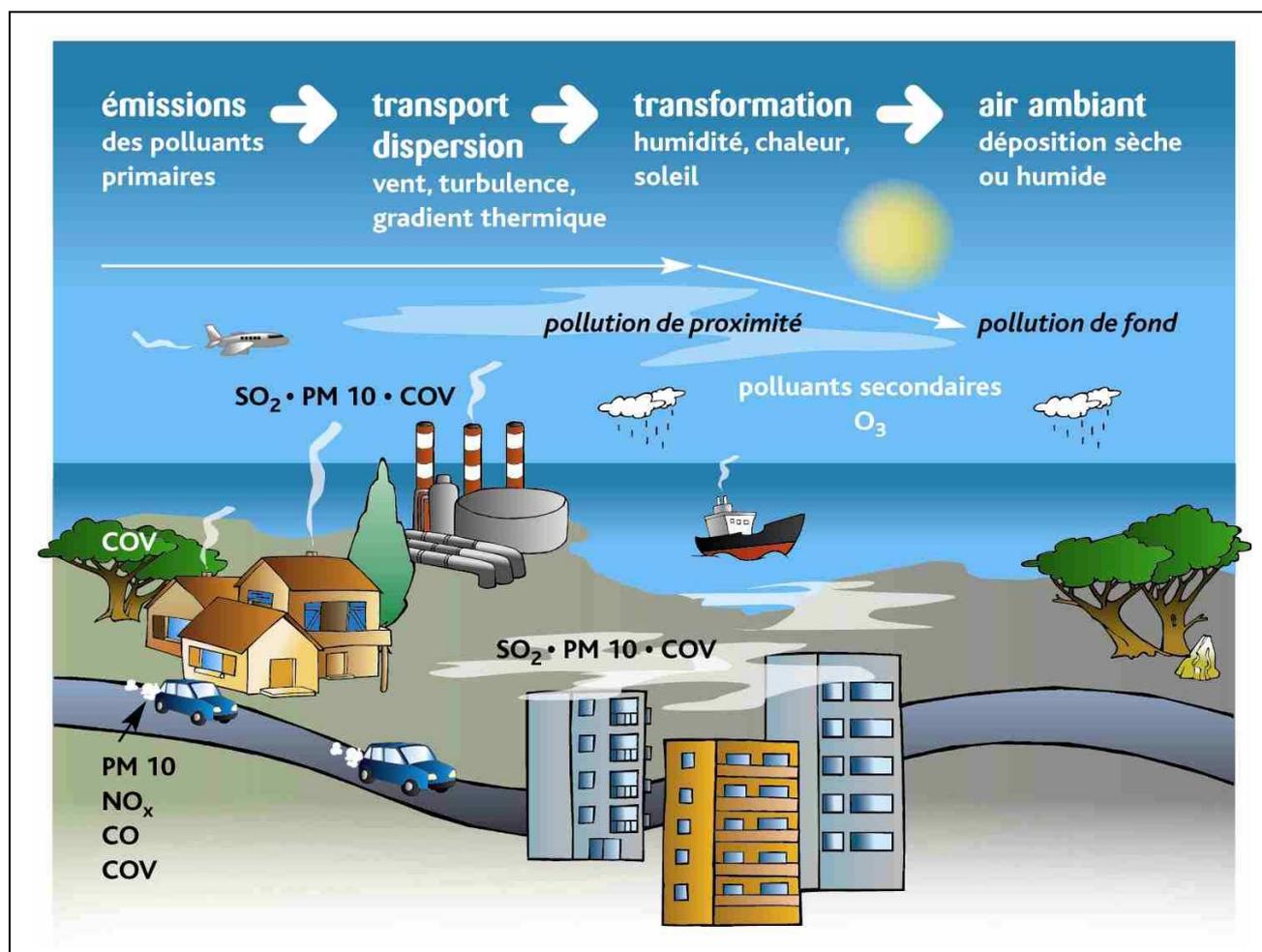
En Algérie, les pouvoirs publics ont défini la pollution atmosphérique, à travers l'article 44 de la Loi N° 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, comme suit :

Constitue une pollution atmosphérique au sens de la présente loi, l'introduction, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances de nature à :

- mettre en danger la santé humaine ;
- influencer sur les changements climatiques ou appauvrir la couche d'ozone ;
- nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes ;
- compromettre la sécurité publique ;
- incommoder la population ;
- provoquer des nuisances olfactives ;
- nuire à la production agricole et aux produits agro-alimentaires ;
- altérer les constructions et porter atteinte au caractère des sites ;
- détériorer les biens matériels (JORADP, 2006).

### **I.3 Les mécanismes de la pollution atmosphérique.**

La pollution atmosphérique est un phénomène très complexe compte tenu de la diversité des polluants susceptibles d'être présents dans l'air. Les niveaux de pollution au sol dépendent de la nature et des conditions de rejets polluants ainsi que des conditions météorologiques qui déterminent le transport, la diffusion et les retombées de ces mêmes polluants. Ces phénomènes ont lieu dans la troposphère qui représente la plus basse couche de l'atmosphère. Les processus qui régissent la pollution atmosphérique s'échelonnent en plusieurs étapes. Tout d'abord s'effectue l'émission des polluants, rapidement suivie de leur dispersion puis de la phase de transformation chimique, qui a lieu au sein même de l'atmosphère (**Figure I.1**).



**Figure I.1** : Mécanismes de la pollution atmosphérique.  
**Source** : Association de surveillance de la qualité de l'air - AIRFOBEP.

### I.3.1 Les émissions.

Les émissions de polluants ont une forte influence sur la qualité de l'air. Les polluants primaires, dont les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), le monoxyde de carbone (CO), les particules en suspension (PM) et certains composés organiques volatils (COV), sont directement émis dans l'atmosphère. Ils proviennent aussi bien des sources fixes (incinération des déchets, chauffages urbains, activités industrielles, domestiques ou agricoles) que des sources mobiles, en particulier les automobiles (Bouziani, 2010).

### I.3.2 Le transport et la dispersion.

Les polluants gazeux ou aérosols peuvent être transportés à des distances variables par les vents et les courants atmosphériques. Pendant leur transport, les substances polluantes sont transformées, l'atmosphère fonctionnant comme une véritable usine chimique. La dispersion des polluants dans l'air résulte de nombreux facteurs. Cependant, la qualité de la dispersion influe directement sur la qualité de l'air : si la dispersion est bonne, les concentrations peuvent

rester faibles malgré des rejets importants. Par contre, si la dispersion se fait mal, des émissions relativement limitées peuvent suffire à dégrader la qualité de l'air (Deletraz, 2002). Le phénomène de dispersion est primordial puisqu'il détermine l'accumulation d'un polluant ou sa dilution dans l'atmosphère. La dispersion dépend de plusieurs paramètres dont les conditions météorologiques et la topographie locale (altitude, relief, cours d'eau, bord de mer...).

Deux types de dispersion peuvent être distingués :

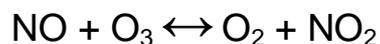
- La dispersion verticale, liée au gradient vertical de température de la couche de surface, qui est la couche inférieure de l'atmosphère influencée par la présence du sol,
- La dispersion horizontale, également dénommée transport, liée à la vitesse et à la direction du vent.

Ainsi, une situation anticyclonique, caractérisée par des vents faibles, limite la dispersion horizontale. En hiver, des températures basses et un ciel dégagé favorisent de plus l'inversion du gradient thermique vertical (présence d'air plus chaud en altitude qu'au sol), ce qui diminue la dispersion verticale. Cette situation favorise des niveaux de pollution élevés car elle entraîne une accumulation des gaz, et conduit ainsi à des pics de pollution. A l'inverse, une situation dépressionnaire, généralement associée à des vents plus sensibles, permet une bonne dilution des polluants dans l'atmosphère. De plus, les précipitations, entraînant le dépôt humide des polluants (phénomène de lessivage), contribuent à la diminution des concentrations.

### **I.3.3 Les transformations chimiques.**

Au cours de la dispersion, les polluants peuvent se transformer par réactions chimiques complexes pour former les polluants secondaires tels que l'ozone (O<sub>3</sub>) et certains COV. Le dioxyde d'azote peut également être considéré comme essentiellement secondaire dans la mesure où les émissions directes des sources, bien que non négligeables, demeurent minoritaires.

La production d'ozone nécessite un fort rayonnement solaire et la présence de certains précurseurs, tels que les composés organiques volatils. Des réactions mêlant polluants primaires et secondaires se produisent alors, la plus courante étant la réaction réversible entre l'ozone et les oxydes d'azote :



qui a lieu en présence de lumière et pour de fortes concentrations en monoxyde d'azote. Cette réaction peut expliquer l'observation de teneurs en ozone plus faibles dans les agglomérations pendant les heures où le trafic est important (destruction de l'ozone par réaction avec le monoxyde d'azote). Alors que les stations périurbaines, situées sous le vent de la ville, connaissent les pointes maximales d'ozone, car en l'absence d'émissions importantes de monoxyde d'azote, les masses d'air polluées transportées s'enrichissent en ozone.

#### **I.4 La pollution photochimique à l'ozone.**

L'ozone est un indicateur majeur de la pollution photochimique (ou pollution photo-oxydante) qui est un ensemble de phénomènes complexes conduisant à la formation en plus de l'ozone, du peroxyde d'hydrogène, des aldéhydes et du peroxy acétyl nitrate (PAN) à partir des polluants primaires que sont les oxydes d'azote et les composés organiques volatils (COV) émis essentiellement par les rejets industriels et automobiles. Cette transformation est favorisée par l'énergie apportée par le rayonnement Ultra Violet (UV) solaire lors de situations estivales anticycloniques propices à la mauvaise dispersion des polluants. Ces phénomènes ont lieu dans les couches d'air proche du sol et dans la troposphère libre.

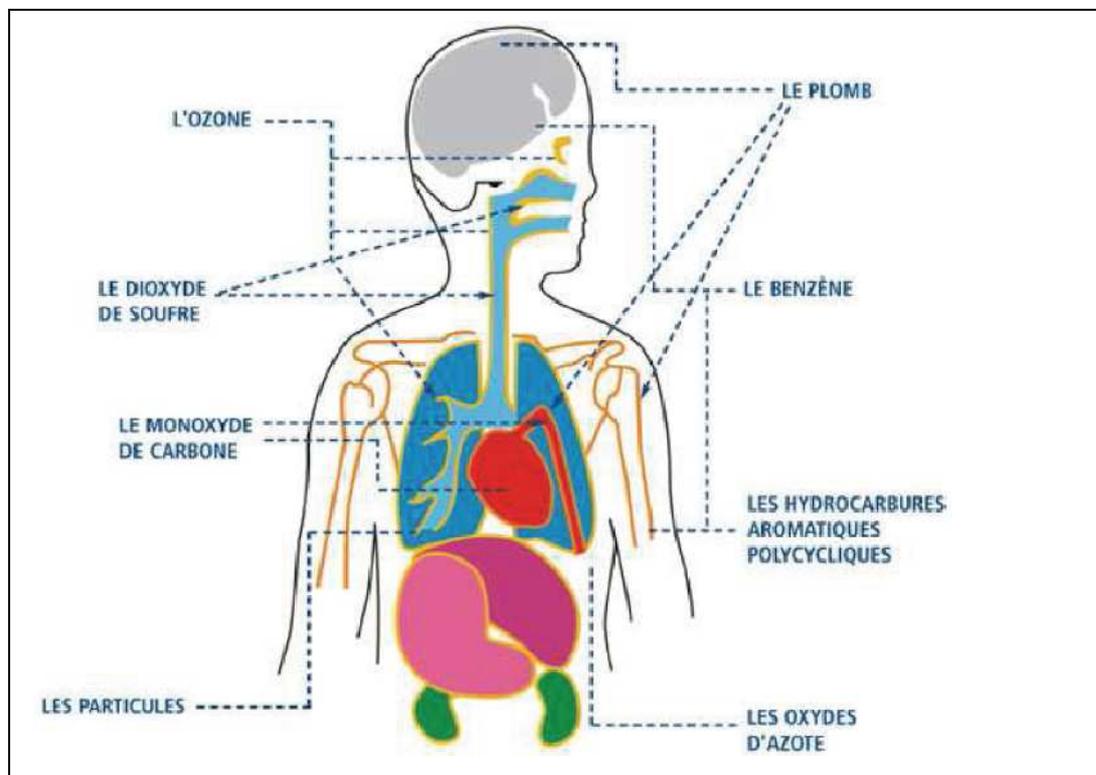
Les concentrations d'ozone mesurées loin des zones urbaines (sources des précurseurs) sont plus élevées que celles mesurées près des sources. En effet, sur une ville, les émissions du monoxyde d'azote (NO), notamment liées au trafic automobile, sont élevées. L'ozone est détruit par le monoxyde d'azote qui agit comme un puits d'ozone puisqu'il le consomme. Si le nuage de polluants formé sur la ville se déplace à la campagne, ou les émissions de monoxyde d'azote sont moindres, les concentrations d'ozone augmentent puisque l'ozone n'est plus consommé.

L'une des propriétés de l'ozone est d'être particulièrement stable là où l'air est pur. C'est la raison pour laquelle les valeurs d'ozone peuvent être élevées en dehors des agglomérations.

L'ozone troposphérique est dangereux pour les personnes qui fournissent des efforts pour préserver leurs santés en pratiquant du sport loin des zones urbaines. En effet, ces zones sont propices aux pics de pollution photochimique par l'ozone qui est abondamment et profondément inhalé par les sportifs qui pratiquent leurs disciplines de manière intense et soutenue.

## I.5 Impact sanitaire de la pollution atmosphérique.

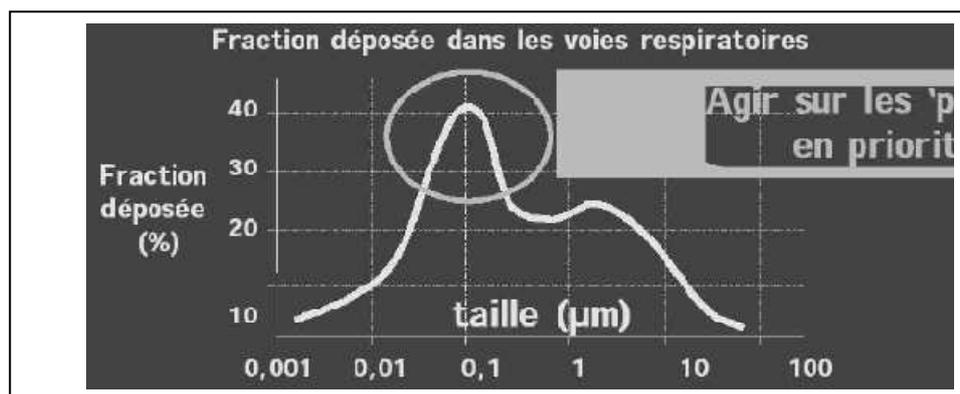
Les pollutions gazeuses et particulaires affectent diverses zones vitales du corps humain (**Figure I.2**). On note notamment qu'elles affectent fortement et parfois de manière irréversible, les fonctions pulmonaires, le cœur, les reins mais aussi les os et les fonctions encéphaliques dans leur globalité (Terrenoire, 2009).



**Figure I.2:** Zones du corps humain affectées en fonction de la nature du polluant.  
**Source :** Association de surveillance de la qualité de l'air - Atmo Nord – Pas-de-Calais.

Les effets des polluants les plus courants sont :

– **Les particules** : plus les particules sont fines plus elles pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire et plus leur temps de séjour y est important. Elles ont une double action liée aux particules proprement dites et aux polluants qu'elles transportent (métaux, hydrocarbures, dioxyde de soufre, etc.). Elles irritent le système respiratoire humain et peuvent contribuer au déclenchement de maladies respiratoires aiguës. Leur dépôt dans les voies respiratoires est plus important s'ils ont une taille de  $0.1 \mu\text{m}$  (**Figure I.3**).



**Figure I.3 :** Fraction de particules déposées dans les voies respiratoires en fonction de la taille des particules  
**Source :** ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie - France).

- **SO<sub>2</sub>** : le SO<sub>2</sub> entraîne une inflammation des bronches avec un spasme qui provoque une altération de la fonction respiratoire.
- **NO-NO<sub>2</sub>** : le NO<sub>2</sub> est toxique (40 fois plus que le CO, 4 fois plus que le NO). Le NO<sub>2</sub> pénètre profondément dans les poumons. Les pics de concentrations sont plus nocifs qu'une même dose sur une longue période. Le NO est un gaz irritant pour les bronches, il réduit le pouvoir oxygénateur du sang.
- **COV** : certains composés organiques tels que les aromatiques, les oléfines provoquent des irritations des yeux. Les aldéhydes sont de puissants irritants des muqueuses. Certains COV tels que le benzène, sont cancérigènes.

L'existence de relations, à court et long terme, entre les niveaux de pollution atmosphérique et plusieurs indicateurs sanitaires (mortalité, hospitalisations, passages aux urgences...) est à présent largement démontrée.

En 2004, dans les 26 villes européennes du programme APHEIS (Air Pollution and Health European Information System), l'évaluation d'impact sanitaire sur les 36 millions d'habitants a estimé à 11 375 le nombre de décès prématurés qui pourraient être prévenus chaque année si, toutes choses égales par ailleurs, l'exposition à long terme aux PM<sub>2,5</sub> était ramenée à 20 µg/m<sup>3</sup> dans chaque ville. Sa réduction à 15 µg/m<sup>3</sup> entraînerait la prévention de quelques 16 926 décès prématurés. Une moyenne annuelle qui n'excéderait pas 15 µg/m<sup>3</sup> se traduirait par un gain de 2 à 13 mois d'espérance de vie pour une personne de 30 ans.

Sur un plan plus global, selon une évaluation de la charge de morbidité due à la pollution de l'air effectuée par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S), plus de 2 millions de décès prématurés peuvent chaque année être attribués aux effets de la pollution de l'air extérieure et intérieure. Plus de la moitié de cette charge de morbidité est supportée par les populations des pays en développement. L'Organisation Mondiale de la Santé émet des lignes directrices

relatives à la qualité de l'air visant à offrir des conseils sur la façon de réduire les effets sanitaires de la pollution de l'air (OMS, 2006).

La pollution de l'air constatée dans les grandes villes serait à l'origine d'une augmentation de 30% du taux de naissances prématurées dans ces agglomérations. A l'origine de ce phénomène, l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (H.A.P) dont le Benzo(a)pyrène ( $C_{20}H_{12}$ ) représente l'un des polluants les plus toxiques. Le nitrate d'ammonium ( $NH_4NO_3$ ), substance chimique émise principalement par les secteurs industriels et agricoles, serait quant à lui associé à une augmentation de 21% du risque de naissance prématurée. S'agissant du benzène ( $C_6H_6$ ) et autres particules fines contenues dans l'air des grandes villes, ils sont eux-aussi impliqués dans une augmentation de 10% du risque de prématurité (Wilhelm et al. 2011).

L'impact sur la santé des citoyens exposés de manière chronique aux polluants présents dans l'air représente donc un véritable enjeu en terme de santé publique. Pour mesurer l'ampleur de ce risque plusieurs méthodes peuvent être utilisées, notamment la méthode de l'EIS (Évaluation d'Impact sur la Santé) qui apparaît adaptée aux moyens que les pays émergents peuvent consacrer à la recherche en santé environnementale, et qu'elle se présente comme une alternative aux études écologiques temporelle difficiles à mettre en œuvre et nécessitant davantage de données et de compétences en biostatistique pas toujours disponibles.

Elle offre également l'avantage de constituer pour les décideurs un outil d'aide à la décision en mettant à leur disposition une information compréhensible en termes de quantification du risque et d'évaluation du bénéfice à attendre des actions de prévention possibles (Laid, 2006).

Une politique de réduction de la pollution atmosphérique ne peut avoir que des effets positifs sur la santé des populations exposés.

## **I.6 La surveillance de la qualité de l'air.**

La surveillance de la qualité de l'air d'une ville nécessite un réseau de surveillance de la pollution atmosphérique dont les missions de base sont :

- la surveillance de la qualité de l'air ;
- la diffusion des résultats et des prévisions ;
- l'information du public et des décideurs lors des dépassements des seuils d'information,
- la recommandation et l'alerte.

Dès que le niveau d'information et de recommandation est atteint, il peut être préconisé de réduire la vitesse de 20 km/h en zone périurbaine et hors agglomération, de privilégier les modes de déplacement non polluants, d'éviter les exercices physiques intenses.

Il est recommandé aux populations fragiles (enfants, personnes âgées, patients atteints d'une maladie chronique cardiaque ou respiratoire) de limiter les déplacements et de respecter scrupuleusement leur traitement médical en cours.

La surveillance de la qualité de l'air se fait essentiellement à l'aide d'analyseurs fonctionnant en station fixe ou en camion laboratoire mobile. Ces analyseurs fournissent des valeurs tous les quarts d'heure en continu, 24h/24, 365j/365. Les résultats bruts obtenus permettent, après validation et en y intégrant tous les étalonnages nécessaires, de fournir toutes les données utiles exploitables des périodes que l'on souhaite étudier (moyennes horaires, journalières, mensuelles, annuelles, minima, maxima, percentiles...).

Ces stations constituent ainsi un réseau de mesure de la qualité de l'air permettant de connaître la pollution urbaine de fond en étant éloignées des voies de circulation et de proximité en étant à proximité du trafic routier. Elles répondent à une préoccupation de santé publique et à la réglementation en vigueur.

Les villes algériennes équipées de réseaux de mesure de la qualité de l'air sont Alger, Annaba, Skikda et Oran.

### **I.7 Prévisions des pics de pollution atmosphérique.**

Les prévisions et cartographies de la qualité de l'air sont le résultat de simulations numériques effectuées à l'aide de modèles de chimie-transport qui permettent de calculer l'évolution de la pollution dans les basses couches de l'atmosphère, à différentes échelles spatiales, globale, régionale et locale.

Généralement, ce sont des modèles déterministes eulériens tridimensionnels permettant de suivre l'évolution au cours du temps des concentrations de polluants. Les processus physico-chimiques sont représentés par des équations mathématiques résolues numériquement en chaque nœud d'une grille tridimensionnelle couvrant les basses couches de l'atmosphère au dessus du domaine d'étude.

La prévision de la qualité de l'air répond à deux objectifs principaux :

- Informer la population sur la qualité de l'air,
- Anticiper des mesures de réduction des rejets polluants.

La plateforme de prévisions permet de prévoir les phénomènes de pollution et de mettre à disposition la cartographie en temps réel de la qualité de l'air, avec des concentrations évaluées en tout point du territoire surveillé. Généralement, la prévision spatialisée de la qualité de l'air doit être fournie pour le jour même et pour les deux jours à venir. Les déplacements des masses d'air polluées sont alors modélisées et visualisables heure par heure.

## **I.8 La réduction de la pollution atmosphérique.**

Les mesures de réduction de la pollution atmosphérique peuvent être directes, agissant à la source grâce à des dispositifs techniques, ou, indirectes à l'aide d'actions visant à modifier le comportement des acteurs.

Les dispositifs techniques aspirent à améliorer les combustibles utilisés ainsi que les installations de combustion. Dans ce cadre, le suivi et le contrôle des émissions s'avèrent essentiels pour toute stratégie de réduction des rejets gazeux polluants.

La réduction de la pollution atmosphérique repose également sur la réglementation à travers des mesures fiscales, des instruments économiques et des mesures incitatives.

Les réglementations concernent aussi bien les sources fixes, notamment les installations industrielles, que les sources mobiles comme les transports. Elles visent en général, à limiter les flux d'émission et sont élaborées dans le cadre d'accords internationaux, notamment à travers le protocole de Kyoto, ratifié par 156 pays dont l'Algérie par le décret présidentiel N° 04-144 du 28 avril 2004.

Généralement, les autorités en charge de la gestion des risques, sur la base des législations nationales ou supranationales, fixent des seuils d'information et d'alerte pour protéger la santé et la sécurité des biens et personnes. Seul le second seuil doit entraîner des mesures de réduction de la pollution. Ces mesures peuvent concerner, avec diverses graduations possibles, en fonction de la gravité de l'épisode de pollution concerné, des diminutions ou arrêt des émissions des gros émetteurs industriels responsables de la pollution en cours par le ralentissement de la production, le changement du combustible par autre moins polluant ou bien carrément l'arrêt complet de l'activité industrielle. Ces mesures peuvent concerner également les transports automobiles par des ralentissements de la vitesse maximale autorisée des axes déterminés de circulation, ou par une circulation alternée, en fonction du numéro de la plaque minéralogique du véhicule qu'il soit pair ou impair.

## **I.9 Législation concernant la pollution atmosphérique.**

Les États définissent les normes de qualité de l'air selon les recommandations des organismes internationaux tel que l'Organisation mondiale de la santé.

L'Algérie a établi un arsenal juridique pour lutter contre la pollution de l'air, notamment la Loi N° 03-10 du 19 Juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. Le chapitre 2 de cette Loi est entièrement dédié à la protection de l'air et de l'atmosphère.

En outre, le Décret exécutif n° 06-02 du 07 janvier 2006 confie la surveillance de la qualité de l'air à l'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable et donne les définitions suivantes:

**Objectifs de qualité** : Un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base de connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances sur la santé humaine ou sur l'environnement, à atteindre dans une période donnée.

**Valeur limite** : Un niveau maximal de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base de connaissances scientifiques.

**Seuil d'information** : Un niveau de concentration des substances polluantes dans l'atmosphère au delà duquel une exposition de courte durée a des effets limités et transitoires sur la santé de catégories de la population particulièrement sensibles.

**Seuil d'alerte** : Un niveau de concentration des substances polluantes dans l'atmosphère au delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou pour l'environnement.

**Centile 98** : Pourcentage de valeurs de dépassement autorisé par année civile, soit 175 heures de dépassement autorisées par année civile de 365 jours.

**Centile 99,9** : Pourcentage de valeurs de dépassement autorisé par année civile, soit 24 heures de dépassement autorisées par année civile de 365 jours.

Le Décret exécutif n° 06-02 du 07 janvier 2006 définit les objectifs et les valeurs limites de la qualité de l'air (**Tableau I.1**).

**Tableau N° I.1 :** Objectifs et valeurs limites de la qualité de l'air établis par le Décret exécutif N° 06-02 du 07 janvier 2006.

Polluants	Normes algériennes en µg/m <sup>3</sup>	
	Objectif de qualité	Valeur limite
Dioxyde d'azote	135	200
Dioxyde de soufre	150	350
Ozone	110	200
Particules fines en suspension	50	80

Le même texte précise les seuils d'information et d'alerte à partir desquels doivent être déclenchées les mesures d'urgence visant à réduire les activités polluantes par les collectivités locales concernées, l'objectif étant de prévenir des situations où une exposition, même de courte durée, qui pourrait entraîner des effets négatifs sur l'homme ou sur l'environnement. (**Tableau I.2**).

**Tableau N° I.2 :** Les seuils d'information et d'alerte établis par le Décret exécutif N° 06-02 du 07 janvier 2006.

Polluants	Normes algériennes en µg/m <sup>3</sup>	
	Seuil d'information	Seuil d'alerte
Dioxyde d'azote	400	600
Dioxyde de soufre	350	600
Ozone	180	360

Lorsque les seuils d'information et les seuils d'alerte fixés sont atteints ou risquent de l'être, le Décret exécutif N° 06-02 du 07 janvier 2006 donne toute latitude au Wali concerné de prendre toutes les mesures visant à protéger la santé humaine et l'environnement ainsi que les mesures de réduction et/ou de restriction des activités polluantes.

## **I.10 Conclusion.**

Dans ce premier chapitre, différents mécanismes de la pollution de l'air ont été abordés ainsi que leurs effets néfastes. Les composés chimiques peuvent être transportés à une distance plus ou moins longue selon les conditions météorologiques et selon leur durée de vie. L'impact des polluants peut ainsi se manifester à proximité des sources d'émissions ou à des distances plus importantes comme c'est le cas de l'ozone troposphérique. La bonne compréhension des mécanismes régissant la pollution atmosphérique est absolument nécessaire afin d'y faire face de manière efficace et durable.

Nous avons également passé en revue les moyens mis en place par le législateur Algérien et les conventions internationales afin de lutter contre la pollution atmosphérique. L'application de ces textes de Loi ne peut se faire efficacement que si elle repose sur des moyens techniques et scientifiques fiables.

# **Chapitre II**

## **Cadastre des émissions de polluants atmosphériques.**

## **II.1 Introduction.**

Le cadastre des émissions de polluants atmosphériques, appelé communément cadastre d'émissions, est une évaluation qualitative et quantitative d'une sélection de polluants atmosphériques émis par des sources naturelles et surtout par des sources liées aux activités humaines au niveau d'une zone géographique déterminée, pendant une période de temps donnée.

Un cadastre d'émissions recense sur un territoire donné la totalité des sources d'émissions non négligeables telles que le transport, le secteur résidentiel, l'industrie et le traitement des déchets. C'est une base de données, conséquente, des émissions de différentes espèces polluantes pour un territoire identifié, avec des qualités d'exhaustivité, de cohérence et d'exactitude, selon les connaissances du moment.

Le cadastre d'émissions présente sous forme cartographique la localisation de ces sources et les quantités de rejets gazeux associés pour chaque type de polluant.

A l'aide d'un Système d'Information Géographique (S.I.G), les émetteurs sont spatialisés, le plus précisément possible, sur une grille d'espace et souvent découpés en plusieurs tranches de temps.

Le cadastre d'émissions permet une connaissance fine des émissions, qui est primordiale pour la surveillance de la qualité de l'air car celle-ci dépend intimement des émissions, même s'il n'y a pas de lien simple et direct entre les deux.

## **II.2 Applications et utilisations du cadastre des émissions.**

Dans la plupart des cas, le cadastre des émissions permet:

- L'évaluation et information sur les niveaux de rejets en polluants.
- La détermination des responsabilités de chaque secteur émetteur dans les rejets de polluants à l'atmosphère.
- L'aide à la décision pour les collectivités locales dans les choix stratégiques mis en œuvre.
- Le test des scénarios de réduction des émissions.
- L'évaluation des progrès réalisés par la mise en œuvre d'une politique de transport ou d'aménagement du territoire.
- L'optimisation du réseau de surveillance de la qualité de l'air.
- La réalisation d'une étude prospective des tendances des émissions à court terme.

- L'évaluation de l'impact de ces tendances sur la santé des populations et sur l'environnement.
- L'élaboration d'un plan d'action pour la réduction de la pollution atmosphérique et l'amélioration de la qualité de l'air.

Le cadastre des émissions permet également de mettre en œuvre des applications utilisant des outils géostatistiques. Il permet, enfin, d'estimer les rejets de gaz à effet de serre dans le cadre de l'évaluation des changements climatiques.

### **II.3 Utilisateurs potentiels du cadastre des émissions.**

Les utilisateurs des résultats du cadastre des émissions sont, avant tout, les acteurs qui traitent, de près ou de loin, de la qualité de l'air. Outre les organismes de surveillance de la qualité de l'air, on trouve les décideurs, les politiques, les universitaires et chercheurs, les bureaux d'études et les professionnels de la santé. L'utilisation d'un cadastre des émissions induit des critères de fiabilité qui diffèrent selon l'usage spécifique du cadastre par les différents types d'utilisateurs cités plus haut.

### **II.4 Méthodologies pour la construction des cadastres d'émissions.**

La connaissance des quantités de certaines substances rejetées dans l'atmosphère est une étape nécessaire et fondamentale à toute politique de protection de l'Environnement. Cette quantification s'effectue à partir de règles spécifiques qui peuvent varier d'un cadastre à l'autre.

Cet état de fait présente l'énorme désavantage de ne pouvoir disposer de données comparables. A l'échelon international, des travaux d'harmonisation sont engagés depuis plusieurs années entre divers organismes internationaux : Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), Agence Internationale de l'Energie, Commission Européenne. Ces travaux se poursuivent conjointement à l'amélioration des méthodologies permettant d'estimer les rejets de divers types d'émetteurs.

Aux Etats-Unis, le Toxics Release Inventory (TRI) de l'Agence américaine de protection de l'environnement comporte des informations sur près de 650 substances et catégories de substances chimiques produites annuellement par le milieu industriel tel que la manufacture, l'exploitation du métal et du charbon, la production d'électricité et le traitement des déchets potentiellement dangereux. Elle est présentée dans la collection de bases de données toxicologiques TOXNET de la National Library of Medicine. Les données, datant de 1987,

couvrent les rejets dans l'air, dans l'eau, sur place ou hors site (enfouissement/épandage), l'injection souterraine, et les transfères dans les sites de traitements. En plus, les informations sur la réduction à la source et le recyclage sont aussi incluses. L'industrie a l'obligation de déclarer ses rejets pour un certain nombre de substances à partir d'un certain seuil.

En Europe, la méthodologie CORINAIR (CORE INVENTORY AIR emissions) est destinée à faciliter la réalisation des inventaires d'émission de polluants dans l'atmosphère. Elle a été développée depuis 1989 par la Commission de l'Union Européenne et reprise par l'Agence européenne de l'Environnement. Cette méthodologie est régulièrement mise à jour selon les connaissances scientifiques du moment.

La nomenclature CORINAIR baptisée SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution) constitue un standard européen, voire international, avec une liste détaillée d'activités contenant près de 400 items.

Cette nomenclature permet de classer les émetteurs en fonction de 11 catégories :

- 1- Combustion dans les industries de l'énergie et de la transformation de l'énergie.
- 2- Combustion hors industrie.
- 3- Combustion dans l'industrie manufacturière.
- 4- Procédés de production :
- 5- Extraction et distribution de combustibles fossiles/ énergie géothermique :
- 7- Transports routiers.
- 8- Autres sources mobiles et machines.
- 9- Traitements et élimination des déchets.
- 10- Agriculture et sylviculture.
- 11- Autres sources et puits.

## **II.5 Les principes de la méthodologie CORINAIR.**

La méthodologie CORINAIR vise à obtenir des inventaires offrant les qualités fondamentales indispensables en termes de cohérence, complétude, comparabilité et traçabilité.

Généralement, les substances étudiées sont relatives aux phénomènes :

- d'acidification :  $\text{SO}_2$ ,  $(\text{SO}_2 + \text{SO}_3)$ ,  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ),
- d'eutrophisation :  $\text{NH}_3$ ,
- de pollution photochimique :  $\text{CO}$  et  $\text{COVNM}$ ,  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ),
- d'accroissement de l'effet de serre :  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , HFC, PFC et  $\text{SF}_6$ ,

ainsi que d'autres polluants:

- les métaux lourds : As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn,
- les polluants organiques persistants (POP) : HAP, dioxines et furannes, PCB, HCB,
- les particules : TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1.0</sub>.

Les émissions sont estimées pour chacune des activités émettrices élémentaires retenues pour l'inventaire en considérant séparément s'il y a lieu les différentes catégories de sources :

- **Les grandes sources ponctuelles** : Il s'agit des sources fixes canalisées ou diffuses dont les rejets potentiels ou effectifs dans l'atmosphère excèdent certains seuils. Exemple : cimenterie, verrerie, production de chaux, raffinerie, centrales électriques.
- **Les grandes sources linéaires** : essentiellement constituées par les principaux axes de communication (routier, ferroviaire, fluvial et maritime).
- **Les sources surfaciques** : cette catégorie couvre, le solde des sources constitué par, d'une part, les sources fixes non incluses dans la catégorie des grandes sources ponctuelles et, d'autre part, les sources mobiles. Cette classification vise à prendre en compte par paquets des sources homogènes qu'il n'est pas possible de caractériser individuellement, faute de statistiques disponibles ou de traitements trop lourds à mettre en place.

Les émissions d'une activité donnée sont exprimées par la formule générale et schématique suivante :

$$E_{s,a,t} = A_{a,t} \times F_{s,a} \quad (\text{II.1})$$

avec

E : émission relative à la substance "s" et à l'activité "a" pendant le temps "t"

A : quantité d'activité relative à l'activité "a" pendant le temps "t"

F : facteur d'émission relatif à la substance "s" et à l'activité "a".

Pour l'ensemble des activités, les émissions totales sont exprimées par la formule suivante :

$$E_{s,t} = \sum_{a=1}^{a=n} E_{s,a,t} \quad (\text{II.2})$$

avec

n : nombre d'activités émettrices prises en compte.

Dans certains cas, les émissions présentent des relations complexes avec de nombreux paramètres caractéristiques et il est alors nécessaire de recourir à des modèles spécifiques pour obtenir une bonne représentation des phénomènes. C'est le cas du trafic routier ou des émissions biogéniques.

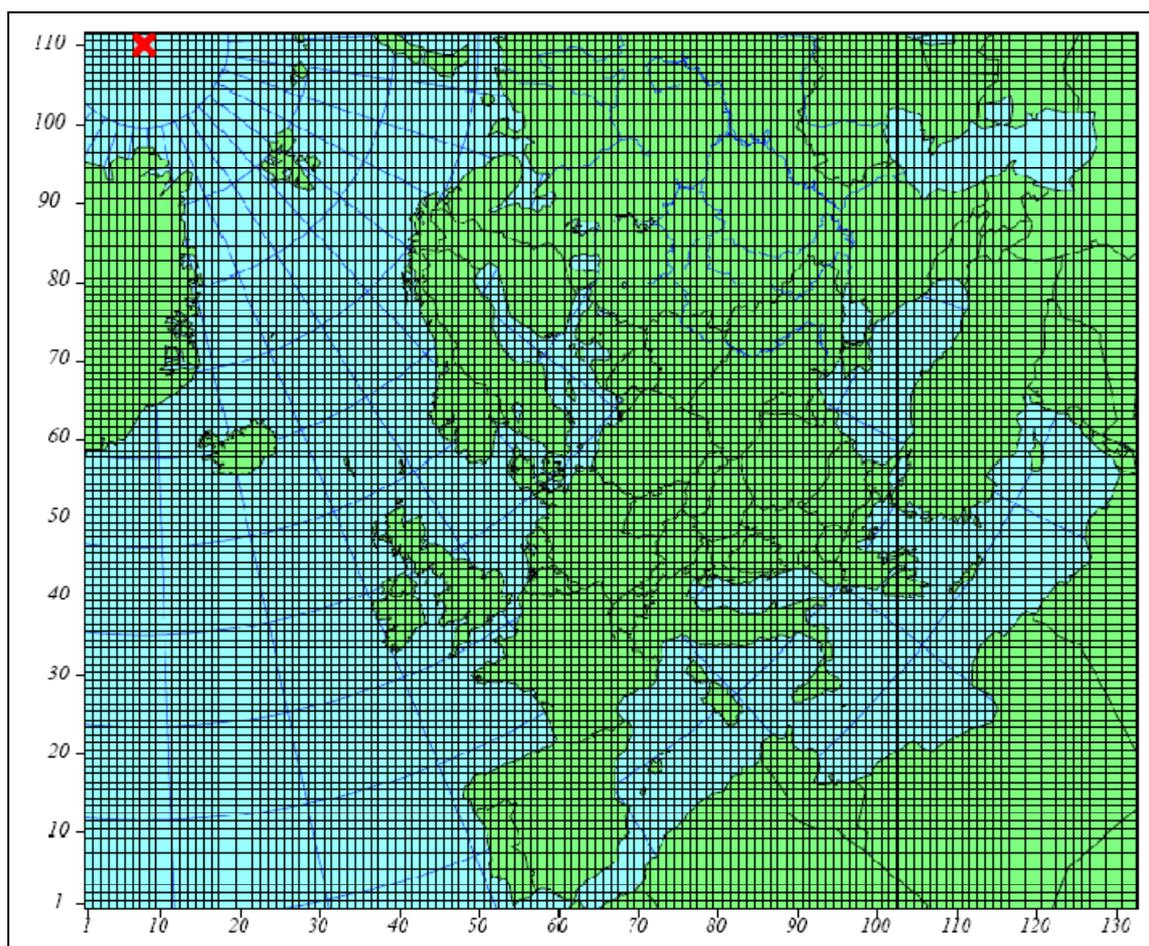
Enfin, il sera toujours possible de se ramener à une expression de la forme de l'équation (II.1) en rapportant les émissions à un seul paramètre relatif à l'activité. Cette représentation d'une simplicité extrême, masque la structure réelle et éventuellement complexe des émissions de l'activité, peut conduire à des interprétations erronées.

## **II.6 Le programme EMEP.**

Le programme européen de surveillance et d'évaluation EMEP (European Monitoring and Emission Program) a conduit à former une série de groupes de travail sur les techniques d'inventaires d'émission pour développer une méthodologie de calcul et de format pour les émissions des polluants atmosphériques pertinents.

Ce programme a conduit à la proposition d'un guide commun lié aux programmes EMEP et CORINAIR: le guide **EMEP/Corinair Emission Inventory Guidebook**. Ainsi, le programme EMEP joue un rôle déterminant en fournissant une base scientifique pour l'élaboration d'une politique régionale efficace de réduction de la pollution atmosphérique en Europe.

L'inventaire EMEP regroupe les émissions anthropiques et biogéniques pour l'ensemble de l'Europe (Vestreng, 2003). L'inventaire EMEP, correspond à une grille de 111 x 132 mailles, qui englobe les pays d'Europe mais aussi une bonne partie de l'Algérie. Sa résolution spatiale horizontale est de 50 km x 50 km depuis 1997 (**Figure II.1**).



**Figure II.1 :** Grille des émissions du cadastre EMEP (mailles 50 x 50 km).

Cependant, la résolution spatiale de la grille des émissions du cadastre EMEP n'est pas suffisamment fine afin de reproduire sensiblement les épisodes de pollution à l'échelle régionale et locale. Aussi le développement d'inventaires régionaux est d'une très grande utilité pour certaines études spécifiques. Les grandes villes en Europe disposent d'un inventaire plus fin. Par exemple en France, la ville de Paris dispose d'un inventaire d'une résolution de 3 km x 3 km, mis à jour régulièrement puisque les principales sources que sont l'industrie et le trafic routier évoluent au fil du temps.

## **II.7 Le calcul des émissions.**

En général, pour construire le cadastre des émissions, l'une des deux méthodologies suivantes peut être utilisée :

- L'approche « **Bottom - up** » qui consiste à croiser une information statistique de base avec des facteurs d'émission unitaires dépendant de l'activité émettrice. L'inventaire se base sur la collecte des données procédant du niveau le plus fin vers un niveau plus agrégé, privilégiant les sources de données fines aux clés de répartitions. Cette construction est logiquement plus

coûteuse en temps et plus problématique car on doit collecter la donnée la plus fine possible et adapter soit la donnée soit la méthodologie pour former un modèle cohérent de calcul d'émissions.

- L'approche «**Top - down**» : consiste à considérer la donnée statistique générale pour calculer des émissions nationales ou régionales et à utiliser des clés de répartition ou de désagrégation pour générer des données plus fines nécessaires au calcul. On utilise alors une ou plusieurs clés de répartition afin de reconstruire une information plus fine spatialement et ainsi atteindre la résolution spatiale requise. On peut également appliquer le même principe aux données d'activités et ensuite calculer les émissions sur les données attribuées via les clés de répartition (François, 2004).

En pratique, ces deux approches sont utilisées simultanément en privilégiant généralement les données fines lorsqu'elles sont accessibles par rapport à une approche plus globale. Le calcul proprement dit des émissions, avec la(es) résolution(s) temporelle(s) requise(s) a nécessité de connaître les facteurs d'émissions relatifs aux activités des sources prises en compte (Ponche, 2002).

## **II.8 Résolution spatiale et temporelle des cadastres des émissions.**

Une fois les taux d'émissions calculés, ils doivent être répartis dans l'espace à travers le cadastre d'émissions et dans le temps à travers les profils temporels.

### **II.8.1 Résolution spatiale des cadastres des émissions.**

Le choix de l'échelle spatiale permet de définir l'unité élémentaire du cadastre. En général, elle correspond à une maille régulière dont la taille peut varier d'un à plusieurs kilomètres de coté. La résolution spatiale doit tenir compte de l'étendue de la zone d'étude afin de conserver un nombre de mailles qui permettent une gestion informatique raisonnable et de garder des temps de calculs compatibles avec les moyens et les modèles utilisés (Werner, 2009).

Pour traiter la spatialisation de l'ensemble des données d'un cadastre des émissions, les systèmes d'information géographiques (S.I.G) constituent l'outil de plus adapté (Ponche, 2002), ainsi les sources linéiques et ponctuelles peuvent être localisées exactement et sont généralement attribuées aux mailles du cadastre alors que les sources surfaciques sont dotés de facteurs suppléants qui permettent de distribuer spatialement les émissions totales.

Enfin, l'information sur les émissions non répertoriées est contenue dans ce qu'on appelle la concentration de fond.

## **II.8 .2 Résolution temporelle des cadastres des émissions.**

Les résolutions temporelles des inventaires s'échelonnent en général du pas de temps annuel au pas de temps horaire. A titre d'exemple, dans le cas du cycle photochimique de l'ozone troposphérique et compte tenu des temps caractéristiques des réactions chimiques prépondérantes, le pas de temps horaire apparaît suffisant. Si les données annuelles nécessaires aux calculs d'émissions sont relativement faciles à collecter (statistiques, consommations etc.), il n'en est pas de même au pas horaire. Cependant, pour évaluer les émissions annuelles en minimisant les incertitudes pour les calculs d'émissions il est nécessaire, de collecter les données à un pas de temps beaucoup plus fin. C'est notamment le cas pour les sources biogènes, pour lesquelles les distributions journalières voire horaires des paramètres de température et d'insolation permettent d'évaluer les émissions avec une bien meilleure précision. (Ponche, 2002)

L'échelle de temps est donc extrêmement variable selon le problème étudié. L'échelle la plus fréquente est néanmoins l'année dans le cas d'un inventaire à but comparatif ou pour suivre l'évolution des émissions à des fins de stratégies de réduction des émissions (Werner, 2009).

Les facteurs unitaires d'émission peuvent également être extrêmement variables dans le temps présentant souvent une grande variabilité au cours des saisons : par exemple, les facteurs d'émission de composés volatiles sont sensibles à la température et donc à la saison. Les émissions naturelles des écosystèmes forestiers vont également dépendre de l'état de la végétation, et donc de la saison. Les émissions liées au chauffage correspondent surtout aux périodes de froid. La dépendance des facteurs d'émission aux conditions extérieures est assez délicate à prendre en compte, notamment parce que la caractérisation de toutes les activités sur des périodes de temps assez courte est assez difficile à mettre en œuvre. Parfois, on applique des profils d'activités forfaitaires qui permettent de caractériser l'évolution des émissions au cours du temps.

Pour l'utilisation d'un cadastre à des fins de modélisation, un pas de temps plus fin allant jusqu'à l'heure est nécessaire afin de pouvoir modéliser de manière précise les phénomènes chimiques.

Des moyens automatisés peuvent être mis en place pour augmenter la fréquence de remise à jour des inventaires et les outils les plus modernes permettent de connaître la situation du trafic heure par heure pour actualiser les émissions et réaliser des prévisions de qualité de l'air qui en dépend.

## **II.9 Principales sources de pollution prises en compte dans le cadastre des émissions.**

### **II.9.1 Le transport routier.**

Les données issues du secteur transport concernent les réseaux fluviaux, maritimes, ferroviaires, aériens et routiers. Ce dernier, est généralement le réseau le plus important et qui contribue le plus aux émissions polluantes.

Les émissions des véhicules routiers sont déterminées au moyen du modèle européen COPERT et dépendent de nombreux paramètres en rapport avec :

- les caractéristiques du véhicule (voiture particulière, véhicule utilitaire léger, poids lourd, deux roues)
- le type de véhicule,
- la motorisation et le carburant (essence, gazole, GPLc, GNV),
- les équipements (pot catalytique, climatisation, type de réservoir, injection),
- l'âge du véhicule.
- les conditions d'utilisation
- le parcours annuel,
- la longueur moyenne d'un trajet,
- les réseaux empruntés (autoroute, rural, urbain) qui conditionnent pour partie les vitesses de circulation, la pente des routes, etc.
- les conditions climatiques,
- l'entretien du véhicule,
- le comportement de l'utilisateur (conduite sportive, charge du véhicule, etc.).

L'association de modèles de trafic intégrant des données de comptage et des éléments statistiques de manière à avoir une représentation réaliste du trafic sur la voie, et des facteurs d'émissions, permet d'accéder à une valeur de débit d'émission sur le site.

### **II.9.2 Energie et industrie.**

Ce secteur regroupe la combustion dans les industries de production de l'énergie et de la transformation de l'énergie, la combustion dans l'industrie manufacturière, les procédés de production, l'extraction et la distribution de combustibles fossiles, le traitement et l'élimination des déchets ainsi que l'utilisation de solvants et autres produits.

Ce type d'émissions est assimilé à des sources ponctuelles caractérisées par leur localisation, leur géométrie (forme, taille, hauteur), et les propriétés physiques et thermodynamiques du rejet (vitesse d'éjection, température, densité, débit).

Ces informations peuvent être obtenues de manière idéale auprès des industriels, mais cela n'est malheureusement pas toujours possible.

### **II.9.3 Résidentiel et tertiaire.**

Les émissions de ce secteur concernent uniquement les combustions hors industrie. Elles sont engendrées par le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire des logements, la cuisson, l'utilisation d'équipements électriques ainsi que par différentes branches du secteur tertiaire. Par nature ce sont des sources surfaciques, caractérisées par plusieurs paramètres : nature de l'émetteur (habitat, bureau, école, hôpital..), année de construction des locaux, mode et cadence de chauffage.

Ces informations sont difficiles à collecter. Elles relèvent autant de statistiques, que de données technologiques.

### **II.9.4 Biogènes et autres.**

Les émissions dues aux activités agricoles, aux traitements des déchets ainsi que les sources et les puits liés à un couvert végétal naturel doivent être répertoriées.

Ainsi, les émissions dites naturelles peuvent couvrir différents types d'émetteurs dont les principaux sont :

- les forêts et les prairies naturelles
- les feux de forêts d'importance très variable selon les années
- les eaux libres (lacs, sebkha) et les zones marécageuses
- les animaux avec les émissions de CH<sub>4</sub>
- le volcanisme

Les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de la respiration des êtres vivants (homme, mammifères, etc.) ne sont pas prises en compte, un certain état d'équilibre étant supposé.

## **II.10 Conclusion.**

Le rôle et l'importance des cadastres d'émission ont été exposés dans ce chapitre. Tout comme les données météorologiques et les conditions aux limites du domaine, la qualité du cadastre des émissions de polluants est primordiale pour la performance du système de modélisation de la qualité de l'air.

La réalisation de tel cadastre est néanmoins une tâche complexe et prend en compte un grand nombre de paramètres qui sont rarement connus avec exactitude.

La collecte des données constitutives du cadastre des émissions est une étape décisive pour la suite des travaux afin de caractériser le niveau pollution atmosphérique. Les informations fournies constituant ainsi des données incontournables dans le cadre de la mise en place d'outil de modélisation déterministe de la qualité de l'air, et plus généralement à toute politique de protection de l'environnement.

En outre, le cadastre des émissions fournit une aide précieuse lorsqu'il s'agit de faire des choix technologiques ou d'aménagements du territoire.

Dans le chapitre suivant, seront exposées les différentes étapes pour la modélisation de la qualité de l'air en prenant en compte les émissions des polluants, leurs transports et leurs transformations chimiques dans l'atmosphère.

## **Chapitre III**

# **Modélisation du transport et des transformations chimiques des polluants atmosphériques.**

### **III.1 Introduction.**

La modélisation de la chimie et du transport des polluants atmosphériques a pour but l'implémentation numérique des phénomènes qui décrivent l'évolution de ces polluants. Cette évolution est due au transport selon les événements météorologiques et aux réactions chimiques qui se produisent dans l'atmosphère.

Cette modélisation permet de connaître les concentrations de polluants au niveau du sol et par conséquent d'en estimer l'impact sur l'environnement et sur la santé des citoyens.

La modélisation de la chimie et du transport des polluants sert à prévoir le dépassement de seuils de concentration au-delà desquels les polluants sont potentiellement dangereux. Les concentrations de polluants sont prévues quotidiennement sur quelques jours suivant le jour courant. Elle sert également à des études d'impact, c'est-à-dire une prévision de la qualité de l'air sur une longue période concernant des installations industrielles ou encore le trafic routier. Ces études d'impact servent souvent d'aide à la décision sur la base de l'évaluation des conséquences de réductions d'émissions. Cette modélisation peut être utilisée en situation de crise, en cas de rejet accidentel de composés dangereux dans l'atmosphère, pour prendre des mesures appropriées.

Egalement, la simulation peut concerner des polluants jouant le rôle de traceurs passifs, c'est-à-dire des espèces ne participant pas à des réactions chimiques, par exemple, pour étudier la dispersion des métaux lourds.

A un niveau plus complexe, nous trouvons les mécanismes chimiques comme ceux du cycle de l'ozone ou des oxydes d'azote.

Le processus de formation de l'ozone qui est un phénomène complexe non linéaire, nécessite l'emploi de modèle eulérien tridimensionnel photochimique pour comprendre sa formation et analyser son évolution dans la troposphère.

### **III.2 Différents types de modélisation mathématique.**

La modélisation mathématique de la pollution atmosphérique peut être statistique, c'est-à-dire basée sur l'analyse statistique des observations recueillies en très grand nombre. Des relations semi-empiriques sont établies entre les différents paramètres influençant la qualité de l'air, tel que les paramètres météorologiques et les niveaux de concentration des polluants. Ce type de modélisation, rapide à mettre en œuvre, ne nécessite aucune formulation physico-chimique du problème néanmoins, il est nécessaire de disposer d'un très grand nombre d'observation afin d'obtenir une corrélation adéquate.

La modélisation mathématique peut être aussi déterministe, représentant mathématiquement les processus de l'atmosphère tels que la diffusion et la dispersion turbulente, l'advection mais également les dépôts et les réactions chimiques. Les modèles déterministes nécessitent de nombreuses données d'entrée comprenant les sources de polluants, la météorologie et la chimie de l'atmosphère, ce qui engendre un traitement de données conséquent. Le temps de calcul reste ensuite étroitement lié aux capacités du matériel informatique disponible (Martinet, 2004). L'avantage des modèles déterministes tient notamment dans leur capacité à simuler les polluants en tout point du domaine de simulation, même aux endroits où les mesures ne sont pas disponibles.

Il existe deux principales approches dans la modélisation déterministe, l'approche Lagrangienne et l'approche Eulérienne. Dans la première approche, les panaches de polluants sont décrits par le déplacement des éléments qui le composent et qui sont suivis dans leur trajectoire par un repère mobile.

Dans l'approche Eulérienne, le repère est fixe à partir duquel a été défini un maillage tridimensionnel composé généralement de parallélépipèdes de même taille ou de tailles différentes. Les équations sont intégrées numériquement sur ce maillage, de façon à calculer une valeur de chaque variable (vitesse, température, turbulence, concentration) en chaque sommet ou centre de maille. Cette approche repose sur une approximation tridimensionnelle des équations de la mécanique des fluides (équations de Navier-Stokes) pour la partie dynamique et de l'équation de conservation de la masse pour la dispersion des polluants. Généralement, on utilise la technique d'emboîtement, nesting en Anglais (Peim et al., 1991) qui consiste à effectuer un premier calcul sur un grand domaine, incluant un plus petit domaine. Les résultats du domaine le plus large sont utilisés comme conditions de bords pour le petit domaine.

### **III.3 Structure générale d'un modèle déterministe de la pollution atmosphérique.**

Les modèles déterministes de la pollution atmosphérique, dont la structure est présentée dans la **figure III.1**, s'efforcent de décrire le plus fidèlement possible les phénomènes physico-chimiques ainsi que leurs interactions.

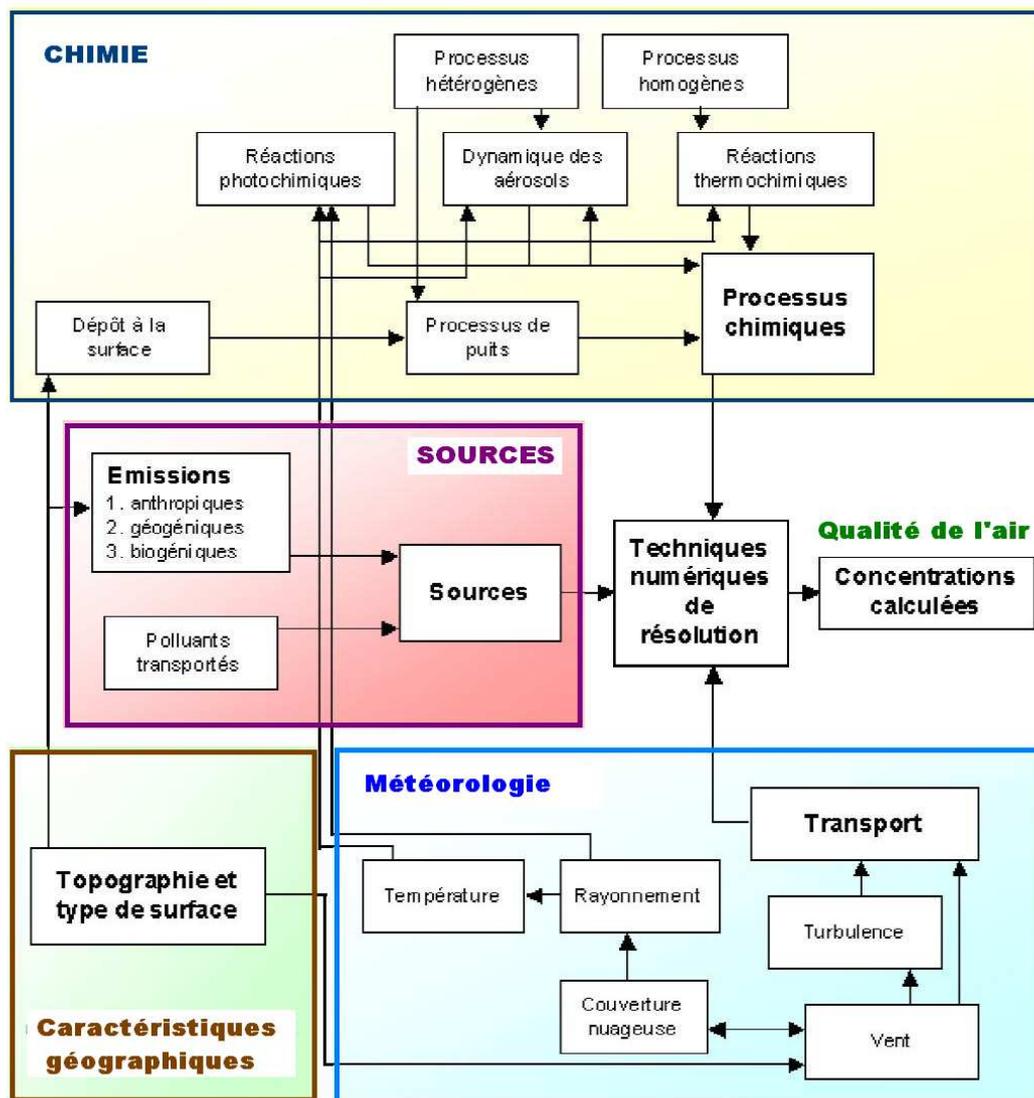


Figure III.1 : Structure générale d'un modèle déterministe de la qualité de l'air.  
Source : Martinet, 2004

La structure d'un modèle de la qualité de l'air typique est généralement constituée de plusieurs pôles : les émissions, la chimie, le transport des polluants influencé par la météorologie et la topographie.

### III.3.1 Les émissions.

Les polluants primaires qui sont rejetés dans l'atmosphère peuvent être biogéniques avec pour principales sources, la biomasse, les volcans et les feux de forêt. Ces polluants peuvent être anthropiques avec pour principales sources, l'industrie, le trafic routier et le secteur résidentiel. Les rejets issus de l'activité humaine constituent une partie importante des émissions et sont principalement localisées dans et autour des grandes villes. Elles peuvent être rejetées au sol (trafic routier) ou en hauteur (cheminées d'usine). Elles ont généralement une température

supérieure à celle de l'air environnant, ce qui les élève un peu dans la couche limite. Elles sont plus importantes en journée du fait de l'activité humaine, mais leur niveau n'est pas négligeable la nuit du fait de l'industrie.

Les émissions biogéniques sont présentes partout, même en mer. On parle d'émissions diffuses qui sont principalement du monoxyde d'azote et quelques COV (isoprène et terpènes). Leur niveau est plus faible que celui des émissions anthropiques, mais les COV impliqués sont plus réactifs. Par exemple, leur contribution à l'ozone n'est pas négligeable.

### **III.3.2 La chimie.**

#### **III.3.2.1 La composition chimique de l'atmosphère.**

En plus des molécules présentes en quantité importante dans l'atmosphère tels que  $N_2$ ,  $O_2$  et Ar, de nombreuses molécules, appelées espèces chimiques, s'y trouvent à l'état de trace dont la concentration varie généralement entre quelques pictogrammes et quelques milligrammes par mètre cube.

Les espèces peuvent être en phase gazeuse. Si elles sont liquides ou solides on parle d'aérosols ou de particules. Les aérosols possèdent des tailles entre quelques nanomètres et plus de 100  $\mu m$ . Ils peuvent avoir un impact sur le rayonnement solaire en l'absorbant.

On distingue les espèces primaires qui sont émises dans l'atmosphère des espèces secondaires qui sont uniquement le produit de réactions chimiques tel que l'Ozone.

A chaque espèce dans l'atmosphère, on peut associer un temps de vie qui dépend de ses réactions chimiques et de ses pertes par dépôt au sol. Certaines espèces instables se combinent très rapidement avec d'autres molécules et ont donc des temps de vie très courts (quelques secondes). D'autres réagissent peu et déposent peu au regard de leur concentrations moyennes, elles résident alors jusqu'à plusieurs années dans l'atmosphère. De telles espèces sont transportées sur de très longues distances, pouvant parcourir toute l'hémisphère. Elles disposent du temps suffisant pour diffuser jusque dans la stratosphère.

#### **III.3.2.2 Le temps de vie des polluants atmosphériques.**

La variabilité spatio-temporelle des espèces est étroitement liée à leur temps de vie ou résidence dans la troposphère. Certains polluants ont un temps de vie de plusieurs jours et peuvent donc être transportés sur de longues distances par les vents, contribuant ainsi à la pollution de fond (**Figure III.2**).

Par exemple, l'ozone qui est une espèce très oxydante, son temps de vie chimique est d'environ une semaine ce qui explique, en partie, le caractère non local des pics de pollution à l'ozone souvent observés en périphérie des grandes zones urbaines (Terrenoire,2009).

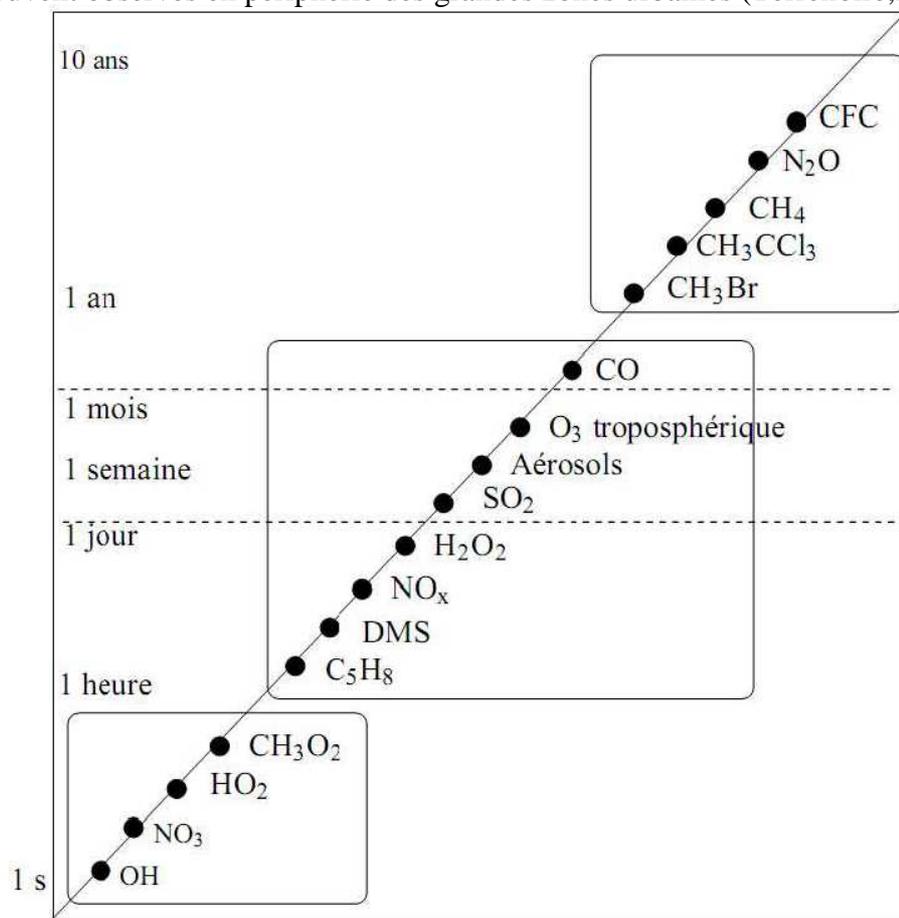


Figure III.2 : Temps de vie des polluants atmosphériques.

### III.3.2.3 La chimie de l'atmosphère.

Si certains polluants sont inertes, de nombreux polluants se transforment ou réagissent entre eux selon des réactions allant de la photolyse à des réactions impliquant plusieurs molécules (Mallet, 2005).

Les réactions photolytiques conduisent à la décomposition d'une molécule sous l'effet du rayonnement solaire. Leurs constantes de réaction (constantes photolytiques) sont directement dépendantes du flux solaire. La photolyse est d'autant moins efficace que le rayonnement solaire parcourt de longues distances dans l'atmosphère. Ainsi il y a une forte dépendance envers l'angle zénithal et l'altitude dans l'atmosphère. De plus les constantes photolytiques varient fortement avec la période de l'année et la couverture nuageuse. Dans le cas d'une diminution des constantes due à la présence de nuages, on parle d'atténuation nuageuse. Il est à noter que les nuages augmentent les constantes photolytiques au-dessus d'eux puisqu'ils réfléchissent les rayons. Enfin, d'une molécule à l'autre, la sensibilité au rayonnement solaire

diffère. En particulier, chaque liaison moléculaire peut uniquement être cassée par certaines longueurs d'onde.

Les autres réactions en phase gazeuse sont plus communes. Elles impliquent plusieurs espèces et leur efficacité dépend des conditions : concentrations, température, pression et humidité.

Les espèces en phase gazeuse peuvent aussi réagir avec les aérosols. Il peut s'agir de réactions de surface lorsqu'elles ont lieu à la surface des particules solides. Certaines réactions se déroulent aussi dans les gouttes d'eau présentes dans les nuages avec des espèces qui ont au préalable diffusé dans ces gouttes (Mallet, 2008).

#### **III.3.2.4 Le mécanisme chimique.**

Un mécanisme chimique doit permettre de simuler les réactions qui ont lieu entre les différentes espèces chimiques et prédire correctement l'évolution des concentrations des principaux polluants atmosphériques.

Le mécanisme chimique implémenté dans un modèle de la qualité de l'air est très important car il régit les processus de formation et de décomposition des polluants. La qualité de ce mécanisme dépend principalement du nombre d'espèces et de réactions prises en considération.

Les espèces chimiques présentes dans l'atmosphère interagissent chimiquement entre elles. Les réactions de photolyse activées par l'énergie solaire sont importantes dans la chimie de l'ozone. Elles font intervenir des précurseurs comme les NO<sub>x</sub> et les COV. Cependant ces derniers regroupent plusieurs centaines d'espèces que l'on ne peut prendre en compte de manière exhaustive lors de la mise en œuvre opérationnelle d'un modèle de qualité de l'air. Des hypothèses simplificatrices sont faites, visant à réduire le nombre d'espèces et de réactions chimiques, et à optimiser les temps de calcul.

Dans ce cas, des regroupements intenses sont indispensables afin de donner au mécanisme chimique une taille raisonnable.

Ces regroupements sont appliqués dans la plupart des schémas chimiques destinés à être intégrés aux modèles de chimie-transport, comme par exemple RADM (Stockwell et al., 1990), MOCA (Aumont et al., 1996), RACM (Stockwell et al., 1997), SAPRC (Carter, 2000) et MELCHIOR (Lattuati, 1997; Schmidt et al., 2001).

#### **III.3.3 La topographie**

Les obstacles naturels, les constructions ou les phénomènes de brise de terre et de mer sur le littoral, peuvent gêner la dispersion des polluants.

Ainsi, l'air froid et la pollution s'écouleront toujours vers les vallées où par densité, cet air et la pollution environnante seront captifs. Sous l'influence du rayonnement solaire, des phénomènes de brise de pente, montante ou descendante et de brise de vallée, entraînant l'air de la vallée vers le plateau et inversement, peuvent être observés.

Les obstacles naturels ou les grandes constructions peuvent provoquer des tourbillons ou gêner la dispersion des polluants.

L'agglomération constitue également un îlot de chaleur qui subsiste à la tombée du jour. L'air chaud s'élevant, provoque une dépression qui va attirer l'air plus frais de la périphérie, entraînant du même coup les polluants qui peuvent s'y trouver.

Les phénomènes de brises en été, et en l'absence de vent, on observe sur le littoral ou au bord des grands lacs, des phénomènes de brise de terre (le matin) et de brise de mer (l'après-midi). Dû aux différences de température, ce phénomène fait évacuer les polluants le matin et les fait revenir l'après-midi.

### **III.3.4 La météorologie.**

La qualité de l'air dépend fortement des conditions météorologiques. Pour une même quantité de rejets, celle-ci peut varier considérablement.

L'absence de vent favorise la concentration des polluants, alors que sa présence les disperse.

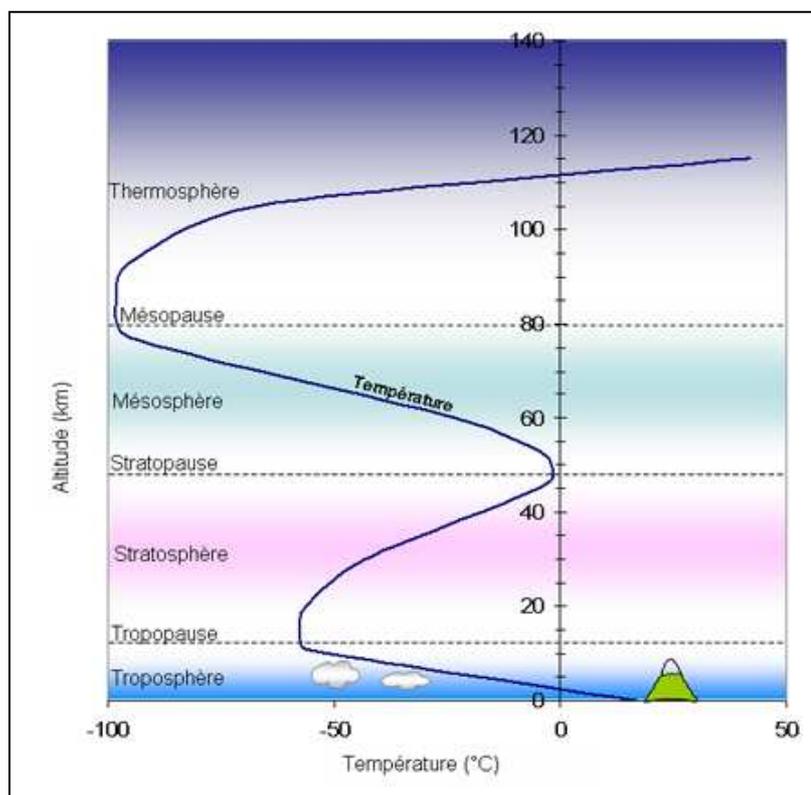
Quand un polluant se déplace, la température est soumise à des pressions qui peuvent la faire monter ou descendre.

En hiver, la température en altitude peut être plus élevée qu'au sol, suite au refroidissement du sol et de la basse couche de l'atmosphère au cours de la nuit. En l'absence de vent, ce refroidissement ne monte pas forcément plus haut que quelques centaines de mètres, à un niveau où il existe encore de l'air plus chaud au-dessus. Le couvercle d'air chaud qui recouvre les villes, piège alors l'air vicié au-dessus de la cité. La chaleur du soleil, peut, deux heures après l'aube, briser cette inversion en réchauffant à nouveau le sol. Ce phénomène est plus ou moins accentué selon la couverture du sol : nu, boisé, humide... et la présence ou non de brouillard.

#### **III.3.4.1 La structure de l'atmosphère.**

La structure globale de l'atmosphère est organisée en strates aux propriétés physiques moyennes bien caractérisées. Ces valeurs moyennes masquent une grande hétérogénéité dans l'espace et le temps de l'air atmosphérique.

La division de l'atmosphère en plusieurs couches est établie à partir du profil vertical de température de l'air qui varie avec l'altitude. Le nombre décroissant de molécules de gaz avec l'altitude pourrait expliquer cette décroissance simultanée de la température. Or, ce n'est pas le cas, les profils de température sont croissants ou décroissants en fonction de la strate atmosphérique considérée (**Figure III.3**).



**Figure III.3** : Structure globale de l'atmosphère.

Source : Mallet, 2005

**La troposphère** C'est la plus basse couche de l'atmosphère ; elle s'étend de la surface terrestre jusqu'à une limite appelée tropopause, qui la sépare de la stratosphère. La tropopause où se situe la première cassure du profil thermique, est située en moyenne à 10 km d'altitude, variable avec la latitude et la saison.

**La stratosphère** est caractérisée par un air stable et stratifié. C'est à ce niveau que l'Ozone ( $O_3$ ), la forme triatomique de l'oxygène, absorbe le rayonnement solaire, ce qui contribue à inverser le profil thermique. Elle est séparée de la mésosphère par la stratopause, où la température ne varie pas avec l'altitude.

**La mésosphère** Dans cette strate, la température décroît à nouveau avec l'altitude. La masse atmosphérique y est faible (99% de la masse atmosphérique se situe en dessous de ce point) mais la proportion d'azote ( $N_2$ ) et d'oxygène ( $O_2$ ) à ce niveau est identique à celle au niveau de la mer. Le niveau le plus froid de l'atmosphère ( $-95^{\circ}C$  environ) se situe au sommet de la mésosphère qui est séparée de la thermosphère par la mésopause.

**La thermosphère** Dans cette strate, très peu de molécules sont présentes, mais elles absorbent une grande quantité d'énergie solaire. L'énergie cinétique de ces rares molécules devient importante. Le profil thermique redevient croissant avec l'altitude.

**L'exosphère** dans l'exosphère, les forces de gravité sur les molécules deviennent très faibles et ces molécules diffusent vers le vide spatial. Le niveau supérieur de l'exosphère, considéré comme la limite de l'atmosphère, est diffus et généralement situé à 500 km d'altitude.

En matière de qualité de l'air, les transferts entre la stratosphère et la troposphère sont suffisamment lents pour qu'un grand nombre de polluants ne soient pas directement sensibles aux variations de ces échanges. Ainsi, on se restreint à une partie de la troposphère appelée couche limite atmosphérique dont la hauteur varie entre quelques dizaines de mètres et 1 km.

La couche limite atmosphérique est définie comme étant la partie de la troposphère influencée en une heure ou moins par des changements au voisinage de la surface terrestre par réchauffement, évaporation, émissions de polluant, etc.

Ainsi, on étudie les concentrations de certains polluants uniquement dans les premiers mètres de l'atmosphère, c'est-à-dire les quantités de polluants ayant un impact potentiel sur les populations et l'environnement.

#### **III.3.4.2 Le rôle du vent dans le transport des polluants.**

Dans la couche limite atmosphérique, la vitesse des vents horizontaux est de quelques mètres par seconde alors que celle des vents verticaux est de l'ordre du millimètre ou du centimètre par seconde ce qui est négligeables par rapport à la turbulence.

Le vent est donc la source principale du transport horizontal des polluants. Il augmente avec l'altitude mais s'annule au voisinage du sol sous l'effet de la rugosité du terrain et des obstacles naturels ou artificiels.

#### **III.3.4.3 Le rôle de la turbulence.**

Les turbulences sont dues aux obstacles (immeubles, arbres, rochers etc.) qui modifient l'écoulement régulier des masses d'air et peuvent freiner considérablement la vitesse du vent, en provoquant souvent de la turbulence.

La zone de turbulence créée par un obstacle s'étend sur une distance d'environ trois fois la hauteur de cet obstacle, cette turbulence est plus forte derrière l'obstacle que devant (Yahi, 2010).

Les turbulences sont dues aussi au cisaillement du vent, au réchauffement du sol par le rayonnement solaire qui élève les masses d'air réchauffés au contact du sol, et à la convection nuageuse qui n'apparaît pas systématiquement en présence de nuages.

Les mouvements turbulents représentés par des tourbillons ont une amplitude qui peut aller jusqu'à la hauteur de la couche limite.

### **III.3.5 Autres processus.**

#### **III.3.5.1 Dépôt sec.**

Ce processus se produit lorsque les polluants se déposent au sol et qu'ils sont soit absorbés par l'eau, le sol ou la végétation. L'intensité de ce processus dépend des polluants, des conditions météorologiques, de l'éclairement, du type et de la densité de la végétation. En journée, le dépôt est plus important en raison de l'éclairement.

#### **III.3.5.2 Dépôt humide.**

Ce processus se produit lorsqu'il y'a des transferts de masse avec la phase aqueuse (nuages ou pluies). Les polluants solubles peuvent pénétrer les gouttes de pluie lors de leur chute et sont ainsi précipités au sol. On l'appelle aussi lessivage.

Une autre forme de lessivage se déroule dans les nuages où les polluants solubles ont des échanges (transferts de masse) avec les gouttes d'eau.

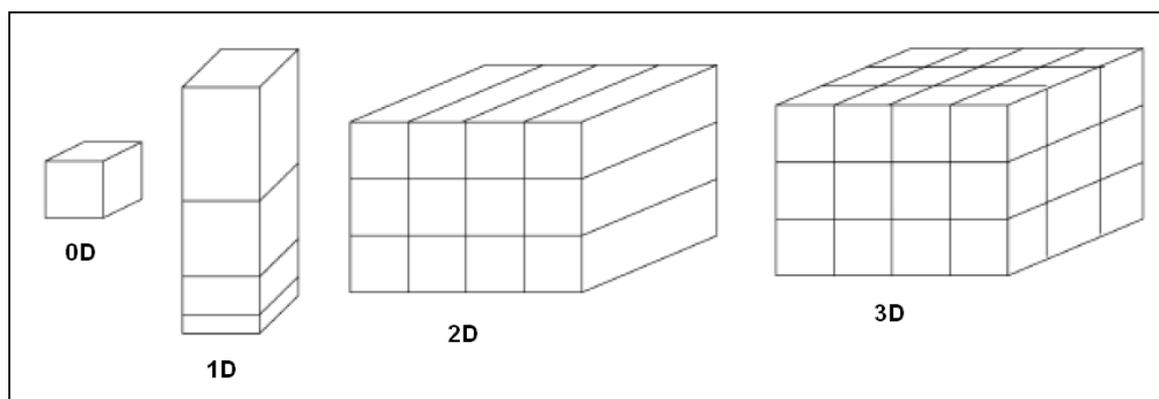
### **III.4 Intégration numérique d'une modélisation Eulérienne.**

En situation Eulérienne, le domaine modélisé est fixe dans l'espace. Ce domaine est discrétisé en cellules tridimensionnelles pour former un maillage. Les équations chimiques et dynamiques sont appliquées afin de simuler les variations de concentrations de différents polluants dans chaque cellule. La configuration du maillage varie en fonction de l'échelle spatiale désirée. La modélisation peut s'effectuer du 0D au 3D. Le 0D prend uniquement en compte la variable  $t$  alors que le 3D comporte l'ensemble des dimensions  $t, x, y, z$  (**Figure III.4**).

Le modèle 0D est utilisé pour juger de la pertinence d'une paramétrisation physique ou chimique. De par sa simplicité, le temps étant l'unique variable, il est utilisé largement lors de la manipulation de mécanisme chimique complexe.

Le modèle 1D est quand à lui utilisé pour évaluer l'impact d'une paramétrisation sur l'écoulement principal. Il est peu coûteux en calculs mais doit être utilisé lorsque le vent est

faible car l'advection n'est pas prise en compte. Le modèle 2D est le moins utilisé des quatre types décrit ci-dessus. La simulation s'effectue sur la verticale et selon l'axe x ou y dont le choix est dépendant du vent dominant. Ce type de configuration prend en compte le changement de vitesse du vent et du relief d'une maille à l'autre mais fait l'hypothèse que la direction reste inchangée. Il est adapté à la modélisation de domaine dans lesquels l'écoulement est très contraint (vent de vallée, brise de mer). Enfin, le modèle 3D est la version la plus utilisée mais la plus coûteuse. Il permet de prendre en compte une multitude de paramètres comme par exemple les changements de direction du vent ou le type de sol (Terrenoire, 2009).



**Figure III.4 :** Exemples des différents maillages Eulériens utilisés: 0D (t), 1D (t, x), 2D (t, x, z) et 3D (t, x, y, z).

Dans les modèles tridimensionnels, les échanges de matière par advection et diffusion se font via les parois des mailles et s'ajoutent à ceux des émissions, des dépôts secs et humides. L'équation appliquée à chaque maille est basée sur la conservation de la masse (Seinfeld et al., 1997) :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla u \cdot C_i = \nabla (K(z) \cdot \nabla C_i) + R_i(c_1, c_2, \dots, C_n) + E_i(x, y, z, t) - L_i(x, y, z, t) \quad (\text{III.1})$$

où

$C_i$ : la concentration des espèces  $i$  du mécanisme chimique,

$u$ : le vecteur vent tridimensionnel,

$K(z)$  : la diffusion verticale,

$R$  : la réactivité chimique pour chaque espèce du mécanisme chimique,

$E$  : les émissions anthropiques et biogènes

$L$  : la perte d'espèces liée aux dépôts sec et humide.

Hanna et Benjey (2006) considèrent quatre applications principales propres au système de modélisation déterministe Eulérien :

- évaluation opérationnelle avec comparaison des données calculées et des données mesurées sur le terrain,
- évaluation de la sensibilité d'une paramétrisation (par exemple : convection profonde),
- intercomparaison de modèles ayant des similarités dans leur formulation théorique mais utilisant des paramétrisations ou une discrétisation spatiale et temporelle différentes,
- évaluation de la sensibilité des données d'entrée sur la qualité des données en sortie de modèle.

Ces diverses applications font de la modélisation Eulérienne un outil largement répandu dans la recherche en physico-chimie de l'atmosphère.

### **III.5 Les modèles de chimie-transport les plus courants.**

Il existe plusieurs modèles de chimie-transport utilisés à travers le monde, les plus communément utilisés aux Etats-Unis sont :

- UAM V (Urban Airshed Model with Variable Grid) : développé, commercialisé et diffusé par la société SAI (System Applications International), basé sur le mécanisme chimique de CBM IV (Carbon Bond Mechanisms). Il peut traiter des domaines dont les dimensions sont de l'ordre 500km x 800km.
- CALGRID : développé par l'Agence de Protection de l'Environnement de Californie aux Etats-Unis. Il est utilisé avec le mécanisme chimique SAPRC.
- CAMx (Comprehensive Air quality Model with extensions): est un produit commercial, diffusé gratuitement par la société américaine Environ. Il intègre aussi bien les mécanismes chimiques de CBM IV que ceux de SAPRC.

Nous trouvons parmi les outils utilisés en Europe, les modèles suivants :

- AIRQUAL : développé par EDF, l'IFP et le LISA de l'Université de Créteil en France et commercialisé par la société Aria Technologies. Il s'appuie sur le modèle photochimique MOCA, et est couplé avec les pré-processeurs météorologiques distribués par Aria Technologies : MINERVE (diagnostique) et HERMES (pronostique).
- MESO-NH CHIMIE développé par Météo-France et le Laboratoire d'Aérodynamique de Toulouse en France. Il incorpore plusieurs modules chimiques dont RADM. La partie météorologique, très complète et sophistiquée est conçue par Météo-France.

- **MARS** : est un modèle développé à l'Université de Thessalonique en Grèce et fait partie de la chaîne EZM (EUMAC Zooming Model) mise au point dans le cadre du programme européen EUROTRAC. Il est souvent associé avec le modèle météorologique de pronostique MEMO.
- **CHIMERE** : est un modèle développé par une équipe du CNRS/LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique) à Palaiseau en France. Il incorpore le modèle chimique MELCHIOR, et assimile des données météorologiques fournies par les modèles MM5 ou WRF.

Il existe d'autres modèles développés ou en cours de développement car la modélisation de la formation et du transport des polluants atmosphériques est encore en pleine expansion et fait l'objet de nombreuses recherches actuelles.

### **III.6 Stockage et manipulation des données de la modélisation de la qualité de l'air.**

Lors de la simulation de la qualité de l'air, de grandes quantités de données sont manipulées. Il est nécessaire de rassembler l'ensemble des informations provenant de diverses sources : modèle météorologique, modèle de chimie-transport, base de données pour la chimie, etc.

Le type de fichier standard qui convient aux données météorologiques et aux concentrations de polluants est le format NetCDF (Network Common Data Form) du projet UNIDATA – UCAR (University Corporation for Atmospheric Research).

Ce type de fichier permet de stocker des données scientifiques multidimensionnelles (variables), telles que la température, l'humidité, la pression, la vitesse, la direction du vent ou les concentrations. Chacune de ces variables peut être affichée à l'aide d'une dimension telle que le temps.

Il s'agit d'un format de choix pour les entrées/sorties pour l'échange de données scientifiques. Le format NetCDF, grâce à sa portabilité, permet de représenter les données scientifiques indépendamment de l'architecture des ordinateurs utilisés pour les simulations.

La simulation de la qualité de l'air, surtout si elle est destinée à la prévision, requiert de disposer rapidement des résultats afin de pouvoir prendre à temps les décisions qui s'imposent en cas de pics attendus. Cette rapidité peut être obtenue par l'utilisation du calcul parallèle sur des machines à haute performance dédiées au calcul intensif, qui est aussi appelé High Performance Computing (HPC). Cette technologie permet d'obtenir des temps de calcul

raisonnables, compatibles avec un fonctionnement des modèles de la qualité de l'air en mode prévision.

### **III.7 Conclusion.**

Nous avons donné dans ce chapitre un aperçu sur la modélisation du transport des polluants et de la transformation et de la dispersion des polluants pour mieux comprendre les processus physico-chimiques qui se développent dans l'atmosphère.

Ces processus sont modélisés selon différentes méthodes afin d'aboutir à une simulation numérique des phénomènes conduisant à une altération de la qualité de l'air.

Ces différentes méthodes se retrouvent dans les modèles de chimie-transport que nous avons présenté et qui convergent tous vers l'objectif de restituer au mieux les concentrations des polluants dans la zone d'étude.

Ce qui permet d'analyser des épisodes de pollution passés pour mieux comprendre la mécanique d'un épisode particulier mais aussi de mettre en avant les faiblesses et donc d'orienter les pistes de développements futurs. Cette modélisation offre la possibilité de faire des scénarios afin de quantifier le gain ou bien les dommages que pourrait avoir une action sur les émissions par exemple. En outre, la modélisation permet de réaliser des prévisions de la qualité de l'air, deux à trois jours à l'avance, sur une région donnée. C'est le travail réalisé par les agences de surveillance de la qualité de l'air mais aussi, l'une des missions de l'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable en Algérie.

L'un des modèles les plus utilisés dans la prévision de la pollution atmosphérique est le modèle CHIMERE dont nous avons donné un aperçu et que nous avons choisi pour modéliser la qualité de l'air dans la région d'Alger. Mais cette modélisation ne pourra être cohérente que si elle est alimentée par des émissions reflétant la réalité, surtout que la composante anthropique des émissions est majoritaire dans cette région. La méthodologie adoptée pour la construction du cadastre d'émissions de la zone d'étude est présentée dans le prochain chapitre.

## **Chapitre IV**

# **Modélisation des émissions des polluants atmosphériques de la région d'Alger.**

## IV.1 Introduction.

Les agglomérations urbaines d'aujourd'hui connaissent une triple croissance: celle de la population, celle des activités économiques et celle du trafic. La résultante environnementale de ces croissances est non seulement la pollution atmosphérique, mais aussi la congestion, elle même cause de pollution. Cette pollution affecte une population de plus en plus nombreuse, les bâtiments, les cultures périurbaines et contribue largement à la dégradation de l'environnement.

L'un des cas les plus significatifs est celui de la région d'Alger qui connaît une pollution de l'air non négligeable en raison d'un trafic routier intense, une activité économique importante et une concentration humaine considérable.

La réalisation d'un cadastre des émissions est nécessaire afin d'évaluer la qualité de l'air sur l'ensemble de la région du Grand Alger, en particulier sur les zones non couvertes par les stations de mesure. Ce travail s'intéressera surtout aux émissions issues du trafic routier en raison de la part importante du secteur des transports algérois dans l'émission des polluants gazeux. En effet, 94 % des rejets de monoxyde de carbone, 92 % des rejets des composés organiques volatils non méthaniques et 69 % des rejets des oxydes d'azote, avaient en 1995 pour origine le trafic routier (**Tableau IV.1**).

**Tableau IV.1** : Emissions des polluants en Tonnes/année en Algérie pour l'année 1995

	<b>S02</b>	<b>Nox</b>	<b>PM</b>	<b>COVNM</b>	<b>CO</b>
<b>Trafic automobile</b>	4 160	123 629	8 710	249 600	996 600
<b>Activité industrielle</b>	44 846	53 683	1 128 688	14 061	48 019
<b>Combustion des déchets</b>	208	1 219	3 324	8 954	17 437

Source : Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement – Direction générale de l'environnement.

Dans ce chapitre, nous avons réalisé, un cadastre des émissions issues du trafic routier sur la région du Grand Alger afin de caractériser, par la suite avec un modèle de chimie-transport, les concentrations des polluants avec une répartition spatiale et temporelle. L'ajout à ce cadastre des émissions issues de l'industrie et de la combustion des déchets permettra d'utiliser le cadastre construit comme entrée dans un modèle de la qualité de l'air.

## **IV.2 Modèle utilisé.**

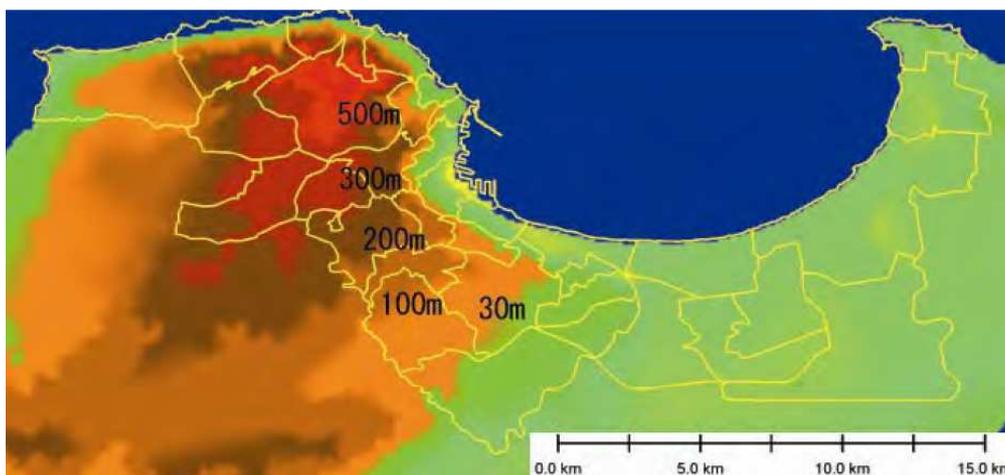
Le modèle EMISENS (EMIssion SENSitivity) a été développé par le Professeur Alain CLAPPIER au sein de l'Université de Strasbourg en France dans l'objectif de calculer et de distribuer les émissions du trafic routier.

Les deux approches « Bottom-up » et « Top-down » sont combinées dans le modèle EMISENS afin de gagner en cohérence. Au lieu de distinguer tous les brins de rues, les véhicules et leurs facteurs d'émission de polluants associés comme le font les modèles d'émission de trafic classiques, les rues et les véhicules sont classés par grandes catégories. Des facteurs d'émission moyens doivent être alors spécifiés pour chaque catégorie de véhicule. Ceci peut être fait à partir de mesures (Belalcazar et al., 2008) ou à partir de la méthodologie européenne COPERT. Ce regroupement en catégories permet de calculer plus rapidement les émissions à partir de données sur la flotte de véhicules: nombre de véhicules de chaque catégorie; flux de véhicules; vitesses des véhicules, facteur d'émission moyen... Ce modèle permet également de calculer les incertitudes dues aux paramètres d'entrée et de repérer lesquels doivent être mieux estimés pour améliorer significativement le résultat. L'outil EMISENS a été testé et validé sur la ville de Strasbourg en France et appliqué aux villes de Ho Chi Minh au Vietnam et de Bogota en Colombie. Il est également appliqué à la ville d'Agadir au Maroc. Cette méthodologie est largement expliquée dans la thèse de HO Quoc Bang, 2010.

Pour la construction d'un cadastre d'émissions de la région d'Alger, l'une ou l'autre des deux approches « Bottom-up » ou « Top-down » ne peuvent être utilisées en raison du manque d'informations détaillées sur l'ensemble des paramètres du trafic routier. Par contre, le modèle EMISENS grâce à son approche novatrice qui combine les deux méthodologies « Bottom-up » et « Top-down », permet de contourner l'insuffisance des données. Il contribue ainsi à générer les émissions totales des polluants choisis et leurs répartitions temporelles et spatiales. La visualisation et l'analyse des résultats peuvent se faire à l'aide d'un système d'information géographique.

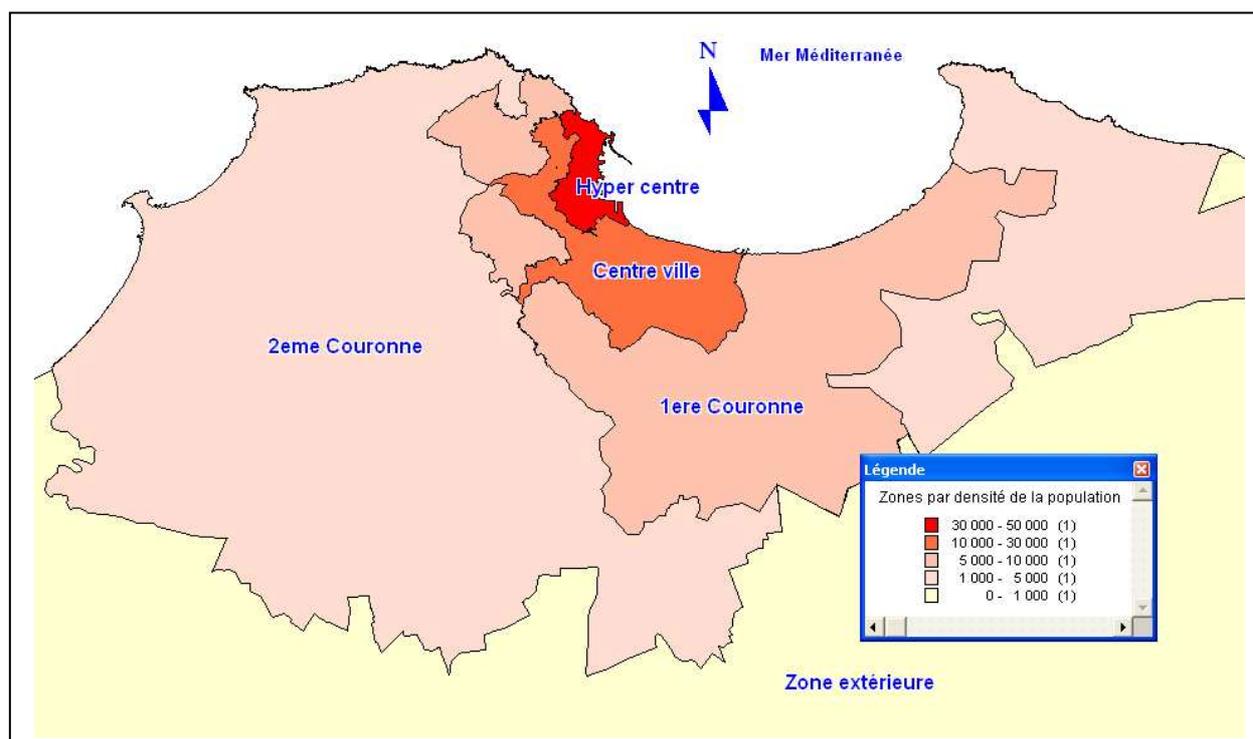
### IV.3 Présentation de la zone d'étude.

Alger est bâtie sur les contreforts des collines du Sahel algérois qui est une petite chaîne, de quelques kilomètres de large sur une cinquantaine en longueur caractérisée par le massif de Bouzaréah dominant Alger (il culmine à 407 m). La ville est bordée au nord et à l'est par la mer Méditerranée, formant la baie d'Alger (**Figure IV.1**). Dans l'arrière-pays se dressent les montagnes de l'Atlas tellien.



**Figure IV.1** : Topographie du massif de Bouzaréah à l'ouest d'Alger. - **Source** : JICA, 2006

La Wilaya d'Alger est composée de 57 communes et 13 circonscriptions administratives (Daira), délimitée par les wilayas de Tipaza, Blida et Boumerdes avec une topographie à relief accidenté et un espace limité. En 2006, la Wilaya Alger comptait près de 3 millions d'habitants pour une population totale du pays de 33,2 millions d'habitants. La population urbaine algéroise représentait 97,04 % de la population totale de la Wilaya. L'hyper centre-ville supporte une densité de 41 136 hab/km<sup>2</sup>, le centre-ville a une densité de 17 116 hab/km<sup>2</sup> alors que cette densité s'estompe nettement dans les 1ere 2eme couronnes et encore davantage dans la zone extérieure. L'ensemble de ces espaces constituera la zone d'étude afin de calculer les émissions polluantes issues du trafic routier (**Figure IV.2**).



**Figure IV.2:** Zone d'étude de la région du Grand Alger selon les densités de population.

Le poids démographique de la ville d'Alger relativement modeste, comparé à celui des grandes agglomérations du sud de la Méditerranée comme Le Caire, Tunis ou Casablanca, n'exprime pas le poids économique, administratif et culturel considérable de la ville à l'échelle régionale et nationale.

Alger héberge le plus grand aéroport du pays, avec une capacité de 12 millions de passagers/an, mais aussi le plus grand port qui totalise 47 % de l'ensemble de l'activité portuaire du pays.

Alger est aussi et surtout une métropole régionale dont l'aire d'influence dépasse les limites de la wilaya d'Alger. Ainsi, l'aire d'influence d'Alger englobe les wilayas limitrophes de Blida, Boumerdes et Tipaza, avec des déplacements pendulaires et des mobilités quotidiennes de type navette entre la capitale algérienne et ces wilayas limitrophes, et même d'autres wilayas plus lointaines comme Médéa et Tizi Ouzou.

La ville dense, compacte et ramassée, qui existait avant 1987, a été remplacée en l'espace de vingt années par une agglomération beaucoup plus étalée, avec des formes de mobilités résidentielles accentuées et un allongement des distances des déplacements, instaurant une demande de transport sans commune mesure avec l'offre existante tous modes confondus. Cette situation est attribuable à la rapidité des évolutions urbanistiques.

Cette urbanisation, sous l'effet de la politique de développement intensif axée notamment sur l'éducation, l'industrialisation et la structuration administrative, s'est particulièrement traduite par l'augmentation des besoins en déplacements, sans que les stratégies de planification, et les moyens devant les prendre en charge, n'aient connu le même rythme de développement.

Ce phénomène, qui s'est davantage accéléré ces dernières années, a provoqué des transformations notables dans la configuration du schéma d'organisation de la ville, qui se trouve aujourd'hui confrontée à des problèmes générés par d'importants besoins de la population, en termes de déplacements. Les rapports des enquêtes ménages, illustrent clairement que la mobilité quotidienne à Alger évolue linéairement. Celle-ci est passée de 0,8 en 1972 pour atteindre en 2004 le taux de 1,6 (Baouni, 2008).

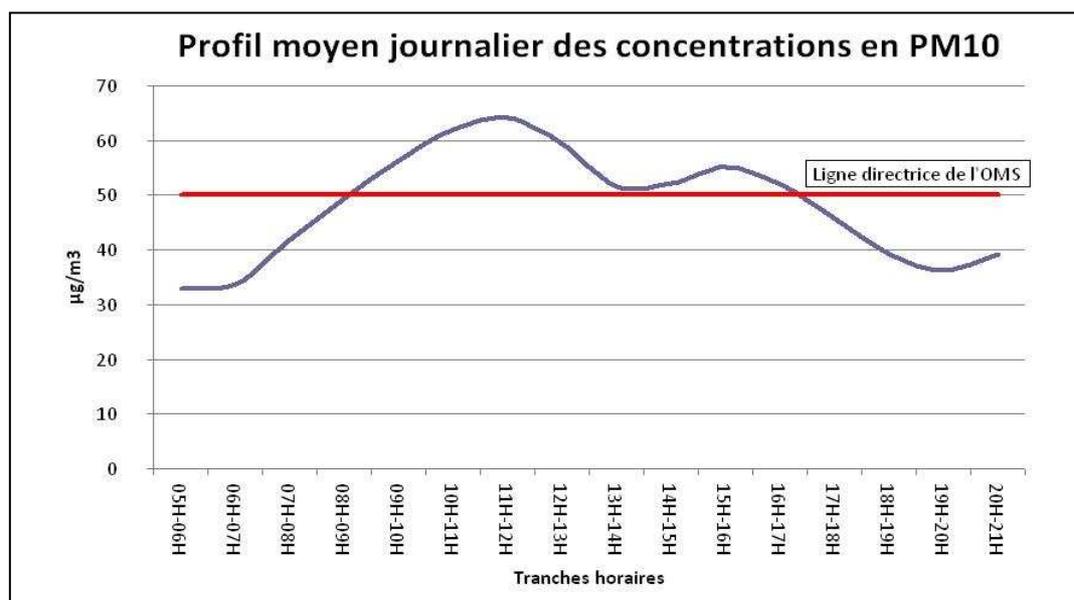
## **IV.2 Calcul des émissions totales.**

### **IV.2.1 Les polluants choisis.**

Des études ont montré que le Grand Alger est, comme toute grande agglomération urbaine, confronté à une intense pollution atmosphérique (Boughedaoui et al., 2004). La principale source d'émission étant le trafic routier.

Les taux des principaux polluants primaires et secondaires sont mesurés en continu à Alger par quatre stations automatiques de l'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable. La plupart des polluants sont liés directement ou indirectement au trafic automobile. Le monoxyde d'azote, par exemple, résulte de la réaction de l'azote et de l'oxygène de l'air qui a lieu à haute température dans les moteurs et les installations de combustion. Les véhicules émettent la majeure partie de cette pollution. Le monoxyde d'azote, NO, est émis par les véhicules, au contact de l'air, ce monoxyde d'azote est rapidement oxydé en dioxyde d'azote NO<sub>2</sub>.

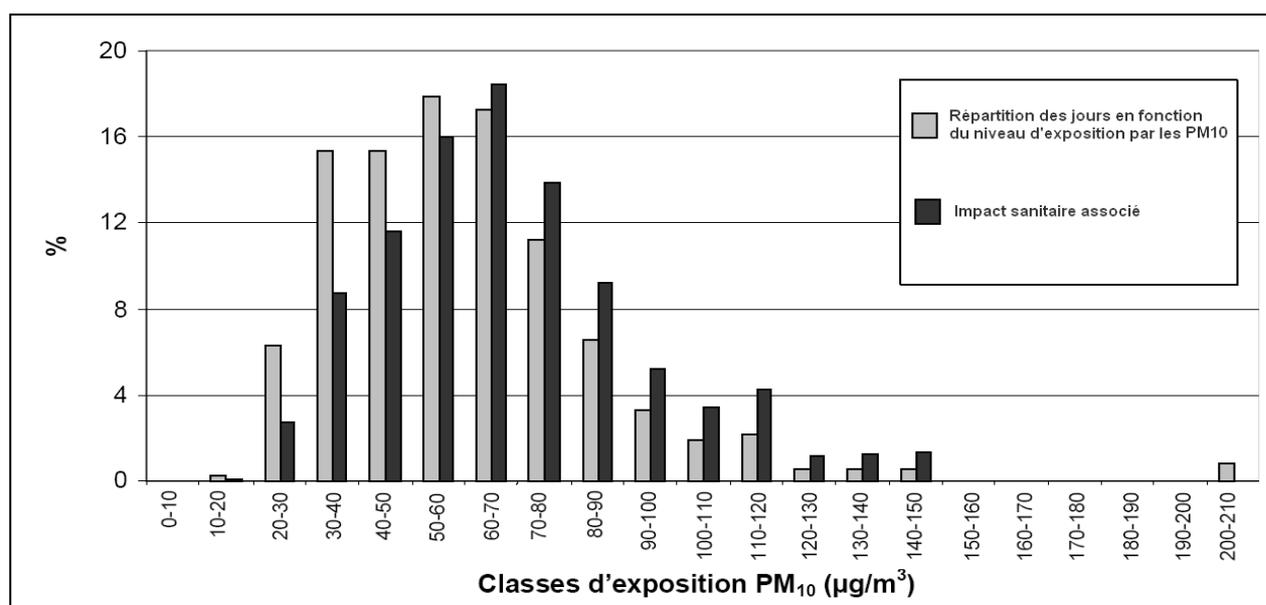
L'évolution journalière des concentrations des particules, est fortement corrélée aux fluctuations du trafic automobile. Au cours de la journée, on observe deux augmentations significatives de la concentration en PM<sub>10</sub> en début de matinée et en fin d'après midi qui correspondent à l'heure de pointe du matin et à l'heure de pointe du soir (**Figure IV.3**). Au mois de Février 2006, la concentration mesurée en PM<sub>10</sub> dépasse régulièrement les 50 µg/m<sup>3</sup>. La ligne directrice de l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S) étant de 50 µg/m<sup>3</sup> à ne pas dépasser plus de 3 jours par an pour une durée d'exposition de 24 heures (OMS, 2006).



**Figure IV.3:** Profil moyen journalier des teneurs en PM<sub>10</sub> relevé par la station de mesure de Bab El Oued à Alger- Février 2006.

**Source :** Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable.

L'étude menée par Laid et al. en 2006 montre clairement l'impact sanitaire de l'augmentation des taux de PM<sub>10</sub> dans l'air. En effet, près de 4,5% des consultations annuelles pour affections aiguës respiratoires sont attribuées à la pollution par les PM<sub>10</sub>. De plus, quand les niveaux d'exposition sont inférieurs à 80 µg/m<sup>3</sup> les cas attribuables à la pollution par les PM<sub>10</sub> représentent 71% de l'impact total, soit 3,2% de la prévalence annuelle de la morbidité respiratoire vue en consultation ambulatoire (**Figure IV.4**).



**Figure IV.4:** Distribution par classes des niveaux d'exposition journaliers et des impacts associés (consultations).

**Source :** Laid et al., 2006.

Les espèces chimiques répertoriées dans cette étude sont le monoxyde de carbone (CO), les particules (PM), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les composés organiques volatils (COV). Ce choix est édicté par la disponibilité des données sur les mesures et sur les facteurs d'émissions.

#### **IV.2.2 Choix des catégories de véhicules.**

En 2006, l'Office National des Statistiques a relevé que 30,08 % du parc national automobile était concentrée dans la Wilaya d'Alger et dans la Wilaya de Blida, qui sont concernés par la zone d'étude, soit un total de 1 023 404 véhicule tout type confondu. Un parc automobile dominé surtout par les marques Peugeot (essence : 36,83 %, Diesel : 16,63 %) et Renault (essence : 23,80 %, Diesel : 22,75 %). Une part importante de ce parc a été importée d'Europe par des particuliers sous forme de véhicules d'occasion de moins de 3 ans d'âge, donc conformes aux normes européennes en matière d'environnement.

Les carburants utilisés par les véhicules en Algérie sont principalement les essences, le gasoil et une faible part pour le GPL (4 %) qui peine à se généraliser malgré une politique gouvernementale incitative depuis les années 1980.

La période 2000-2006 a connu une augmentation de plus de 68 % des ventes de gasoil à cause d'une diésélisation croissante du parc national automobile favorisée par la différence de coût entre l'essence et le gasoil.

Le Laboratoire Energie et Pollution Atmosphérique (LEPA) au sein de l'Université Saad-Dahleb de Blida en Algérie, a établi les facteurs d'émissions pour l'ensemble des types de véhicules du parc automobile algérien à l'aide de mesures ou bien dérivés de Copert III et IV et du projet européen Artémis et qui ont été adapté au contexte algérien.

Les facteurs d'émission sont déterminés pour différentes vitesses moyennes de cycles représentatifs de conditions réelles de circulation : les cycles de conduite urbain, rural et autoroutier.

Ainsi, un facteur d'émission est attribué à chaque polluant pour les véhicules particuliers, les véhicules utilitaires légers, les poids lourd, les autobus, les autocars et les motos en fonction, du mode de carburation (essence, diesel), de la cylindrée (ou du poids total autorisé en charge pour les véhicules utilitaires légers et les poids lourds) et de la date de mise en circulation (pour tenir compte des normes d'émission, notamment les normes Euro) (**Tableau IV.2**).

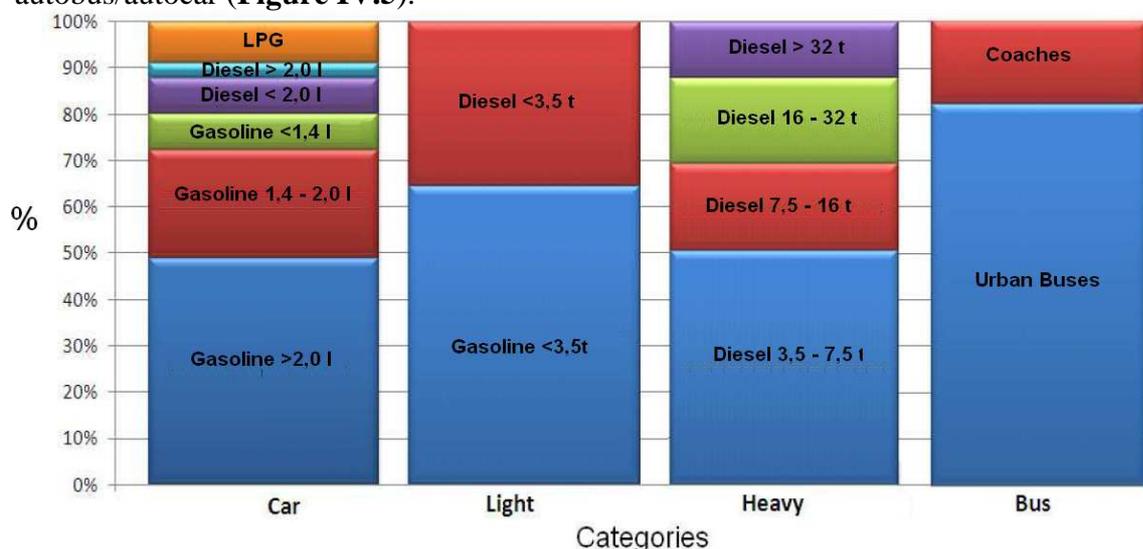
**Tableau IV.2 :** Aperçu des facteurs d'émissions du CO pour les 3 cycles de conduite selon le type de véhicule.

Sector	Subsector	Tech.	CO (g/km)		
			Urban	Rural	Highway
Passenger Cars	Gasoline <1,4l	PRE ECE	45,486721	22,5049381	20,2568035
Passenger Cars	Gasoline <1,4l	ECE 15/00-01	34,7966347	14,5699997	14,3499994
Passenger Cars	Gasoline <1,4l	ECE 15/02	27,5549965	9,22000027	8,64500046
Passenger Cars	Gasoline <1,4l	ECE 15/03	25,8279972	10,6919975	9,64824772
Passenger Cars	Gasoline <1,4l	ECE 15/04	17,8904705	5,27030849	5,27030849
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
Buses	Coaches	Euro I - 91/542/EEC	3,42376733	1,5680846	1,24765527
Buses	Coaches	Euro II - 91/542/EEC	3,42376709	1,56808496	1,24765503
Buses	Coaches	Euro III - 2000 Standards	2,80126405	1,30673695	1,24765503

**Source :** Compilation des données du Laboratoire Energie et Pollution Atmosphérique (LEPA) – Université Saad-Dahleb de Blida - Algérie.

Au lieu de procéder au calcul des émissions pour l'ensemble des types de véhicules qui sont au nombre de 129, on les rassemble en catégories homogènes en prenant en considération les informations concernant le nombre d'unité de chaque type de véhicules; le flux des véhicules; la vitesse moyenne des véhicules et les facteurs d'émission moyens.

Les émissions seront calculées beaucoup plus rapidement pour les catégories ainsi constituées : les voitures particulières, les véhicules utilitaires légers, les poids lourd et les autobus/autocar (**Figure IV.5**).



**Figure IV.5 :** Regroupement des types de véhicules par catégories et proportions.

La catégorie des voitures particulières est la plus fournie avec 66 % de l'ensemble des véhicules, suivie de la catégorie des véhicules utilitaires légers avec 23 %, des poids lourd avec 10 % et enfin de la catégorie des bus qui ne représente que 1 % du parc automobile étudié.

L'étalement urbain de la région d'Alger et la relative uniformité du parc automobile font que dans la zone d'étude, les catégories de véhicules constituées comportent des proportions invariantes de types de véhicules au niveau de la zone d'étude et de la période prise en compte.

L'utilisation des catégories de véhicules au lieu de types de véhicule n'affecte en rien l'exactitude des résultats aussi longtemps que la proportion du type de véhicule à l'intérieur d'une catégorie est maintenue constante dans l'espace et le temps (HO Quoc Bang, 2010).

On ne prendra pas en considération la catégorie des motos car le mode deux roues, est quasiment inexistant parmi les étudiants et scolaires (0,04 %), contrairement à ce que l'on observe dans la plupart des pays de développement comparable. Cette situation trouve son explication dans le fait que le relief accidenté d'Alger ne se prête pas à l'usage des deux roues, en plus des dangers qui guettent les motocyclistes et les motards compte tenu de la conduite automobile bien souvent « anarchique ». (Safar Zitoun et al., 2009).

### IV.2.3 L'estimation des facteurs d'émissions.

Le calcul des émissions par le modèle EMISENS est basé sur la méthodologie COPERT (COmputer Program to calculate Emission from Road Transport) (Ntziachristos et al., 2007) qui prend en compte les émissions à chaud des véhicules, les surémissions liées au démarrage à froid selon la longueur moyenne de trajet et les émissions par évaporation des véhicules en circulation.

$$E = E_{\text{Hot}} + E_{\text{Cold}} + E_{\text{Evap}} \quad (\text{IV} .1)$$

Dans le modèle EMISENS, chaque type d'émission est basé sur l'équation suivante:

$$E_{ip,ie} = e_{ip,ie} A_{ie} \quad (\text{IV} .2)$$

Où  $E_{ip,ie}$  est l'émission exprimée en  $\text{g.veh}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ,  $ip$  est le polluant (CO, PM,  $\text{NO}_x$ , ...),  $ie$  est l'émetteur c'est-à-dire le véhicule,  $e_{ip,ie}$  est le facteur d'émission exprimé en  $\text{g.km}^{-1}.\text{veh}^{-1}$  et  $A_{ie}$  est l'activité de l'émetteur exprimée en nombre de kilomètres parcouru par le véhicule ( $\text{km.veh.h}^{-1}$ ).

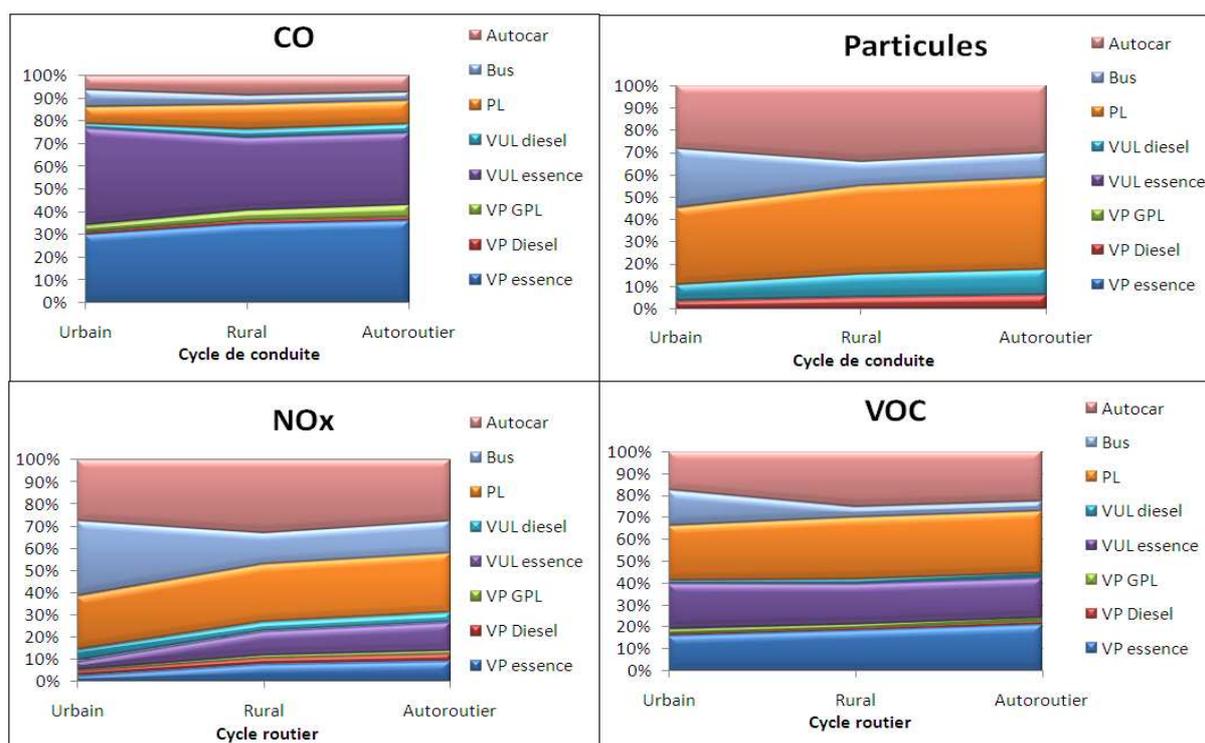
Le choix des catégories de véhicules nous permet d'en estimer les facteurs d'émissions moyens à partir de la répartition des types de véhicules dans ces mêmes catégories.

Par conséquent, les émissions pourront être calculées en utilisant un facteur d'émission moyen par catégorie et une activité moyenne pondérée pour chaque catégorie.

$$E_{ip}(x,y,t) = \sum_{le}^{N_{le}} \bar{e}_{ip,le} A_{le}(x,y,t) \quad (IV .3)$$

Où x et y représentent la position de chaque cellule du domaine et t représente le temps exprimé en heure, Ip est le polluant, le est la catégorie de véhicules, Nle est le nombre total de véhicule par catégorie et  $\bar{e}$  est le facteur d'émission moyen pondéré.

- **Les émissions à chaud  $E_{hot}$**  : sont les émissions de gaz d'échappement à chaud, c'est-à-dire lorsque le moteur a atteint sa température d'équilibre qui se situe pour les véhicules routiers aux alentours de 80° C. Les véhicules à essence sont responsables de la plus grande part des émissions à chaud du monoxyde de carbone alors que les particules sont issues essentiellement des véhicules lourds et des autocars. Ces derniers contribuent également dans une large mesure dans les émissions à chaud des oxydes d'azote et des composés organiques volatils (**Figure IV.6**).

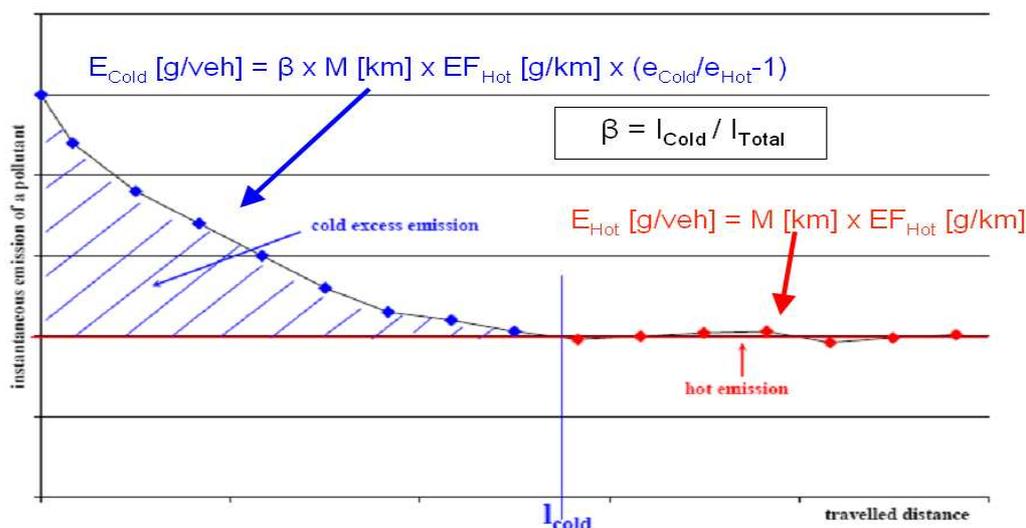


**Figure IV.6** : Parts des types de véhicules dans les émissions à chaud en fonction du cycle de conduite dans la région d'Alger selon les données de l'année 2006.

**Source** : Compilation des données du Laboratoire Energie et Pollution Atmosphérique (LEPA)- Université Saad-Dahleb de Blida- Algérie.

**Les émissions à froid  $E_{cold}$**  : sont issues d'un moteur en fonctionnement dont les organes sont encore froids et qui n'a pas encore atteint une température stable.

La méthodologie COPERT propose des facteurs de surémissions multiplicatifs à appliquer aux émissions à chaud pour la fraction de roulage parcourue à froid par les véhicules ; cette fraction de roulage à froid est appelée facteur  $\beta$  (**Figure IV.7**).



**Figure IV.7** : Emissions à froid selon la méthodologie Copert 4.  
Source : Ntziachristos et al., 2008.

Les émissions à froid dépendent donc de la technologie du véhicule à travers son facteur d'émission à chaud et de la fraction du kilométrage conduit avec un moteur froid qui, à son tour, dépend de la température ambiante (degré Celsius) et de la distance moyenne parcourue (km).

$$ECold_{ip,ie} = \beta_{ip,ie} \times N_{ie} \times M_{ie} \times eHot_{ip,ie} \times (eCold_{ip,ie} / eHot_{ip,ie} - 1) \quad (IV .5)$$

Où :

$ECold_{ip,ie}$  sont les émissions à froid du polluant ip causées par la catégorie de véhicules ie

$\beta_{ip,ie}$  est la fraction du kilométrage conduit avec un moteur froid.

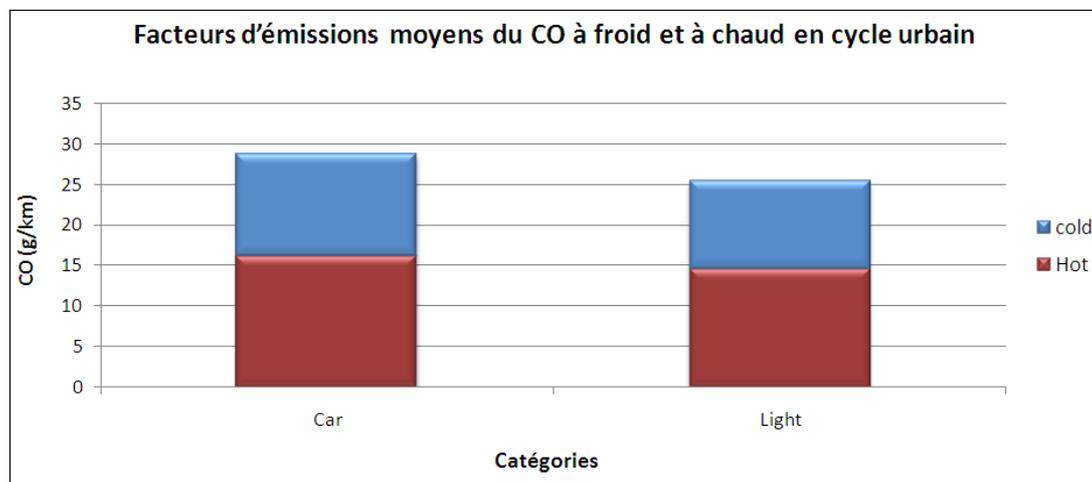
$N_{ie}$  est le nombre de véhicule de la catégorie ie en circulation.

$M_{ie}$  est le kilométrage total par véhicule (km/veh.) dans la catégorie de véhicules ie.

$eCold_{ip,ie} / eHot_{ip,ie}$  est le ratio des émissions à froid du polluant ip sur celles à chaud concernant les véhicules de la catégorie ie.

Les émissions à froid considérées sont celles du mois de Mars 2006 dont la température moyenne était de 17° C dans la région d'Alger et sont attribuées à la conduite urbaine car la grande majorité des véhicules commencent leurs déplacements en zone urbaine où les surémissions à froid de monoxyde de carbone représentent 43,58 % du facteur d'émission à chaud moyen pour la catégorie des voitures particulières alors que pour la catégorie des

véhicules utilitaires légers ce taux est de 42,78 % (**Figure IV.8**). Il est à noter qu'en France, la contribution des surémissions à froid pour les émissions de monoxyde de carbone était de 50 % en 2000 (Lacour et al. 2002). Cet écart s'explique par la différence de la température ambiante entre l'Algérie et la France.



**Figure IV.8** : Facteurs d'émissions moyens du CO à froid et à chaud en cycle urbain par catégorie de véhicule dans la région d'Alger.

- **Les émissions par évaporation  $E_{Evap}$** : sont sous forme de Composés Organiques Volatils, et ne concernent que les véhicules essences. Les émissions par évaporation sont dues aux :

- variations journalières de la température ambiante qui induisent une expansion de gaz à l'intérieur du réservoir. (diurnal losses)
- augmentation de la température du carburant qui ne circule plus lorsque le moteur est arrêté, mais encore chaud. (hot and warm soak losses)
- pertes en fonctionnement. (running losses)

Nous estimons dans cette étude, les émissions par évaporation grâce au logiciel COPERT 4 développé au sein de l'Agence Européenne de l'environnement. (**Figure IV.9**)

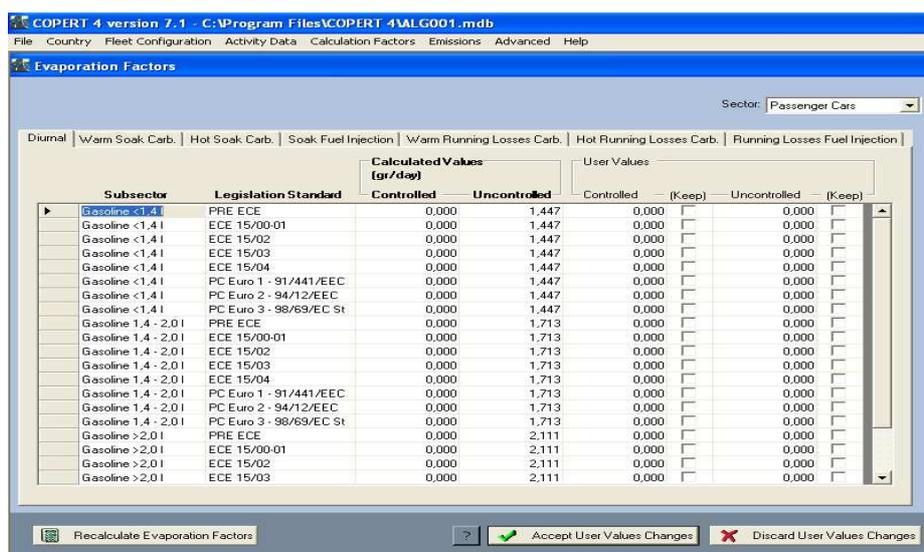


Figure IV.9 :Facteurs d'émissions par évaporation par catégorie de véhicule en Algérie – 2006 – Copert 4 Version 7.1.

On pourra ainsi calculer les facteurs d'émission moyens par catégorie de véhicule pour chaque polluant et pour chaque type d'émission (à chaud, à froid et par évaporation) en prenant en compte la proportion de chaque type de véhicule dans une catégorie de véhicules.

Par exemple, les facteurs d'émission moyens à chaud sont calculés de la manière suivante :

$$\bar{e}_{lv,js}^{\text{hot}} = \sum_{iv} \alpha_{iv} e_{lv,js}^{\text{hot}} \quad (\text{IV}.6)$$

Où  $\alpha_{iv}$  est la proportion de chaque type de véhicule dans la catégorie de véhicules  $iv$ .

#### IV.2.4 Le choix des catégories de rues.

Les facteurs d'émission à chaud et à froid calculés avec les équations de la méthodologie COPERT 4 dépendent de la vitesse du véhicule pour chaque rue de la zone d'étude. La collecte de ces informations est évidemment difficile et coûteuse. Cette difficulté est contournée grâce au modèle EMISENS. En effet, les rues ( $is$ ) sont regroupés dans des catégories de rue ( $I_s$ ), dans lesquelles la vitesse du véhicule est la même, et où les facteurs d'émission sont constants. Une catégorie de rue est donc un groupe de rues avec les mêmes facteurs d'émission et la même vitesse.

On répartit les rues de la zone d'étude en 3 catégories : urbaine, rurale et autoroutière en utilisant les vitesses moyennes des différents cycles de conduite et en omettant les situations de congestion (Tableau IV. 3).

**Tableau N° IV.3** : Les vitesses selon les catégories de rue choisies.

	Catégorie de rue		
	Urbaine	Rurale	Autoroutiere
Vitesse (km/h)	17	52,5	62,5

**Source** : Compilation des données du Laboratoire Energie et Pollution Atmosphérique (LEPA) - Université Saad-Dahleb de Blida - Algérie.

Les vitesses indiquées sont issues des travaux du Laboratoire Energie et Pollution Atmosphérique de l'Université de Blida et ne correspondent pas à une circulation à cette vitesse maintenue constante mais à une vitesse moyenne d'un cycle cinématique représentatif de la circulation réelle. Chaque cycle de circulation alterne des phases d'accélération, de décélération et de circulation à une vitesse donnée. Ainsi, les plus basses vitesses doivent être considérées comme représentatives d'une circulation urbaine caractérisée par de nombreux arrêts ("stop and go"), alors que les cycles à haute vitesse traduisent une circulation plus fluide.

Le nombre de kilomètres parcourus par tous les véhicules constitue l'activité A qui est calculée en utilisant le kilométrage d'un véhicule ( $M_{iv}$ ) et le nombre total de véhicules ( $N_{iv}$ ):

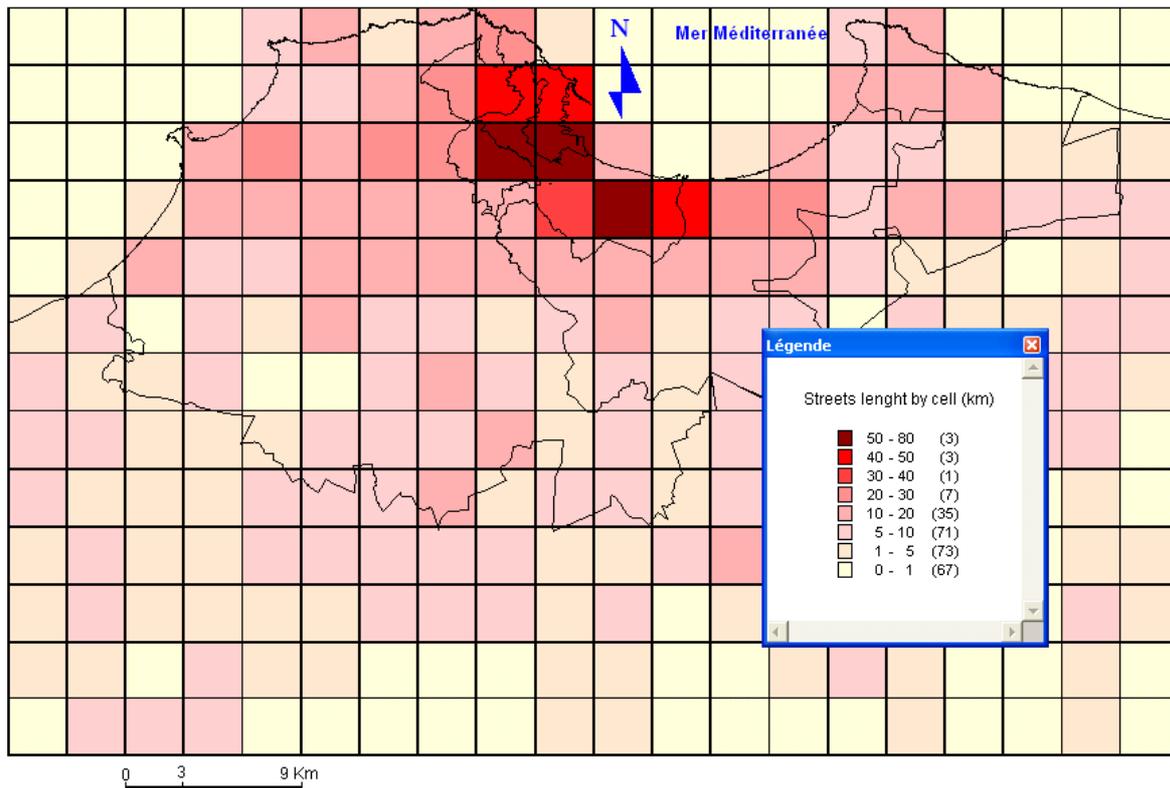
$$A_{ie} = M_{iv} N_{iv} \quad (IV .7)$$

Où le kilométrage annuel moyen, évalué en km (ou véhicule.km), est estimé à partir d'enquêtes menées entre 1990 et 2001 concernant les différentes catégories de véhicules. Les kilométrages les plus importants concernent les Bus et les véhicules lourds qui dépassent les 60 000 km/an (Boughedaoui et al., 2009).

Le calcul de l'activité est utile pour estimer le total des émissions qui devront être distribuées dans l'espace et le temps. Afin d'effectuer cette distribution, les activités doivent être calculées en utilisant le flux de véhicules sur un segment de rue spécifique ( $F_{is,iv}$  en veh.h-1) multiplié par la longueur de ce segment de rue ( $L_{is}$  en km):

$$A_{ie} = F_{is,iv} L_{is} \quad (IV .8)$$

Si les flux de véhicules sont connus pour chaque heure dans chaque rue de la ville, les activités seront facilement distribuées sur une grille en utilisant la fraction des rues, dans chaque cellule de la grille (**Figure IV.10**).



**Figure IV.10** : Longueurs des rues pour chaque cellule de la grille couvrant la zone d'étude.

L'heure de pointe du soir (HPS) se situe à 17h-18h. C'est en effet sur cette période que s'enregistre le plus grand nombre de déplacements avec un cumul des déplacements domicile-travail et des déplacements liés aux achats et aux loisirs. (SAFAR ZITOUN et al., 2009.)

L'analyse de l'ensemble des comptages de l'aire d'étude permet de calculer la part de trafic de l'heure de pointe du soir par rapport au trafic de la journée ouvrable du mois de Mars 2006 et qui représente globalement 6.71 %, tous véhicules confondus.

Dans le cadre des études concernant les projets du métro et du tramway d'Alger, l'entreprise du Métro d'Alger (EMA) a établi les débits dans les principaux axes à l'heure de pointe du soir. Ces données sont complétés par les résultats issus des comptages afin d'être utilisées dans la modélisation du trafic routier dans la zone d'étude (**Figure IV.11**).

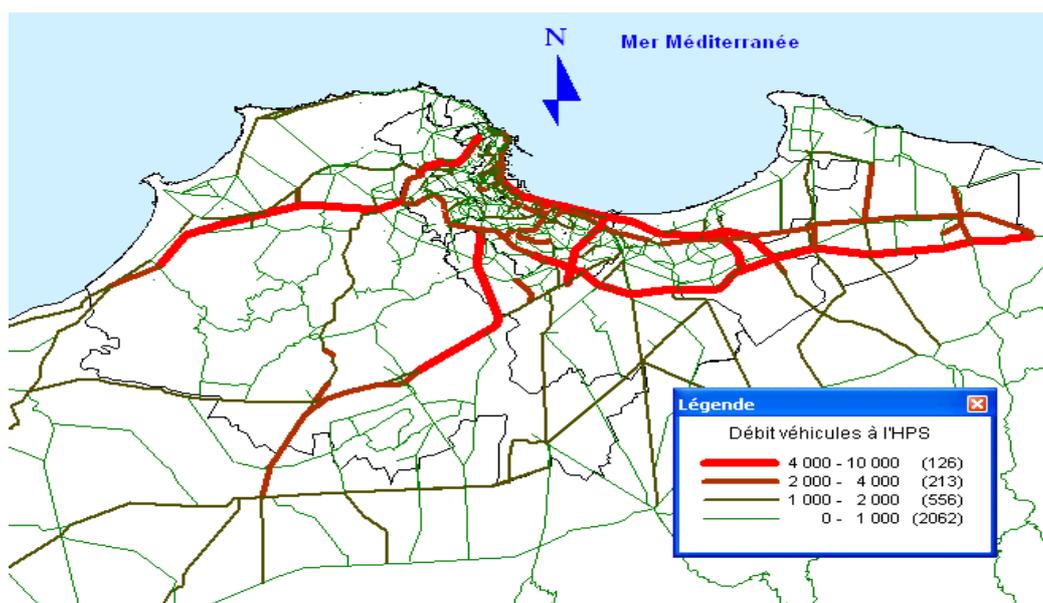


Figure IV.11 : Les débits en UVP dans la région d'Alger à l'heure de pointe du soir.

Les informations sur les flux des véhicules issus des différents comptages réalisés nous permettent d'établir une estimation des flux de véhicules par catégorie de rue et par catégorie de véhicule pour l'ensemble de la zone d'étude (**Tableau IV.4**).

Tableau IV.4 : Estimation des flux de véhicules en veh.km.h-1 pour la zone d'étude.

	Urban	Rural	Highway
Car	251 179	660 132	210 020
Light	17 300	45 468	14 465
Heavy	4 396	11 553	3 675
Bus	173	456	145

#### IV.2.5 Estimation du total des émissions.

Une première simulation avec le modèle EMISENS donne des estimations totales en tonnes par heure des émissions pour les polluants étudiés ainsi que leurs incertitudes relatives totales pour l'ensemble de la zone d'étude qui s'étend sur 2 340 Km<sup>2</sup> (**Tableau IV.5**).

Tableau N° IV.5 : Moyenne des émissions et leurs incertitudes totales.

Polluant	Emissions totales (Tonne/H)	Incertitudes (%)
CO	16,98000	33,86
PM	0,02388	7,32
NO <sub>x</sub>	1,98900	9,01
VOC	1,76300	26,64

Le modèle EMISENS est donc capable de calculer les émissions mais également les incertitudes liées aux paramètres d'entrée en utilisant la méthode de Monte-Carlo (Bang et al., 2011). Cette méthode est sous forme de quatre étapes :

- Modélisation des incertitudes des données d'entrée du modèle EMISENS.
- Propagation des incertitudes par le calcul des grandeurs résultats correspondant à ces données.
- Calcul des estimateurs statistiques des grandeurs recherchées.
- Hiérarchisation des incertitudes.

Une incertitude de 10% pour chaque paramètre d'entrée est utilisée pour évaluer la sensibilité de chaque paramètre avec le modèle EMISENS. Nous avons ainsi, pour chaque polluant, une hiérarchisation des paramètres selon leurs sensibilités permettant d'identifier ceux qui causent le plus d'incertitude sur les émissions (**Tableau IV.6**). Cette hiérarchisation permettra d'améliorer la précision de l'inventaire des émissions en réduisant le niveau d'incertitude des paramètres d'entrée ciblés.

Les résultats obtenus montrent que les paramètres utilisés pour le calcul des émissions à froid (kilométrages horaires des véhicules particuliers roulant à froid en zones urbaine ainsi que la température atmosphérique) ont le plus d'impact dans le cas du monoxyde de carbone, des composés organiques volatils et à un degré moindre, des particules. Alors que pour les oxydes d'azote, ce sont les paramètres pour le calcul des émissions à chaud qui ont le plus d'influence.

La catégorie des voitures particulières ainsi que la catégorie des rues urbaines ont le plus grand impact sur l'incertitude des émissions.

Une réorganisation des données en entrée, particulièrement celles en relation avec la catégorie des rues urbaines s'avère nécessaire afin de réduire les incertitudes.

**Tableau IV.6:** Pourcentage des incertitudes des paramètres en entrée les plus sensibles pour chaque polluant.

CO		Nox	
Paramètres	%	Paramètres	%
ColdStreetMileage_Car_Urban	19.66	StreetMileage_Car_Rural	4.85
ColdStreetMileage_Car_Rural	10.44	EmiFac_NOx_Car_Rural	4.79
Averaged_temperature	4.99	StreetMileage_Car_Highway	2.24
beY1_CO_Car_Urban	4.87	EmiFac_NOx_Car_Highway	2.23
StreetMileage_Car_Urban	4.49	StreetMileage_Car_Urban	1.64

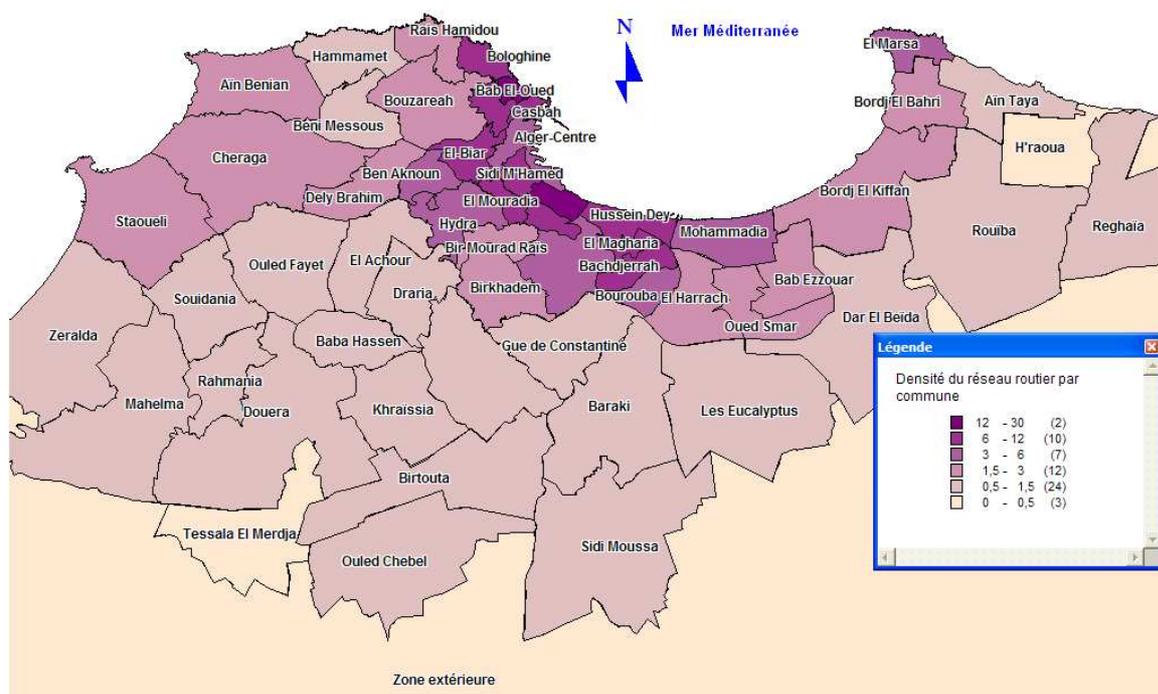
PM		VOC	
Paramètres	%	Paramètres	%
Averaged_temperature	4.52	ColdStreetMileage_Car_Urban	14.41
ColdStreetMileage_Car_Urban	3.68	ColdStreetMileage_Car_Rural	8.28
EmiFac_PM_Car_Rural	2.27	StreetMileage_Car_Rural	4.35
StreetMileage_Car_Rural	2.1	StreetMileage_Car_Urban	4.06
ColdStreetMileage_Light_Rural	1.88	Averaged_temperature	3.74

**Note**

- *StreetMileage\_Car\_Rural*: kilométrage horaire (flux x Longueur de rue) des voitures particulières dans la catégorie des rues rurales.
- *EmiFac\_NOx\_Car\_Rural* : Facteur d'émissions à chaud des NOx pour les voitures particulières dans la catégorie des rues rurales.
- *ColdStreetMileage\_Car\_Urban* : kilométrage horaire à froid des voitures particulières dans la catégorie des rues urbaines.
- *beYI\_CO\_Car\_Urban*: paramètre pour le calcul des émissions à froid pour les voitures sur la catégorie des rues urbaines.

Lors de l'application du modèle EMISENS à la ville de Bogota en Colombie, une redéfinition des catégories de rues en prenant en compte la densité du réseau routier a conduit à la réduction des incertitudes et par conséquent, l'amélioration des résultats (Robra, 2010).

A Alger, la densité du réseau routier est élevée dans l'hyper-centre et le centre ville pour s'atténuer quelque peu dans la 1ere couronne et encore davantage dans la 2eme couronne (**Figure IV.12**).



**Figure IV.12** : La densité du réseau routier (km/km<sup>2</sup>) à Alger répartie par commune.

Le réseau routier du centre-ville comporte souvent des artères dimensions modestes et des rues étroites et sinueuses en raison de la nature topographique de la ville. (**Figure IV.13**)

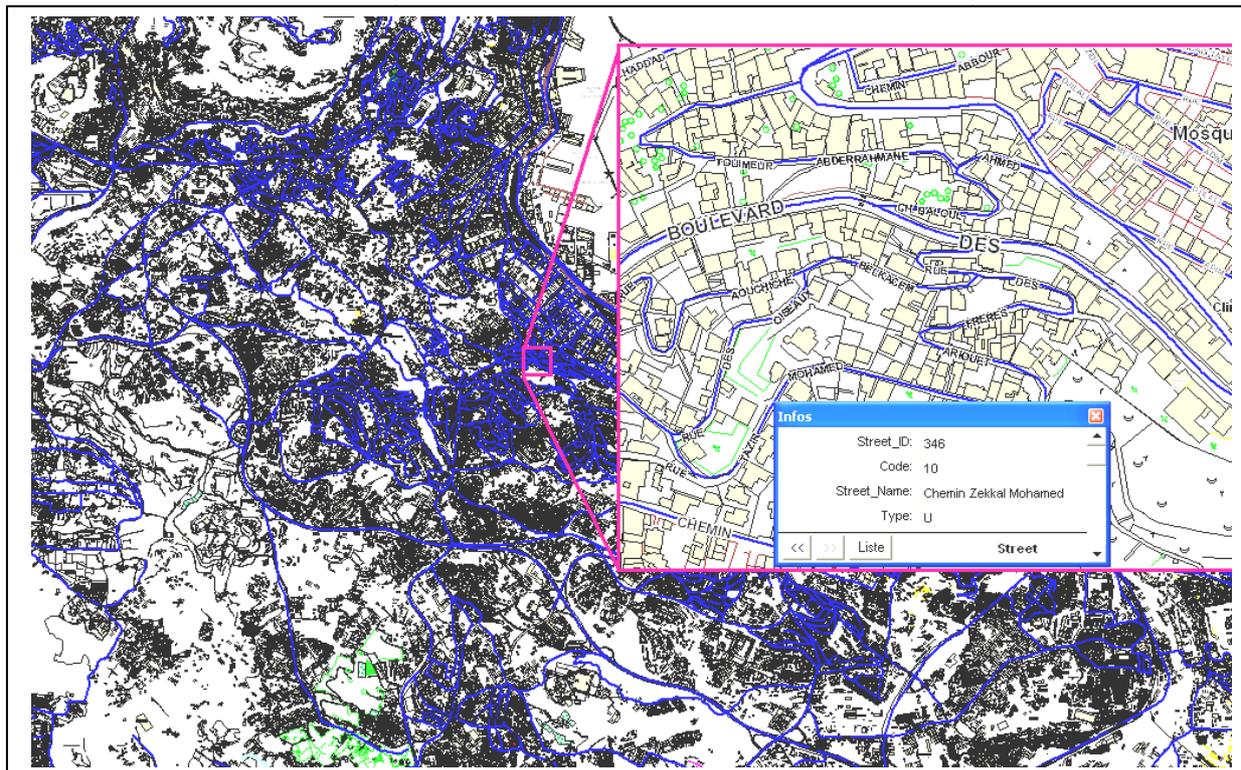


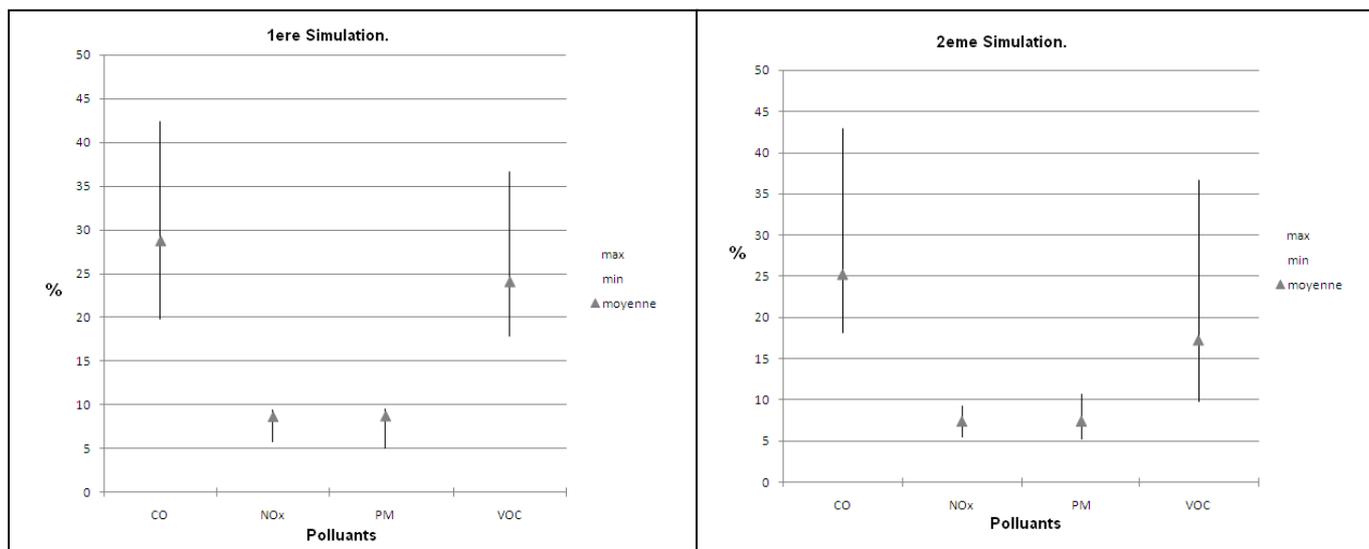
Figure IV.13 : Le réseau routier vectorisé du centre ville d'Alger.

Les routes urbaines situées dans le centre et l'hyper-centre connaissent un flux de véhicules différent par rapport aux routes urbaines situées dans la première et seconde couronne. Ceci conduit à répartir la catégorie des routes urbaines en 2 sous-catégories distinctes : Les routes des zones urbaines denses et les routes des zones urbaines moins denses. Cette séparation a permis lors d'une seconde simulation d'améliorer les résultats en réduisant les incertitudes relatives totales notamment en ce qui concerne les oxydes d'azote (**Tableau IV.7**).

Tableau IV.7 : Moyenne des émissions et leurs incertitudes à l'issue de la seconde simulation

Polluant	Emissions totales (Tonne/H)	Incertainces (%)
CO	16,99000	33,10
PM	0,02389	6,49
NO <sub>x</sub>	1,99000	6,48
VOC	1,79600	25,93

La redistribution des flux, pour les voies de type urbain, en utilisant et la densité du réseau routier (**Figure IV.12**) qui correspond en grande partie à la densité de la population (**Figure IV.2**) conduit à 2 nouvelles catégories de rues en cycle urbain permettant de lancer une 2eme simulation. Les résultats obtenus montrent une diminution significative de l'écart type moyen par rapport à la première simulation (**Figure IV.14**).



**Figure IV.14** : Amplitudes des pourcentages des incertitudes des polluants étudiés lors de la première et de la deuxième simulation à l'aide du modèle EMISENS appliqué à la zone du Grand - Alger.

Cette seconde simulation conduit, également à une meilleure répartition de la sensibilité des paramètres par la diminution des pourcentages des écarts types par rapport à la première simulation en mettant en évidence la part importante du flux des véhicules particuliers roulant à froid dans les zones urbaines denses (ColdStreetMileage\_Car\_Urban\_High\_Density) dans les émissions du monoxyde de carbone et des composés organiques volatils alors que les émissions des oxydes d'azote et des particules restent relativement influencées par les mêmes paramètres mis en évidence lors de la première simulation (**Tableau IV.8**).

**Tableau IV.8** : Pourcentage des écarts types des paramètres les plus sensibles après la seconde simulation.

Nox		CO	
Paramètres	%	Paramètres	%
StreetMileage_Car_Rural	4.85	ColdStreetMileage_Car_Urban_H	10.75
EmiFac_NOx_Car_Rural	4.79	ColdStreetMileage_Car_Rural	10.44
StreetMileage_Car_Highway	2.24	ColdStreetMileage_Car_Urban_L	8.92
EmiFac_NOx_Car_Highway	2.23	Averaged_temperature	4.99
StreetMileage_Car_Urban_H	0.9	StreetMileage_Car_Rural	4.13

PM		VOC	
Paramètres	%	Paramètres	%
Averaged_temperature	4.52	ColdStreetMileage_Car_Rural	8.13
EmiFac_PM_Car_Rural	2.27	ColdStreetMileage_Car_Urban_H	7.74
StreetMileage_Car_Rural	2.1	ColdStreetMileage_Car_Urban_L	6.42
ColdStreetMileage_Car_Urban_H	2.01	StreetMileage_Car_Rural	4.27
ColdStreetMileage_Light_Rural	1.88	Averaged_temperature	3.67

- *StreetMileage\_Car\_Urban\_H* : kilométrage horaire (flux x Longueur de rue) des voitures particulières dans la catégorie des rues urbaines à haute densité.
- *ColdStreetMileage\_Car\_Urban\_H*: kilométrage horaire à froid des voitures particulières dans la catégorie des rues urbaines à haute densité.
- *ColdStreetMileage\_Car\_Urban\_L* : kilométrage horaire à froid des voitures particulières dans la catégorie des rues urbaines à basse densité.

### IV.3 Répartition spatiale et temporelle des émissions.

#### IV.3.1 Répartition temporelle.

La Direction des Transports de la Wilaya d'Alger a procédé à une campagne de comptage routier sur plus d'une centaine de voies de l'agglomération algéroise durant les mois de Février et de Mars 2006. Cela a permis d'avoir le profil moyen journalier du trafic de ces axes en UVP pour les jours ouvrables ainsi que pour les 2 jours du week-end que sont le Jeudi et le Vendredi. (Figure IV.15)

**UVP** : unité de véhicule particulier en utilisant les coefficients d'équivalence suivants :

- ✓ pour les véhicules légers et utilitaires : 1.0
- ✓ pour les bus : 2.0
- ✓ pour l'ensemble des camions et poids lourds : 3.0

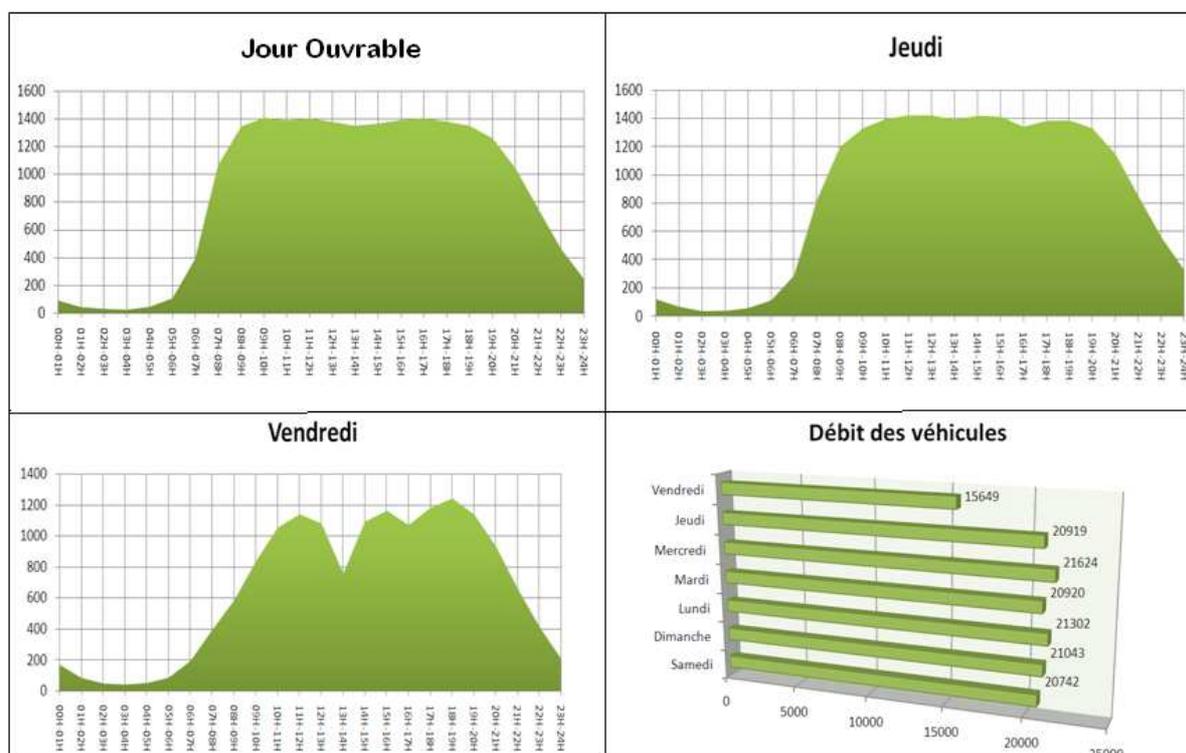


Figure IV.15 : Profils moyens journaliers exprimés en UVP (unité de véhicule particulier) pendant la période Février-Mars 2006 dans l'agglomération algéroise.

L'analyse de ces comptages montre que pendant les jours ouvrables s'étalant du Samedi au Mercredi les pics du trafic sont atteints dès 8h00 pour s'installer au niveau de 1400 UVP jusqu'à 18h00 avec un léger creux entre 12h00 et 14h00.

Lors de la journée du Jeudi, qui est soit totalement ouvrable soit à moitié ouvrable selon les administrations et les entreprises, le pic du trafic n'est atteint que vers 10h00 pour s'installer au niveau de 1400 UVP jusqu'à 19h00.

La journée du Vendredi est particulière, c'est une journée totalement fériée avec une nette baisse du trafic qui s'établit autour de 1200 UVP avec des pics à 11h00, 15h00 et 19h00 et un creux net et important entre 13h00 et 14h00 correspondant à la prière hebdomadaire et collective du Vendredi, caractéristique des pays musulmans.

Les comptages réalisés en zones urbaines sont complétés avec des comptages concernant les routes nationales et les routes secondaires, où le maximum est atteint par l'Autoroute de l'Est avec un débit journalier de 78 153 UVP vers l'Ouest et 85 007 UVP vers l'Est. (Safar Zitoun et al., 2009)

L'analyse de ces informations permet d'établir, pour l'ensemble des jours de la semaine, un profil horaire des flux de véhicules circulant dans les rues de la zone d'étude.

#### **IV.3.2 Répartition spatiale.**

La Wilaya d'Alger a une superficie de 810 km<sup>2</sup>, avec un réseau de voirie de 2 500 km composé de routes nationales et régionales ainsi que des rues urbaines majoritairement étroites.

Les contraintes naturelles qui caractérisent le relief d'Alger ont fait que les artères sont rares et de dimensions modestes dont la plupart sont à 2 voies. Le développement de la ville s'est fait vers l'Est où un important essor résidentiel et industriel a eu lieu au cours des trente dernières années. Ce site naturel a permis la construction de deux grandes autoroutes parallèles à la côte :

- L'autoroute Est, pénétrante du centre-ville, qui part de la RN 5 au niveau de l'échangeur des Fusillés (Hussein Dey), longe la côte, puis rejoint la rocade Sud juste après Dar El Beida ;
- La rocade Sud, voie de contournement, qui part de la RN 5 au niveau de Boudouaou, et se dirige en direction de la côte Ouest, tout en contournant la ville d'Alger par le Sud.

A ces grands axes s'ajoutent quelques réalisations qui ont doté Alger d'un réseau routier relativement bien maillé: la radiale Oued Ouchaïch; la pénétrante des Annassers; les routes nationales, notamment la RN 5 qui relie Alger aux wilayas Est de l'Algérie, en passant par El Harrach, Rouiba, Réghaia et Thénia, ainsi que la RN 1 qui relie Alger à l'extrême Sud du pays en passant par Baba Ali, Birtouta, Boufarik et Blida; les chemins de wilaya qui relient toutes les routes entre elles.

La voirie urbaine a subi un vaste programme de construction et d'amélioration des principaux carrefours. C'est ainsi que plusieurs trémies et échangeurs ont été réalisés pour fluidifier la circulation.

Toutes ces opérations d'amélioration de la voirie ont connu un succès certain, même si, dans certains cas, l'amélioration des conditions de circulation à un carrefour autrefois encombré n'a eu pour effet que de repousser le problème à un autre carrefour en aval (Safar Zitoun et al., 2009).

Toute la zone d'étude a été discrétisée selon un maillage de 3 km x 3 km en prenant en compte pour chaque maille les informations sur le type et la longueur des voies ainsi que le flux du trafic routier qu'elles supportent. La grille de 39 km x 60 km englobe l'ensemble des communes de la Wilaya d'Alger en plus de quelques communes qui les juxtapotent et qui appartiennent à la Wilaya de Blida.

Le trafic moyen journalier le plus intense se situe dans les zones qui correspondent à l'hypercentre et au centre-ville avec un débit supérieur à 300 000 UVP par jour pour chaque maille.

Le trafic routier est important dans presque toute l'aire de la Wilaya d'Alger sauf dans les zones montagneuses, fortement boisées ainsi que dans la zone de dégagement de l'Aéroport (Figure IV.16).

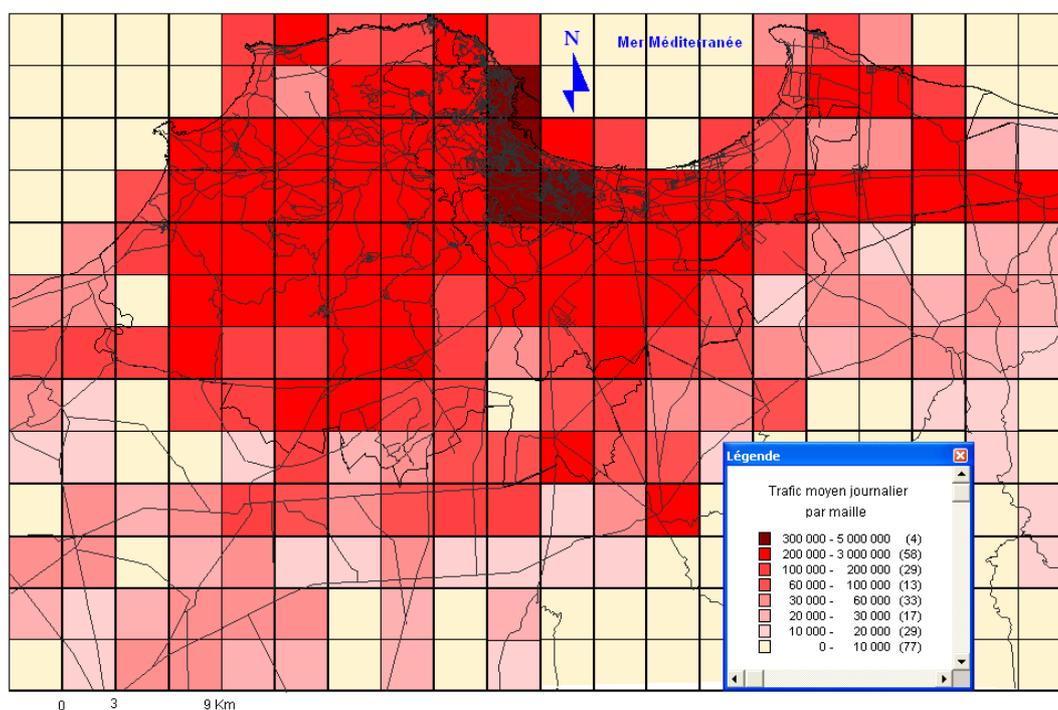


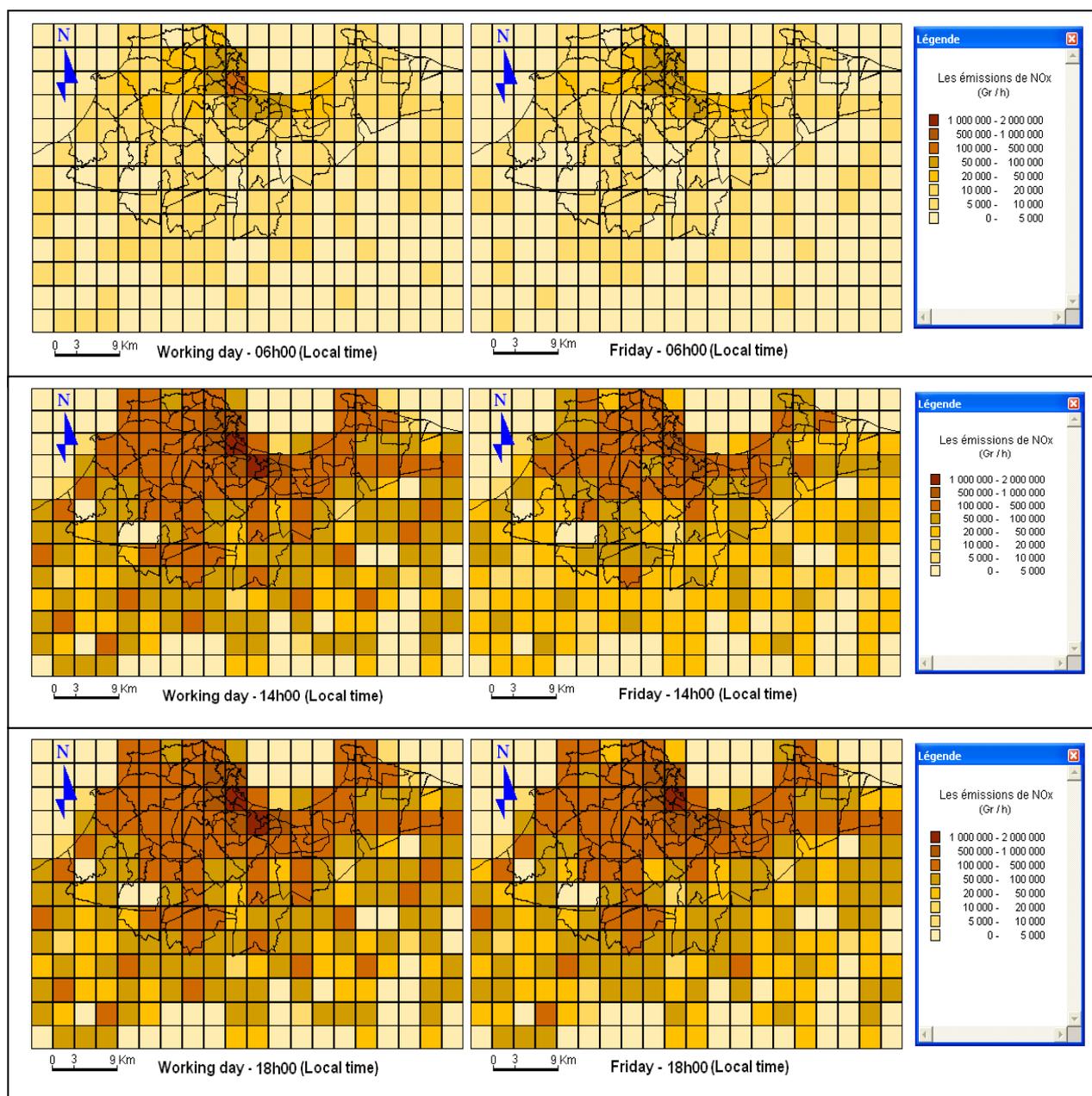
Figure IV.16 : Le trafic moyen journalier par maille dans la zone d'étude pour la période de Mars 2006.

L'intensité du trafic s'explique par le pouvoir attractif de la ville d'Alger qui attire plus de 130 000 déplacements de travailleurs par jour, soit l'équivalent d'une ville moyenne qui rejoint la capitale quotidiennement.

Les déplacements travail-domicile (49,86 %) et domicile-travail (50,14 %), qui sont pratiquement équilibrés, expriment un phénomène apparu depuis quelques années : une plus grande dispersion des emplois à l'échelle de toute l'aire métropolitaine, emplois qui étaient autrefois concentrés principalement au centre-ville (zones hyper-centre et centre-ville). (Safar Zitoun et al., 2009).

Les résultats de l'application du modèle EMISENS à la zone d'étude de 2 340 Km<sup>2</sup>, sont sous forme de tables horaires spatialisées par maille pour 3 types de journées : le jour ouvrable, le Jeudi et le Vendredi. Ces deux jours constituaient, en 2006, le week-end mais ont des résultats différents. Selon les entreprises et les administrations, le Jeudi est un jour soit totalement ou partiellement chômé, soit totalement ouvrable comme c'est le cas du secteur bancaire. Les résultats des émissions polluantes pour la journée du Jeudi ne diffèrent pas trop des résultats d'une journée ouvrable. Par contre, la différence, entre la journée du Vendredi et le jour ouvrable, est fortement marquée, surtout à 14h00 (heure locale) qui correspond à la prière hebdomadaire du Vendredi. (**Figure IV.17**).

Les analyses thématiques, appliquées au système d'information géographique conçu, montrent que les plus fortes concentrations des émissions des oxydes d'azote sont localisées dans l'hyper-centre. Les mailles qui présentent de fortes concentrations sont celles qui englobent l'autoroute de l'Est, la rocade sud et les régions à forte densité de voies où le trafic est intense. (**Figure IV.17**).



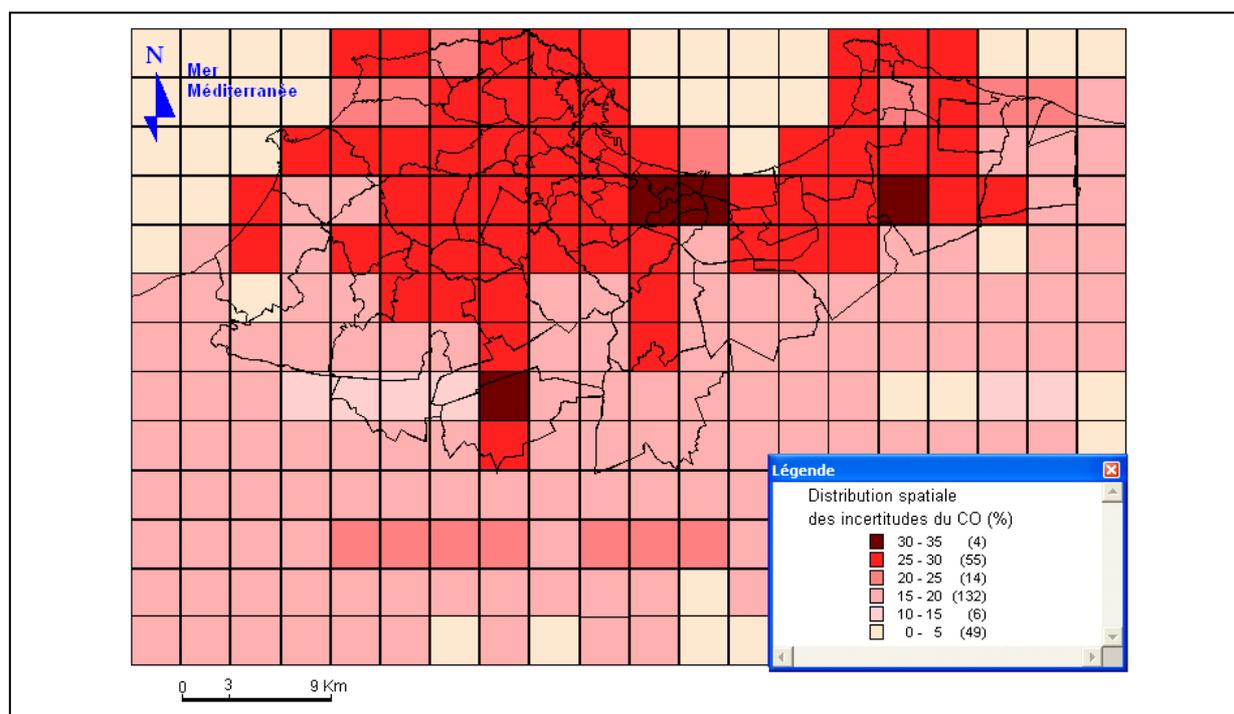
**Figure IV.17 :** Comparaison des émissions de NOx entre le jour ouvrable et le jour chômé (Vendredi) du mois de Mars 2006 dans la région du Grand Alger.

### IV.3.3 Estimation des incertitudes.

Les facteurs d'émission de la circulation routière sont l'une des principales sources d'incertitudes dans les inventaires des émissions des polluants. (BELCAZAR et al., 2010). Il est donc nécessaire d'utiliser des facteurs d'émissions dont l'incertitude est réduite.

Il est important d'estimer les incertitudes du cadastre d'émissions afin d'explorer au mieux les différentes combinaisons des données en entrée et de vérifier la cohérence des résultats obtenus.

L'exécution du modèle EMISENS pour l'ensemble des cellules de la grille donne pour chaque cellule, les émissions de chaque polluant, mais aussi les incertitudes associées (**Figure IV.18**).



**Figure IV.18** : Distribution spatiale des incertitudes du monoxyde de carbone dans la région du Grand Alger.

Nous remarquons que les incertitudes les plus importantes se situent hors de l'hyper-centre alors que c'est l'endroit où sont émises les plus grandes quantités de polluants. C'est la création des catégories de rues urbaines à haute densité et à basse densité qui a permis de diminuer les incertitudes de manière générale et particulièrement dans la zone de l'hyper centre.

#### **IV.4 Prise en compte des autres sources d'émissions.**

L'industrie et les décharges publiques contribuent de manière significative dans les émissions de polluants. La répartition spatiale des rejets gazeux issue des industries et des décharges est réalisée, par une méthodologie Top-down, selon la localisation des zones industrielles, des zones d'activité industrielles (APPL, 2003) et des décharges publiques (MATE, 2005). La répartition temporelle est déterminée selon les horaires de travail en vigueur lors de l'année 2006.

#### IV.4.1 Les émissions d'origine industrielle.

Il existe dans la région d'Alger, un grand nombre d'unités industrielles activant dans la transformation des métaux, l'agroalimentaire, les matériaux de construction, les textiles, les cuirs et dans de nombreux autres domaines. Ces unités sont situées soit dans des zones industrielles, soit dans des zones d'activité (APPL, 2003). La surface de ces zones nous permet de déduire des clés de répartition spatiale des rejets gazeux issus de l'industrie (**Tableau IV.9**).

**Tableau IV.9:** Les clés de répartition des émissions totales de l'industrie à Alger en fonction de la surface de chaque zone industrielle

<b>Location</b>	<b>Surface (Ha)</b>	<b>Taux</b>
<b>Industrial areas</b>		
Oued Smar +Extension	400.00	24.27
El Harrach	78.00	4.73
Rouïba - Reghaïa	1000.00	60.68
<b>Industrial activity zones</b>		
Zeralda ZA Zéralda	14.26	0.87
Staoueli ZA Staoueli	7.69	0.47
Saoula ZA Baba Ali	20.00	1.21
Tessala El MerdjaZA Tessala	6.81	0.41
El Achour ZA El Achour	15.39	0.93
Douéra ZA Ouled Mendil	6.34	0.38
Cheraga ZA Cheraga	8.43	0.51
Bordj-El-Kifan	11.76	0.71
Dar-El-Beïda	26.65	1.62
Eucalyptus	23.75	1.44
Gue-De-Constantine	9.06	0.55
BabEzzouar	8.00	0.49
Bir-Mourad-Rais	4.30	0.26
Hydra MZA Hydra	2.72	0.17
Baraki ZA	4.00	0.24
Bach-Djarrah	0.72	0.04

#### IV.4.2 Les émissions de combustion des déchets.

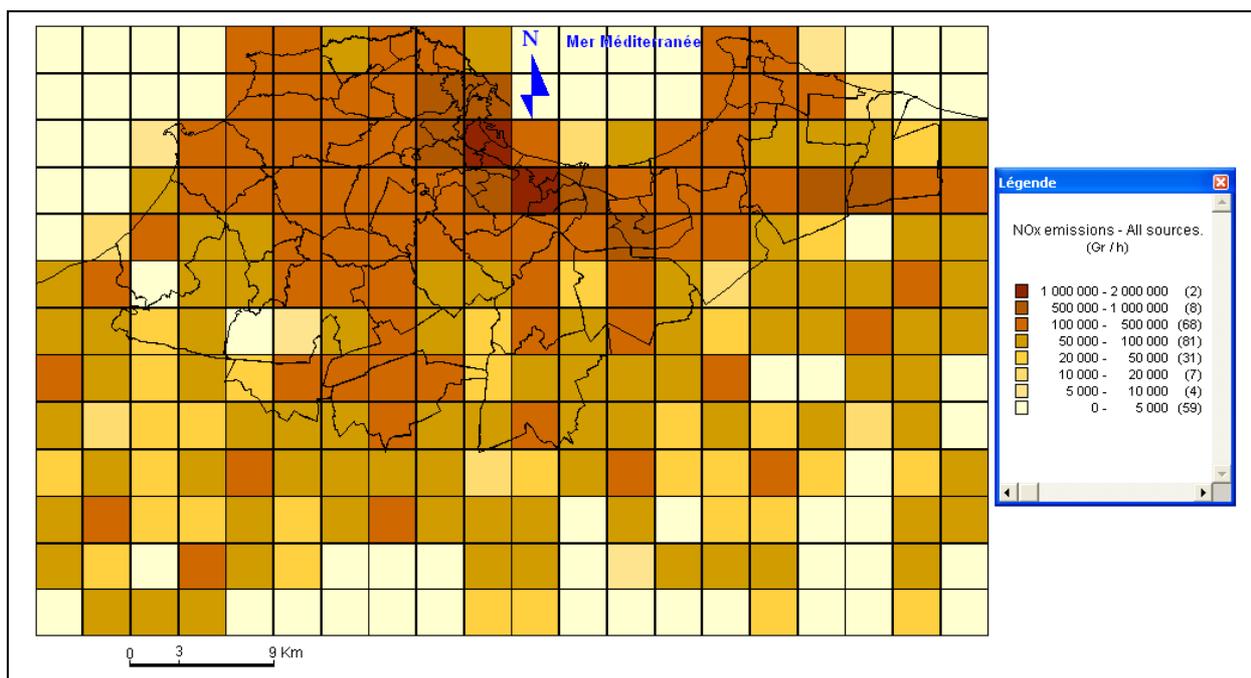
La région d'Alger dispose de plusieurs décharges publiques, où se produit, la combustion des déchets (MATE, 2005). Les capacités des décharges sont utilisées comme clés de répartition des émissions totales de ce secteur (**Tableau IV.10**).

**Tableau IV.10** : Les clés de répartition des émissions totales en fonction de la capacité de chaque décharge.

Décharge	Capacité (T/Jour)	Taux (%)
Oued smar	1 000	50
Ouled fayet	700	35
Baba hassen	50	2.5
El achour	50	2.5
Saoula	50	2.5
Mahelma	50	2.5
Birtouta	50	2.5
Sidi moussa	50	2.5

#### IV.4.3 Cartographie de l'ensemble des émissions.

La prise en compte des rejets issus de l'industrie et des décharges induit une accentuation des émissions des polluants. Le cas des oxydes d'azote est significatif car leur augmentation est localisée surtout dans la région de Oued Smar (zone industrielle et décharge) et dans la région de Rouiba et Réghaia à cause des zones industrielles qui s'y trouvent (**Figure IV.19**).



**Figure IV.19** : Les émissions d'oxydes d'azote, à 14h00 (heure locale), issues du trafic routier, des industries et de la combustion des déchets dans la zone d'étude.

## **IV.5 Conclusion.**

La pollution de l'atmosphère est essentiellement due aux émissions de polluants. L'inventaire de ces émissions polluantes est donc une étape essentielle pour connaître la nature des polluants émis. L'objectif principal de ce chapitre est le développement, pour la région d'Alger, d'un cadastre des émissions anthropiques surtout celles issues du trafic routier en raison de la part importante de ce secteur dans les émissions totales. L'utilisation du modèle EMISENS qui combine les méthodes «bottom-up» et «top-down», a généré des résultats cohérents, avec les incertitudes associées à toute modélisation, ce qui a permis de proposer une méthode afin d'en améliorer les résultats. Ces derniers, complétés par les émissions provenant de la combustion des déchets et de l'industrie permettent de disposer d'un cadastre des émissions le plus complet possible au vu des données disponibles sur la zone d'étude.

Mais le cadastre des émissions ne reflète que très partiellement la qualité de l'air car la dynamique de la circulation atmosphérique modifie les conditions de concentration et de dispersion des polluants. Les mouvements des masses d'air permettent aussi le transport de polluants issus de sources lointaines correspondant à des pollutions globales qui se mêlent aux pollutions locales.

Il est alors nécessaire d'utiliser le cadastre construit comme entrée dans un modèle de chimie-transport afin de déterminer la qualité de l'air dans chaque point de la zone d'étude, qui est l'objet du prochain chapitre.

La démarche adoptée pour la construction du cadastre des émissions, offre l'avantage d'utiliser une grille d'émission dont la résolution est de 3 km. La résolution étant un paramètre essentiel pour bien reproduire les lignes de convergence des écoulements atmosphériques et par conséquent les simulations pour le calcul des niveaux de pollution pourront être de bonne qualité.

## **Chapitre V**

# **Modélisation de la qualité de l'air dans la région d'Alger.**

## **V.1 Introduction.**

Le précédent chapitre a mis en évidence la complexité du problème de l'incidence de la pollution des transports routiers sur les émissions. Le résultat de cette partie a été, sur la région d'Alger, un cadastre des émissions du trafic routier en plus des émissions dont l'origine est l'industrie et la combustion des déchets. Le cadastre construit permet d'identifier la nature et la quantité des polluants atmosphériques émis répartis dans l'espace et le temps dans l'agglomération algéroise.

Dans l'atmosphère, les substances émises subissent diverses modifications sous l'effet des conditions météorologiques : le vent, l'humidité, les gradients de température qui contrôlent la dispersion des polluants ou au contraire leur accumulation. Il en résulte d'autres polluants et une géographie de la pollution différente des émissions d'origine. La prévision de la qualité de l'air doit prendre en compte l'ensemble de ces facteurs.

Ainsi, vent et pluie favorisent la dispersion, le brassage et le lessivage des polluants. En revanche, les situations anticycloniques persistantes (pression atmosphérique élevée, ciel dégagé et limpide) accompagnées d'une absence de vent au sol (inférieur à 2 m/s) et de situation dite d'inversion de température se traduisent par une concentration progressive des polluants émis au-dessus de l'agglomération.

La prévision, en temps utile, des épisodes de pollution correspond à une forte attente des citoyens et des pouvoirs publics susceptibles de prendre des mesures de réduction des émissions : par exemple agir sur la circulation des véhicules à Alger ou demander aux centrales thermiques de diminuer leur production.

La prévision de la qualité de l'air est devenue un impératif pour l'action des autorités en cas d'épisode de pollution afin d'anticiper des mesures de réduction des rejets polluants et ainsi prévenir ou limiter l'exposition des habitants de la région d'Alger à des niveaux de pollution qui pourraient être nocifs pour la santé des personnes les plus sensibles, voire pour la santé de l'ensemble de la population.

Les modèles de la qualité de l'air sont élaborés et utilisés pour prévoir les concentrations à court et à long terme des polluants atmosphériques à partir des niveaux d'émission de ces polluants ou de leurs précurseurs. La modélisation numérique permet donc la prévision de la qualité de l'air à différentes échéances de temps et d'obtenir des valeurs de pollution en dehors des points de mesures.

## V.2 Modélisation de la météorologie.

### V.2.1 Présentation du modèle météorologique MM5.

Le modèle mésoéchelle utilisé dans la simulation météorologique de la région d'Alger, est le modèle MM5 (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>) développé par la Pennsylvanie State University et le National Center for Atmospheric Research (NCAR) aux Etats-unis.

Ce modèle permet de simuler l'évolution des paramètres météorologiques sur le domaine d'application du modèle de la qualité de l'air. Sa mise en œuvre nécessite cependant de disposer des valeurs de ces paramètres aux frontières du domaine, elles proviennent des analyses météorologiques globales effectuées avec le modèle AVN (Global Aviation Model) par le Service National Météorologique Américain (National Weather Service : <http://www.nws.noaa.gov>).

Le modèle MM5 résout des équations de la mécanique des fluides géophysiques et de thermodynamiques appliquées à l'atmosphère. Toutes ces équations prennent en compte le paramètre de Coriolis lié à la rotation de la Terre. Ce modèle est basé sur la résolution de trois principaux jeux d'équations :

- les équations de Navier-Stokes pour le champ de vent,
- l'équation de la conservation de l'énergie liée au premier principe de la thermodynamique pour le champ de température,
- l'équation de continuité pour le champ de pression et la quantité de vapeur d'eau.

Les équations sont discrétisées spatialement sur une grille de type B dans la classification d'Arakawa (**Figure V.1**).

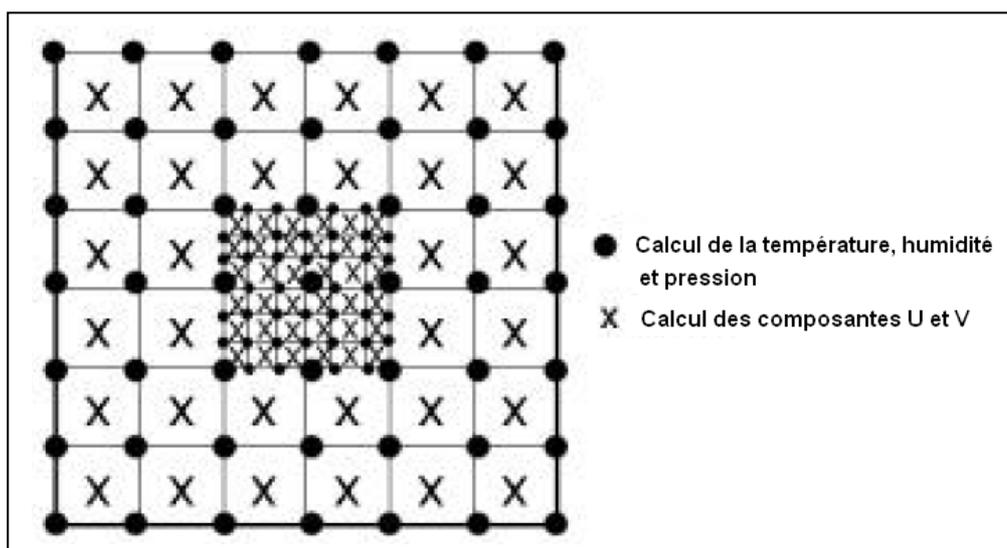


Figure V.1 : Schéma de discrétisation spatiale.

## V.2.2 Architecture globale du modèle météorologique MM5.

Le modèle MM5 est constitué d'une série de six modules, dont deux optionnels, s'enchaînant et assurant les étapes nécessaires à l'élaboration d'un calcul pour un domaine prédéfini (Figure V.2).

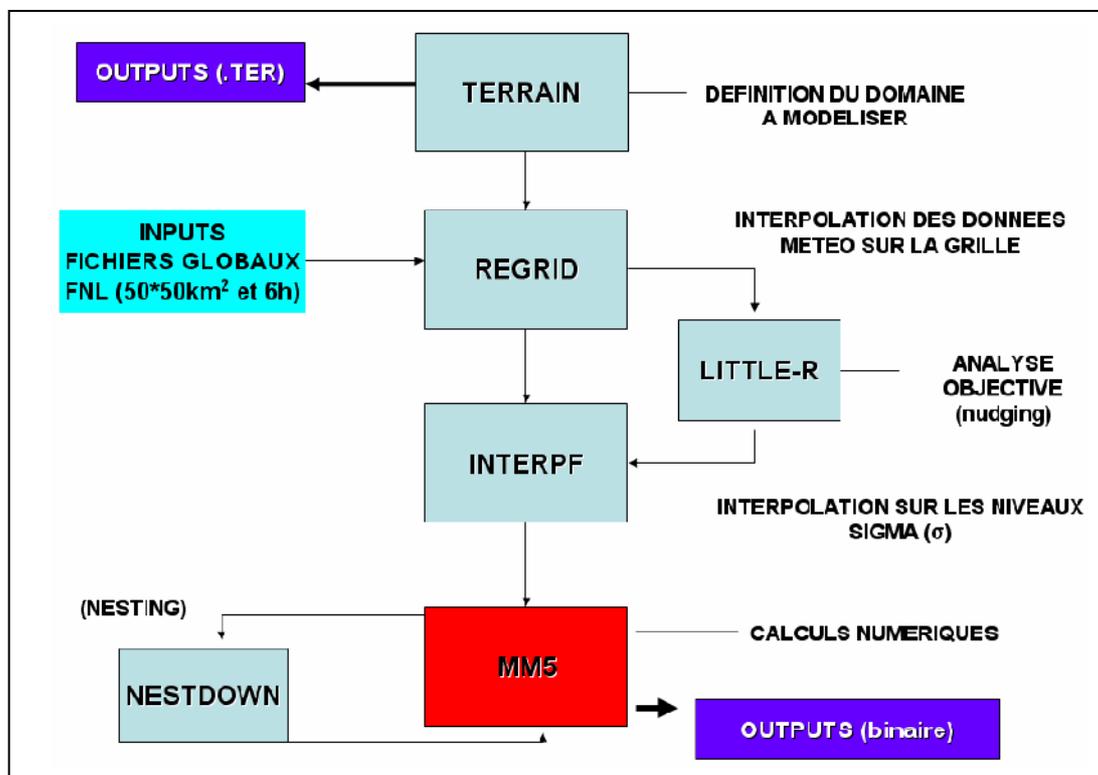


Figure V.2 : Architecture générale et imbrication des différents modules composant le modèle MM5.

Le premier module **TERRAIN** interpole les données topographiques et d'occupation du sol sur la grille. Ce module procède en trois étapes :

- Lecture des données topographiques et d'occupation du sol.
- Interpolation selon la latitude et la longitude.
- Création des fichiers de topographie et d'occupation du sol pour chaque maille des grilles.

Le module **REGRID** lit les fichiers de conditions aux limites météorologiques d'analyses ou de prévisions (données issues du modèle AVN-NCEP) puis interpole celles-ci aux grilles définies par **TERRAIN**.

Cette tâche est divisée en deux parties :

- Lecture et interpolation des données d'entrées météorologiques.
- Interpolation des données sur la grille de calcul. Les champs obtenus sont en niveaux de pression.

Le module **INTERPF** prend les niveaux de pression des champs météorologiques produits par **REGRID**, et les niveaux *S* définis, et interpole les données de niveaux de pression pour chaque niveau *S*.

Le module **MM5** est le dernier de la chaîne et procède aux calculs numériques : résolution des équations différentielles avec un schéma numérique approprié et les différentes options de paramétrisations sélectionnées.

Le module **LITTLE-R** est optionnel. Il permet de produire des fichiers issus de données mesurées, nécessaire à l'assimilation de données par la technique de l'observational nudging qui est une technique de relaxation newtonienne qui permet d'assimiler durant les calculs du modèle MM5 des grilles issues du modèle global AVN du NCEP.

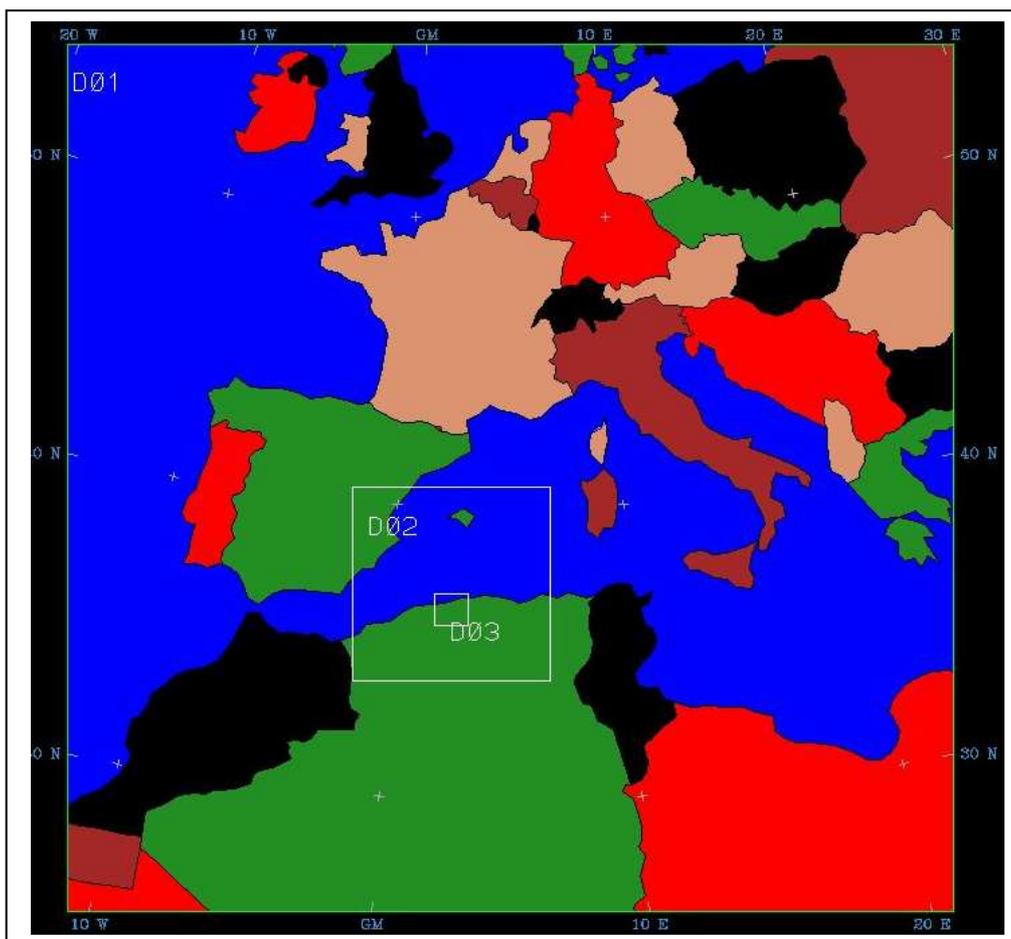
Le dernier module **NESTDOWN** qui est également optionnel, utilise la technique d'imbrication. La technique implique la détermination d'une Grille Mère (GM) ou *master domain* de résolution grossière dans laquelle sera insérée une Grille Fille (GF) ou *small domain* de résolution plus fine. MM5 peut ainsi calculer les conditions initiales et les conditions limites pour la grille fille à partir des résultats de la simulation de la grille mère.

L'intérêt de cette technique est de fournir des données de résolution fine à chaque GF. Elle est particulièrement adaptée à la modélisation des domaines de fines résolutions ayant des topographies spécifiques (lacs, montagnes, mer). Dans le cadre de notre travail, 3 domaines sont utilisés. Nous utilisons le Nesting afin de disposer de conditions aux limites du domaine de meilleures qualités. Ces données sont plus représentatives des conditions locales régionales que celles provenant d'un modèle global de résolution grossière.

Le premier domaine D01, d'une résolution de 36 km, englobe la plus grande partie de l'Algérie et de l'Europe occidentale, le second domaine D02, d'une résolution de 12 km, inclut le nord algérien, enfin, le troisième domaine D03, d'une résolution de 4 km, concerne la région d'Alger (**Figure V.3**). Ainsi, grâce à la technique du Nesting, la résolution est affinée progressivement pour aboutir à un résultat acceptable pour l'étude de la qualité de l'air dans la région d'Alger.

La résolution du domaine D02 le prédispose à la réalisation d'une modélisation régionale.

Le domaine D03 correspond aux meilleures résolutions disponibles avec MM5 mais le coût du calcul est élevé.



**Figure V.3 :** Les domaines imbriqués de simulation avec le modèle MM5.

Le modèle MM5 calcule plusieurs dizaines de variables, disponibles dans les fichiers de sortie du module MM5 (**Annexe II**). L'utilisation des outils open-source, NCARGRAPHIC (<http://ngwww.ucar.edu>) de l'University Corporation for Atmospheric Research, permet de tracer les cartes synoptiques des domaines modélisés comportant par exemple les isobares, les isothermes et les vecteurs vents (**Figure V.4**).

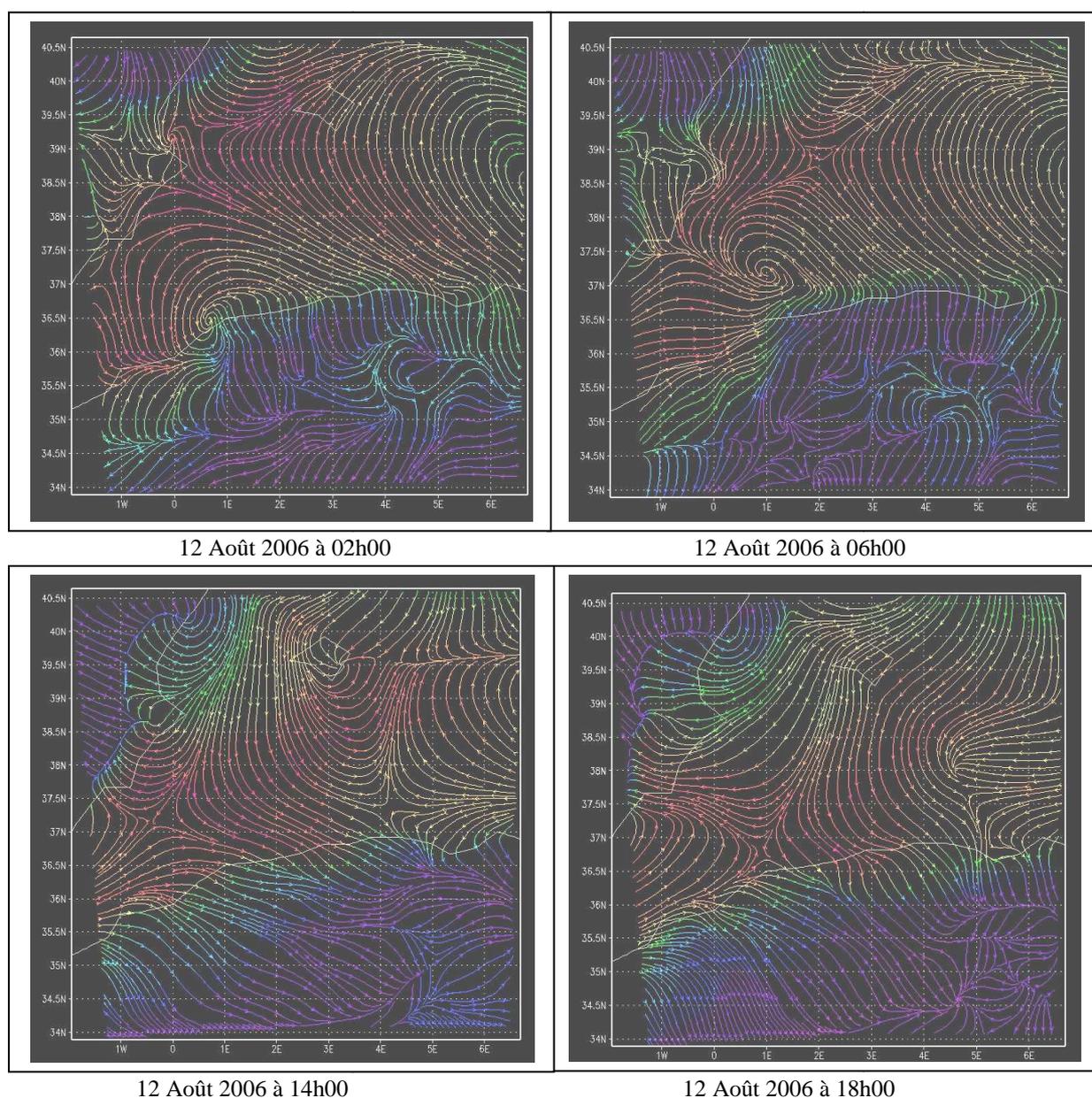
### **V.2.3 Situation météorologique dans la zone d'étude.**

L'épisode choisi correspond à une période de l'année caractérisée par un fort ensoleillement et un vent faible qui constituent des conditions propices à la transformation photochimique des oxydes d'azote sous l'action des rayons ultraviolets, contribuant ainsi à la formation de l'ozone troposphérique qui est l'un des plus importants indicateurs de la qualité de l'air vu son impact sur la santé et l'environnement.

Dans l'hémisphère nord et aux latitudes moyennes, la saison dite photochimique, qui est favorable à l'apparition de l'ozone troposphérique, s'étale généralement d'avril à septembre.

En effet au cours de ces périodes de temps un régime de brises thermiques provoque, fréquemment, un aller-retour de la même masse d'air au dessus du même espace. Ainsi, les polluants s'accumulent au fil des jours conduisant à un épisode de pollution par l'ozone. (Martin, 2008)

Ce phénomène est accentué dans la zone d'étude, qui est une région côtière, par le mouvement pendulaire induit par la brise de mer la journée et la brise de terre la nuit. En effet, des pics de pollution à l'ozone ont lieu lorsque les brises de mer sont bien établies (**Figure V.4**).



**Figure V.4:** Les champs du vent près du sol ( $u$ ,  $v$ ) simulé par le modèle MM5 pour le 12 Août 2006. Les lignes pleines représentent les limites de la côte.

### V.2.4 Les données météorologiques utilisées dans le modèle CHIMERE.

Les données nécessaires au fonctionnement du modèle de chimie-transport déterministe Eulérien CHIMERE sont regroupées dans le **Tableau V.1**.

La majorité des variables sont issues des fichiers météorologiques MM5. Toutefois, si elles ne sont pas disponibles, elles sont calculées à partir des paramétrisations incluses au sein de CHIMERE. Les données 2D sont uniquement disponibles pour une même couche de maille alors que les données 3D sont disponibles pour toutes les mailles de la grille.

**Tableau V.1** : Variables météorologiques utilisées par le modèle CHIMERE

Données météorologiques	Dimension	Unité
Vitesse du vent (U et V)	3D	m/s
Température	3D	K
Densité	3D	pas d'unité
Humidité spécifique	3D	kg eau/kg d'air sec
Hauteur des couches	3D	m
Contenu en eau dans les nuages	3D	kg eau/kg d'air sec
Précipitations convectives	3D	kg/m <sup>2</sup> /heure
Précipitations de grandes échelles	3D	kg/m <sup>2</sup> /heure
Glace	3D	kg/kg
Flux de chaleur sensible	2D	W/m <sup>2</sup>
Flux de chaleur latent	2D	W/m <sup>2</sup>
Vitesse de friction	2D	m/s
Hauteur de la CLA	2D	m
Fraction nuageuse (couches basses)	2D	m
Fraction nuageuse (couches moyennes)	2D	m
Fraction nuageuse (couches hautes)	2D	m

## V.3 Modélisation de la qualité de l'air.

### V.3.1 Présentation du modèle CHIMERE.

Le modèle CHIMERE (<http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere>) est un modèle eulérien de Chimie-Transport (CTM), basé sur l'intégration de l'équation de continuité pour les concentrations de plusieurs espèces chimiques dans chaque cellule d'une grille donnée (Schmidt et al., 2001).

Ce type de modèle traduit l'état de l'art des connaissances en physique et en chimie de l'atmosphère et permet de simuler le transport et la chimie des différents polluants photochimiques sur des domaines locaux à globaux fixés dans l'espace. CHIMERE calcule à une résolution temporelle de l'ordre de la dizaine de secondes, le devenir de masses d'air

polluées au cours de leur transport: diffusion turbulente, transformations chimiques, dépôt, etc. (Bessagnet et al., 2004).

Ce modèle a été utilisé dans plusieurs applications de recherche dont la sensibilité aux émissions anthropiques ou biogéniques (Beekmann and Derognat, 2003; Menut, 2003; Derognat et al., 2003) et le diagnostic des émissions (Vautard et al., 2003).

Le modèle CHIMERE a été conçu afin de pouvoir fonctionner à partir de différents types de données d'entrée. Il requière des données météorologiques, des conditions limites, des fichiers de végétation et de topographie et des données d'émissions. Ce modèle prend en compte une multitude de processus physico-chimiques.

### **V.3.2 Le développement du modèle CHIMERE.**

Le modèle CHIMERE est un outil sous licence libre GNU General Public License (GPL). Ce qui a permis d'accroître rapidement l'utilisation des programmes du modèle en dehors du groupe des développeurs initiaux. Son implantation sur les systèmes des utilisateurs leur permet de se l'approprier, de le modifier et dès lors, d'intervenir dans son évolution en suggérant de nouvelles orientations. Ce principe génère alors des collaborations avec l'équipe de développement. L'intégralité des codes sources du modèle sont laissés à libre disposition, ce qui a contribué à une large diffusion de CHIMERE qui, écrit de manière rigoureuse et pouvant s'adapter en toute confiance à différents types de machine et d'environnement. Le modèle CHIMERE reste en constante évolution et les grands contours des engagements à venir sont, notamment les problèmes de pollution dans les méga-cités et les problèmes environnement-santé avec la nécessité d'évaluer des relations entre concentrations de polluants et impact sur la santé.

### **V.3.3 Les processus physico-chimiques.**

L'évolution au cours du temps des concentrations de polluants est calculée en reliant la variation temporelle de la concentration des polluants sur le domaine à des processus physico-chimiques qui augmentent (processus de production) ou diminuent (processus de perte) la concentration d'une espèce chimique dans l'atmosphère.

**Le transport horizontal** des espèces chimiques par la composante horizontale du vent. Ce processus est important pour une espèce comme l'ozone qui peut être transportée sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres.

**Le transport vertical** des espèces chimiques par la composante verticale du vent et par la convection verticale, qui se produit localement en particulier sous l'effet du chauffage du sol

par le soleil : peu importante pendant la nuit, la convection verticale se développe au cours de la matinée, formant une couche de mélange, qui s'estompe en fin de journée.

**Le dépôt sec** sur le sol des espèces chimiques. L'importance de ce processus de dépôt dépend de l'espèce chimique considérée, du type de sol et des conditions atmosphériques. C'est un processus de perte des espèces chimiques, qui peut être prépondérant à grande échelle pour une espèce comme l'ozone.

**Les réactions chimiques** : les espèces chimiques présentes dans l'atmosphère interagissent chimiquement entre elles. Les réactions de photolyse activées par l'énergie solaire sont importantes dans la chimie de l'ozone. Elles font intervenir des précurseurs comme les NO<sub>x</sub> et les COV. Cependant, ces derniers regroupent plusieurs centaines d'espèces que l'on ne peut prendre en compte de manière exhaustive lors de la mise en œuvre opérationnelle d'un modèle de qualité de l'air. Des hypothèses simplificatrices sont faites, visant à réduire le nombre d'espèces et de réactions chimiques, et à optimiser les temps de calcul (Vernier, 2007).

#### **V.3.4 Les données en entrée.**

Le modèle CHIMERE simule l'état chimique (phase gazeuse et aérosols) d'une région limitée de la troposphère pour les principaux processus : émission, transport, transformation et dépôt. CHIMERE a besoin de données en entrée : la météorologie, les conditions aux limites, les informations sur l'occupation des sols et les émissions. La météorologie est fournie par le modèle méso-échelle MM5. Les conditions aux limites sont prises à partir de simulations de modèles climatiques mondiaux tels que LMDz-INCA pour les gaz et GOCART (The Georgia Tech/Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation Transport) pour les aérosols. L'information concernant l'occupation des sols est issue de la base de données GLCF (<http://glcf.umiacs.umd.edu/data/landcover>).

Les émissions généralement utilisées dans ce modèle sont issues de la base de données européenne EMEP ou mondiale EDGAR.

Nous proposons d'utiliser dans cette étude, pour les domaines DOM01 et DOM02 les émissions EMEP et pour le domaine DOM03, les émissions issues du cadastre des polluants dûs au trafic routier construit grâce au modèle EMISENS, complété par l'inventaire des émissions d'origine industrielle et de combustion des déchets, largement expliqué dans le chapitre IV. L'ensemble de ces modèles constitue alors une plate-forme de simulation de la qualité de l'air pour la région d'Alger (**Figure V.5**).

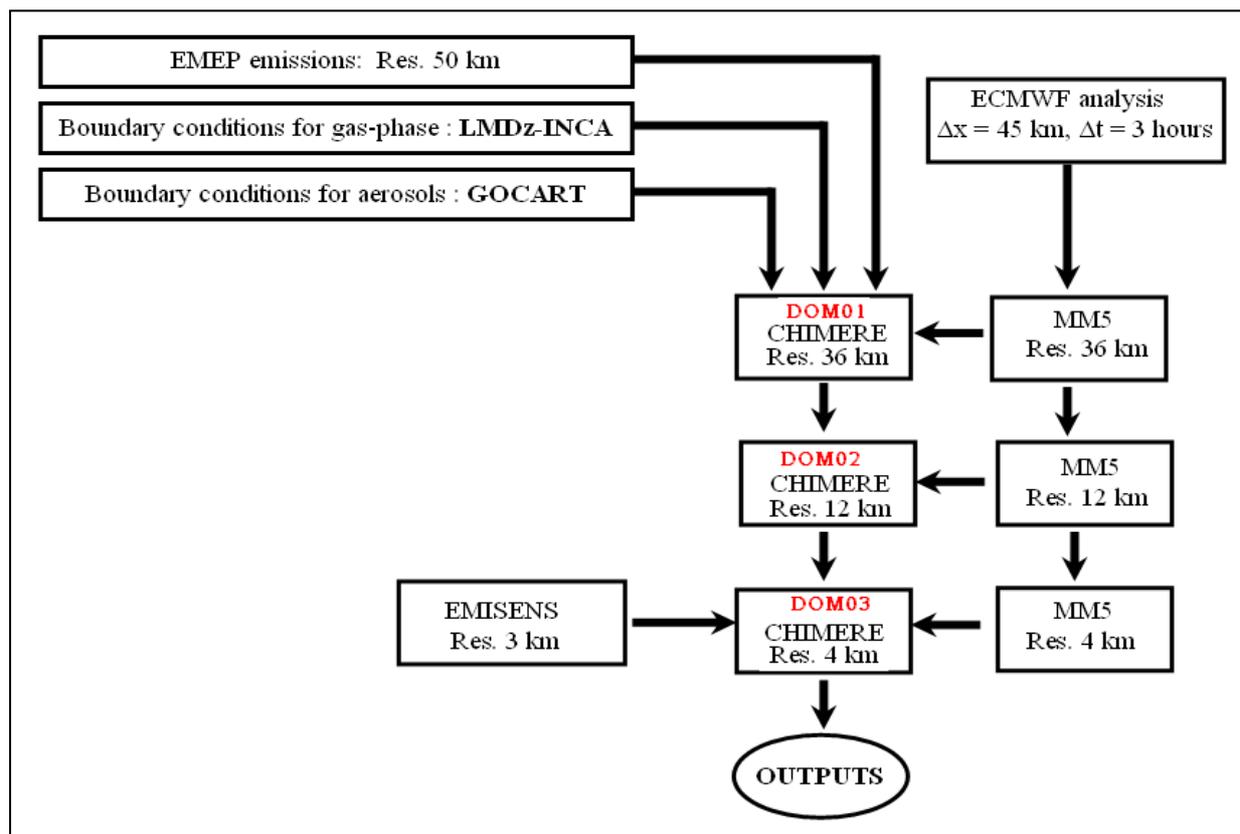


Figure V.5 : Les interactions entre les différents modèles et les résolutions des domaines choisis.

### V.3.5 Le mécanisme chimique.

Le modèle chimique, cœur du processus de modélisation, utilise le mécanisme chimique MELCHIOR 2 qui est mis en œuvre dans le code CHIMERE, et calcule les concentrations de 44 espèces selon une série de 116 réactions chimiques (**Annexe I**).

Afin de réduire le temps de calcul, le mécanisme utilisé dans le modèle CHIMERE est une version réduite du schéma complet et original, appelé MELCHIOR (Modèle d'Etude Lagrangienne de la CHimie de l'ozone à l'Échelle Régionale) qui contient 333 réactions chimiques de 82 espèces gazeuses (Lattuati, 1997).

La version MELCHIOR 2 est réduite suivant le concept "d'opérateurs chimiques" (Carter, 1990). Les réactions de photolyse prennent en compte le rayonnement actinique. Les valeurs des taux de photolyse sont calculées à partir des sorties du modèle TUV (Tropospheric Ultraviolet and Visible model) (Madronich et Flocke, 1998) et sont modulées par la couverture nuageuse (Boynard, 2009).

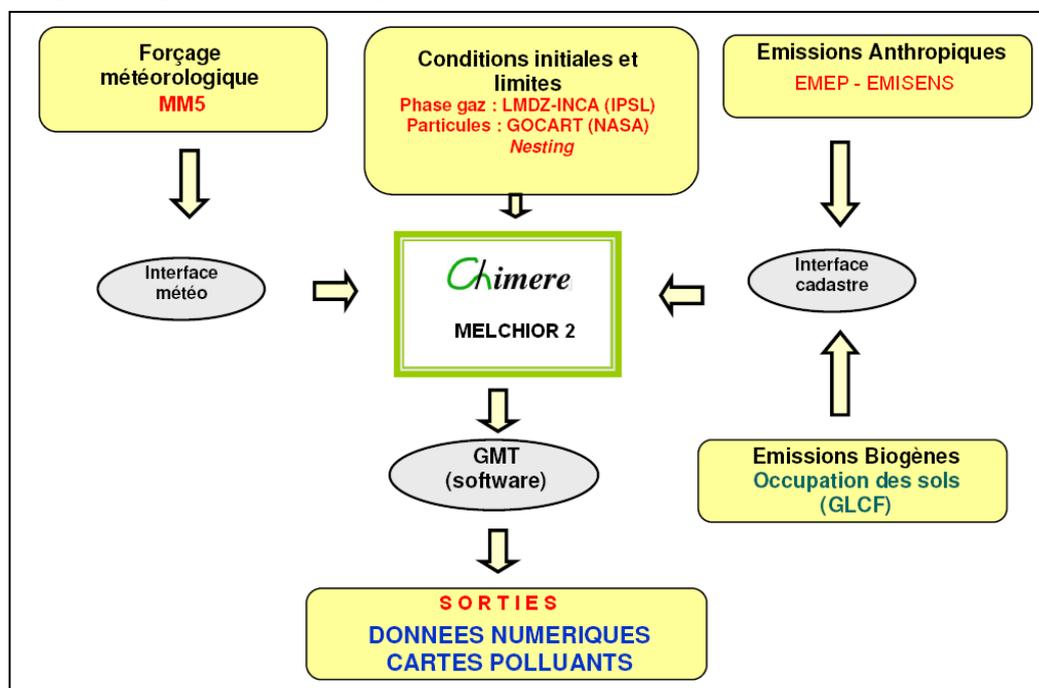
### V.3.6 Exécution du modèle CHIMERE.

Schématiquement, un domaine CHIMERE est une immense boîte délimitée par les bornes Nord, Sud, Est, Ouest et le sommet de la couche supérieure. Pour minimiser les effets de bord, il est nécessaire de connaître les concentrations aux limites du modèle. Le modèle CHIMERE utilise, à chaque point de grille des limites latérales et supérieures du domaine, les concentrations mensuelles climatologiques d'un certain nombre d'espèces ( $O_3$ ,  $NO_x$ , COVNM), calculées par le modèle LMDz-INCA (Hauglustaine et al., 2004). Ces conditions aux limites sont interpolées horizontalement et verticalement sur la grille du modèle CHIMERE. Par ailleurs, elles servent également de conditions initiales.

Pour des espèces à faibles durées de vie, les résultats en début de simulation peuvent être de qualité médiocre. Pour remédier à cette insuffisance, l'exécution de la simulation est lancée trois jours avant la période d'étude afin de laisser le temps au modèle de se mettre à l'équilibre.

L'intégration des données météorologiques, des émissions, des conditions initiales et des conditions aux limites nécessitent des interfaces dont le traitement varie en fonction du format des données.

La **Figure V.6** présente l'ensemble des modules liés au modèle CHIMERE. Les données qui transitent par chaque module sont généralement de format NetCDF.



**Figure V.6** : Différents modules liés au modèle CHIMERE.

Le traitement des données (postprocessing) est effectué avec l'outil GMT afin d'obtenir une cartographie des polluants dans la région d'Alger.

### V.3.7 Les simulations avec le modèle CHIMERE.

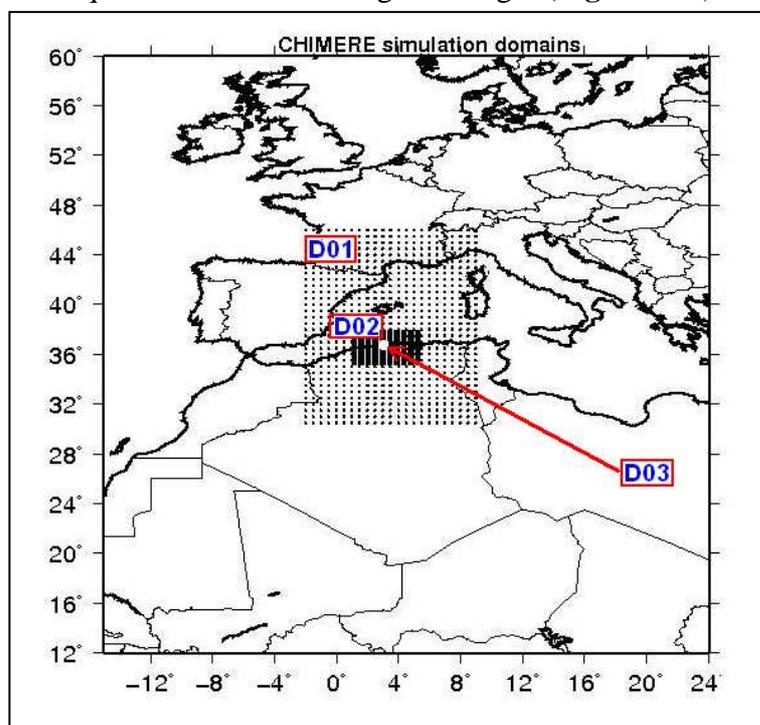
Deux simulations sont effectuées avec les modèles CHIMERE/MM5, pour les mois de Février 2006 et Août 2006. Le modèle CHIMERE est guidé par le modèle météorologique MM5, sur une base horaire pour les paramètres dynamiques (vent, température, humidité et pression).

Nous avons validé les résultats du modèle MM5 en comparant les données simulées avec les mesures recueillies à la station météorologique de l'aéroport d'Alger, car une bonne estimation des variables météorologiques est essentielle pour calculer les incidences des gaz et des aérosols sur la qualité de l'air (De Meij et Al . 2009).

Les données en entrée du modèle CHIMERE sont clairement indiquées dans la **Figure V.5**.

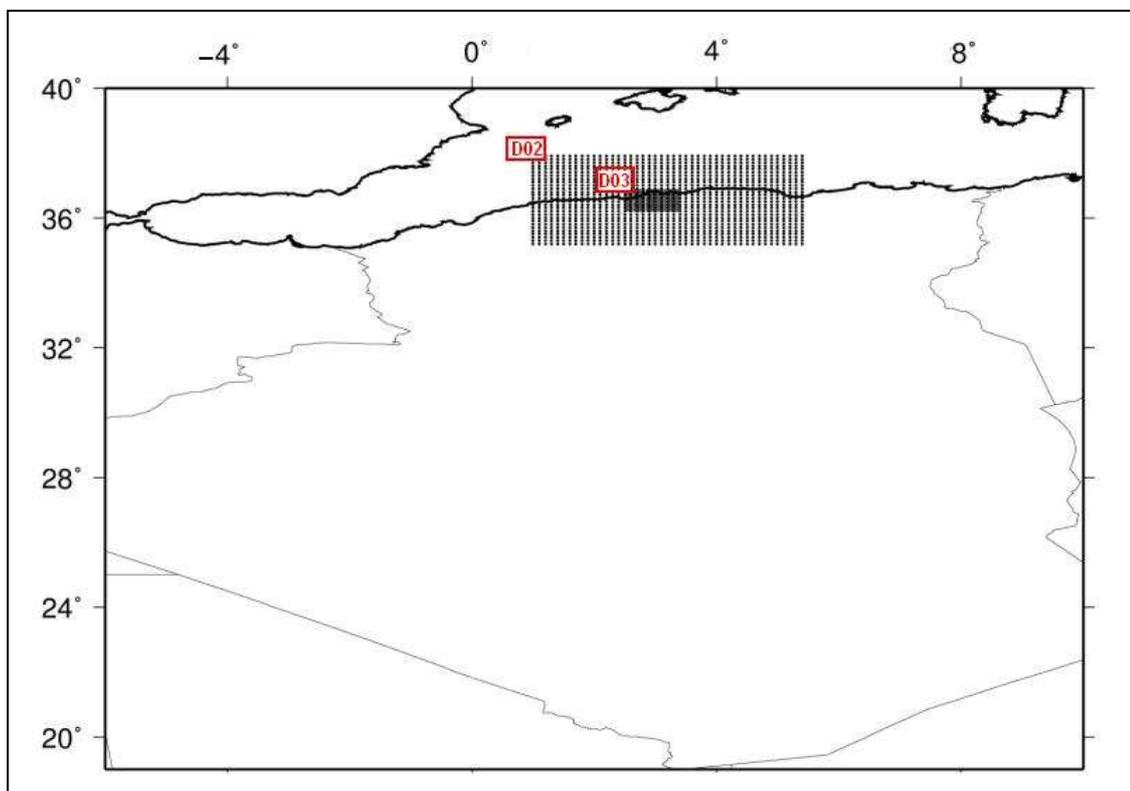
Pour les deux simulations, une période de 5 jours est appliquée dans le but d'initialiser le modèle. Les simulations sont effectuées, ensuite, dans des tranches de 5 jours consécutifs, chaque nouvelle période étant initialisé par des concentrations obtenues à l'issue de la précédente, de sorte que les concentrations soient continues dans le temps.

Pour notre application, nous utilisons le modèle CHIMERE en configuration imbriquée (Nesting). D'abord un domaine mère avec une résolution grossière de 36 km, couvrant le nord de l'Algérie et de grandes parties de la Tunisie et du Maroc, un second domaine imbriqué à 12 km de résolution couvrant la région du Nord-centre de l'Algérie et enfin un troisième domaine à 4 km de résolution qui se focalise sur la région d'Alger (**Figure V.7**).



**Figure V.7** : Les 3 domaines imbriqués de simulation du modèle CHIMERE.

Pour ce dernier domaine, dont la situation est indiquée dans la **figure V.8**, la résolution est la plus fine. La simulation du modèle CHIMERE est effectuée alors avec comme entrée, les émissions construites avec le modèle EMISENS, permettant ainsi de connaître les concentrations des polluants étudiés dans la région d'Alger.



**Figure V.8** : Les domaines D02 et D03 de simulation du modèle CHIMERE.

Les caractéristiques des trois domaines imbriqués utilisés dans les simulations avec le modèle CHIMERE sont répertoriées dans le **tableau V.2**.

**Tableau V.2:** Les caractéristiques des différents domaines utilisés pour la modélisation CHIMERE

Domaines	NX	NY	DX	DY	XMIN	YMIN
DOM01	23	32	0.5	0.5	-2	30.5
DOM02	45	28	0.1	0.1	1	35.2
DOM03	26	18	0.025	0.025	2.780048	36.50152

NX = nombre de maille horizontalement

NY= nombre de maille verticalement

DX = résolution horizontale (°)

DY = résolution verticale (°)

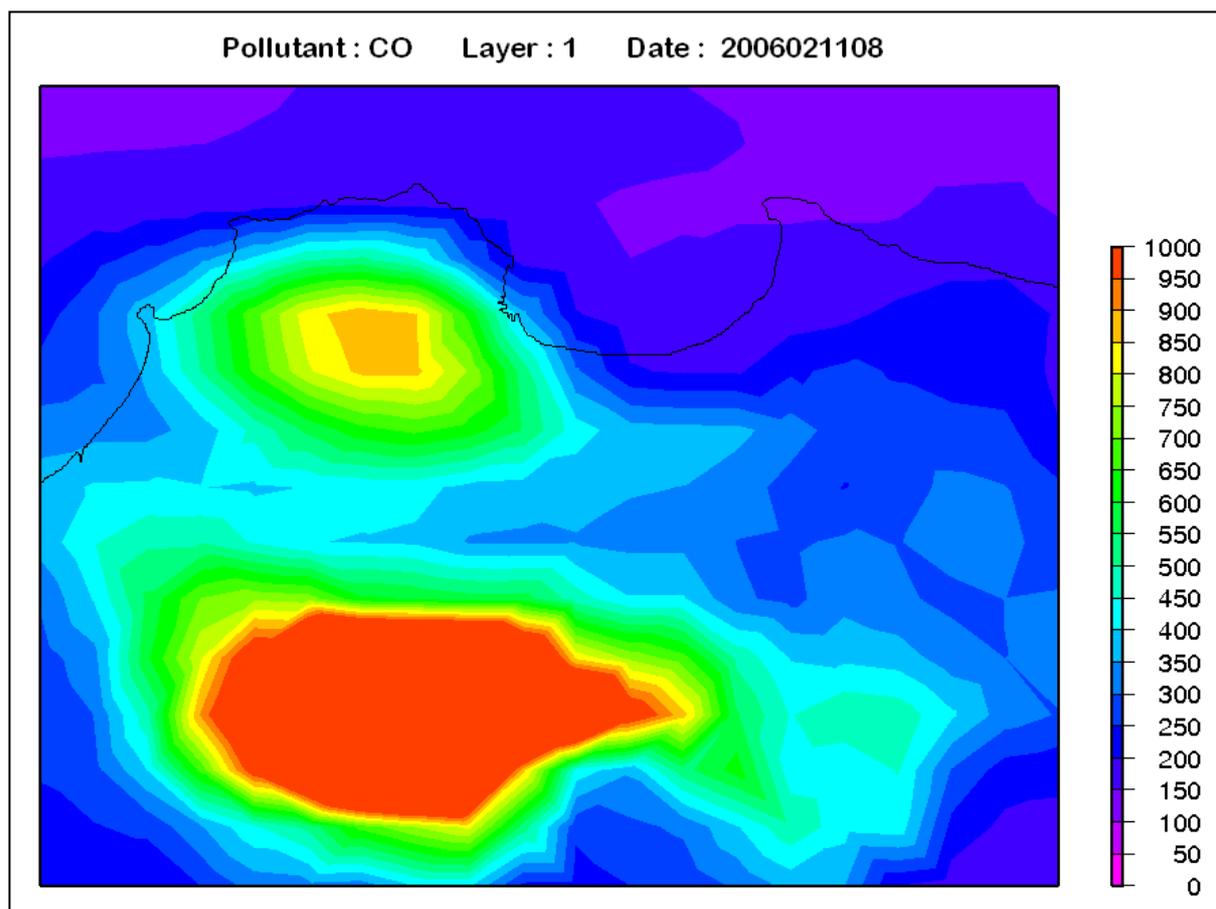
XMIN = coordonnée longitudinale de la maille située en bas à gauche de la grille du domaine (°).

YMIN = coordonnée latitudinale de la maille située en bas à gauche de la grille du domaine (°).

### V.3.8 Simulation du monoxyde de carbone.

La simulation du monoxyde de carbone pour le domaine D03, permet d'identifier, dans l'espace et le temps, les pics de pollution.

La **figure V.9** montre les concentrations de monoxyde de carbone en ppb pour le 11/02/2006 à 08h00 (heure locale) dans la zone d'étude du Grand Alger. Un pic de pollution au monoxyde de carbone, causée principalement par le trafic routier, est mis en évidence au cours de l'heure de pointe matinale et situé au sud-ouest d'Alger, où se trouvent, les routes à fort trafic.



En Algérie, les émissions de monoxyde de carbone sont principalement attribuables au trafic routier (**Tableau IV.1**). Les concentrations de monoxyde de carbone sont donc fortement liées aux fluctuations du trafic. Ainsi, comme le montre la **figure V.9**, au cours de l'heure de pointe matinale, les pics de pollution apparaissent autour de l'autoroute Alger-Blida, et de la Rocade Sud. Le 18/02/2006, l'Observatoire national de l'environnement et du développement durable a mesuré un pic à  $5 \text{ mg/m}^3$  de monoxyde de carbone, ce qui est assez loin de la valeur guide de l'OMS ( $10 \text{ mg/m}^3$  pour 8 heures). Mais, compte tenu de la forte augmentation du parc de véhicules algérien, ce taux peut être atteint rapidement, entraînant des effets néfastes

sur la santé de la population, en particulier les plus vulnérables: les personnes atteintes de maladie cardiovasculaire ou pulmonaire, les femmes enceintes et leurs fœtus et les enfants.

Il est important de voir aussi les résultats concernant les polluants secondaires comme l'ozone et de comparer les données simulées avec les données observées.

### **V.3.9 Simulation de l'ozone.**

L'ozone troposphérique, en l'absence de vent et de fortes radiations, est généré par deux classes importantes de précurseurs: les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>, qui indique la somme du NO et du NO<sub>2</sub>) et les composés organiques volatils (COV).

Nous avons choisi d'effectuer une simulation au cours de l'été, qui est plus propice à l'apparition de l'ozone troposphérique.

Les pics de pollution d'ozone se produisent lorsque les brises de mer sont bien établies. La brise de mer et la brise de terre déplacent la même masse d'air dans un mouvement pendulaire qui se charge en polluants atmosphériques à chaque passage sur les zones émettrices de pollution.

Pendant la journée du 11 août, les masses d'air sont déplacées des principaux pôles pollueurs vers le sud. Les polluants de ces masses d'air deviennent des polluants photochimiques (y compris l'ozone) sous l'effet du soleil (**Figure V.10**).

Dans la nuit du 11 août, les brises de terre poussent les masses d'air déjà pollué vers la côte pour se recharger en polluants lors des passages sur les sites pollueurs. La masse d'air résultante a stagné toute la nuit au-dessus de la côte et la mer durant la nuit.

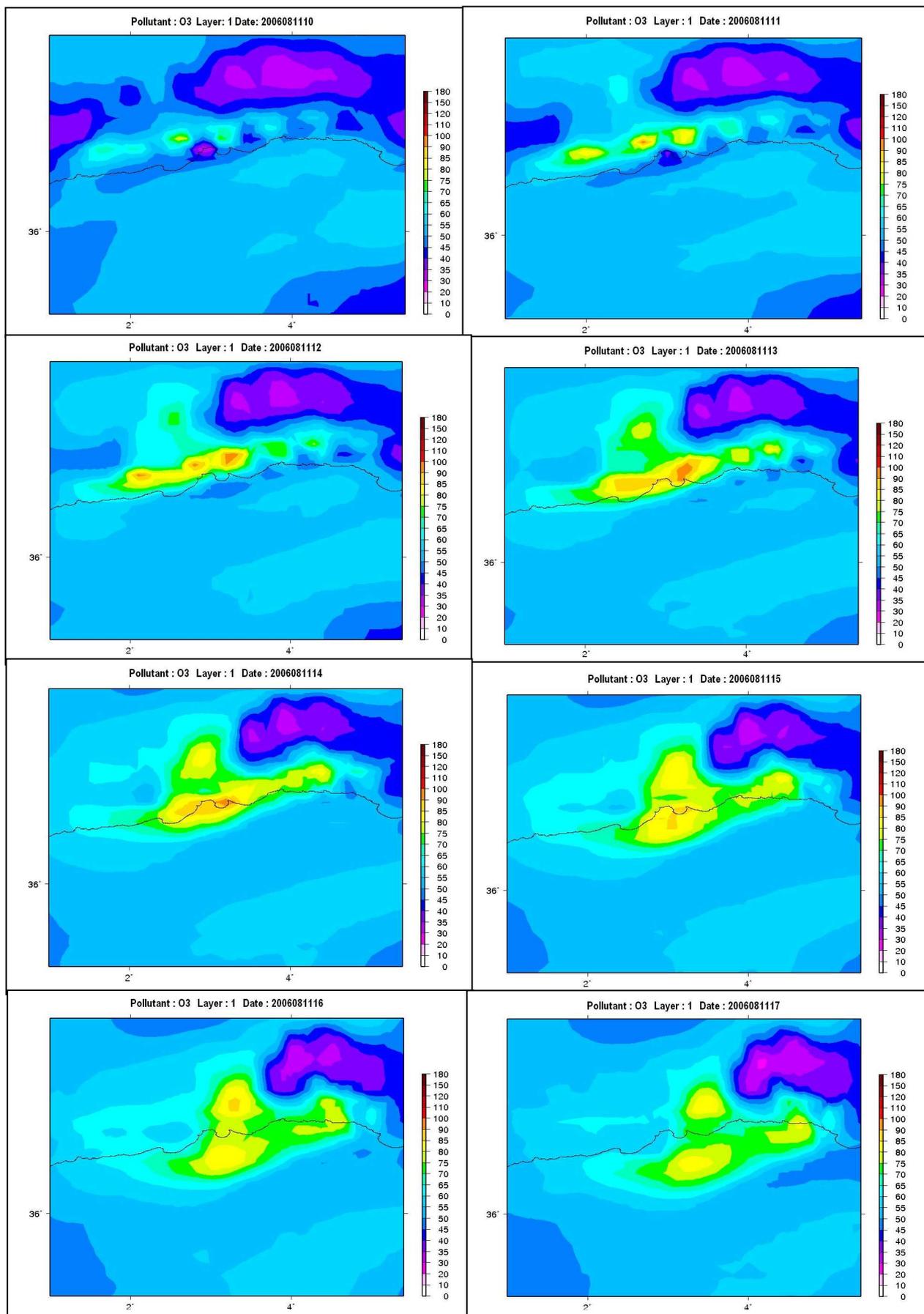
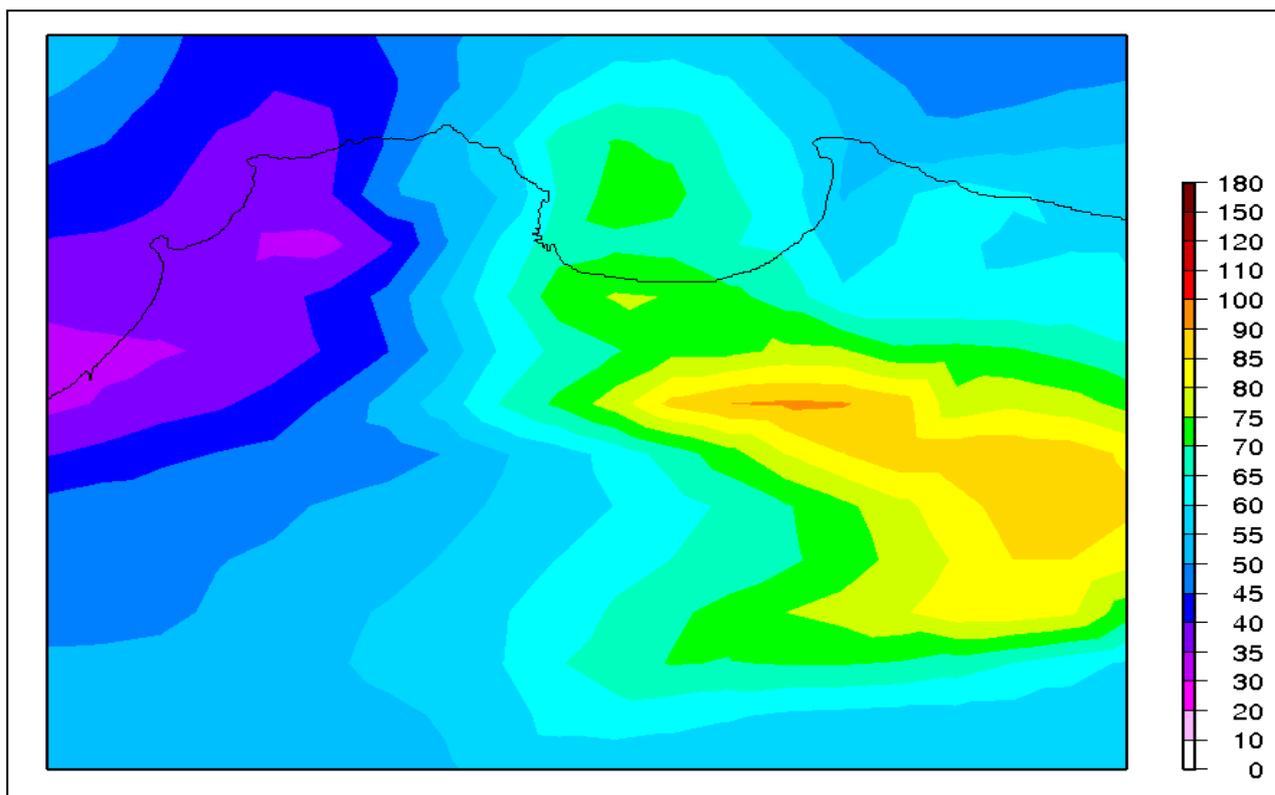
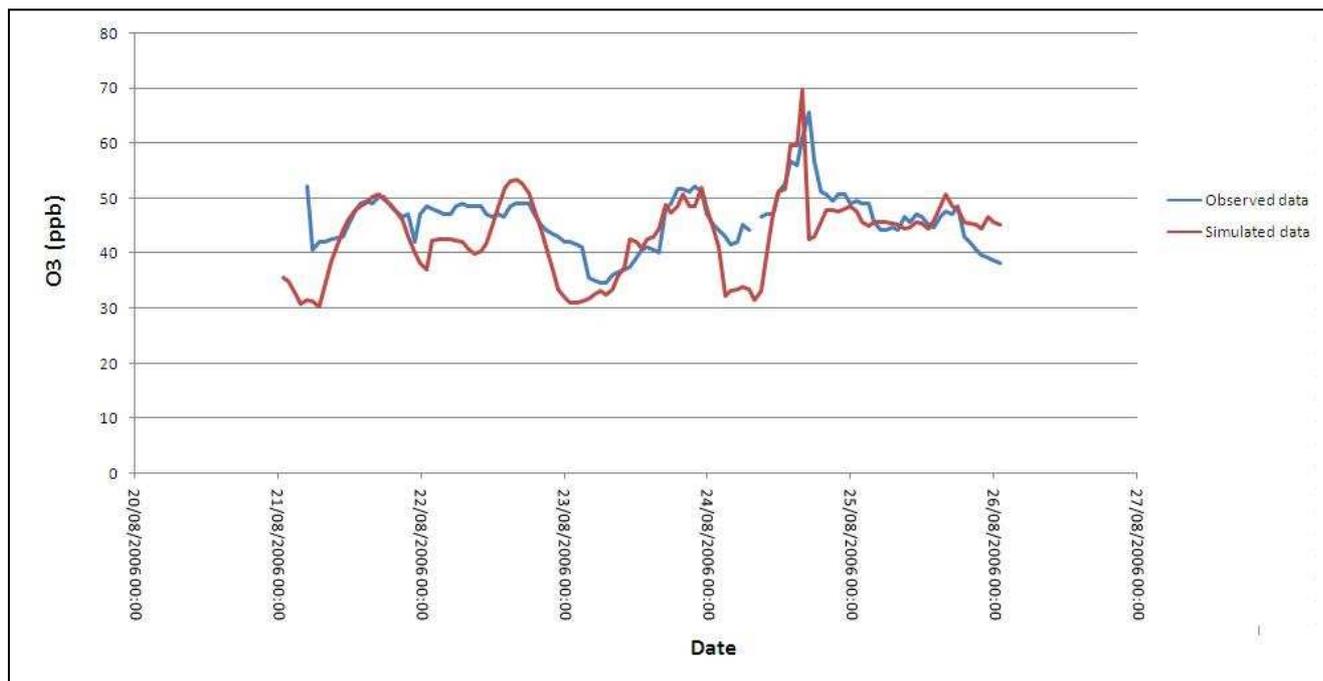


Figure V.10 : Concentrations d'Ozone simulés, sur le domaine DOM02 par le modèle CHIMERE pour le 11 Août 2006 de 10h00 UTC à 17h00UTC.

Le 12 août, cette même masse d'air est ramenée à terre et se trouve davantage polluée suite à deux jours consécutifs de pollution. La pollution photochimique est encore plus importante, avec des niveaux élevés d'ozone. La **figure V.11** montre la répartition spatiale de l'ozone simulé par le modèle CHIMERE. Cette figure montre, en date du 12/08/2006, une pointe de pollution par l'ozone avec une concentration supérieure à 90 ppb, qui est située dans la région de Oued Smar. Cet endroit est le site d'une importante zone industrielle, la plus grande décharge de déchets dans la région, mais aussi des routes d'importants trafics.



Comme le montre la **figure V.12**, par rapport aux données d'observation, le modèle CHIMERE a tendance à surestimer le pic d'ozone pour le 24 Août 2006 et à sous-estimer les concentrations au cours de la nuit. Malgré ces lacunes, les résultats de simulation sont proches des données mesurées, ce qui incite à la poursuite de la recherche afin d'améliorer la chaîne de modélisation.



**Figure V.12:** Séries temporelles des concentrations horaires d'ozone simulées par le modèle CHIMERE et mesurées par la station de surveillance de Benaknoun du 21/08/2006-00h00 au 26/08/2006-00h00.

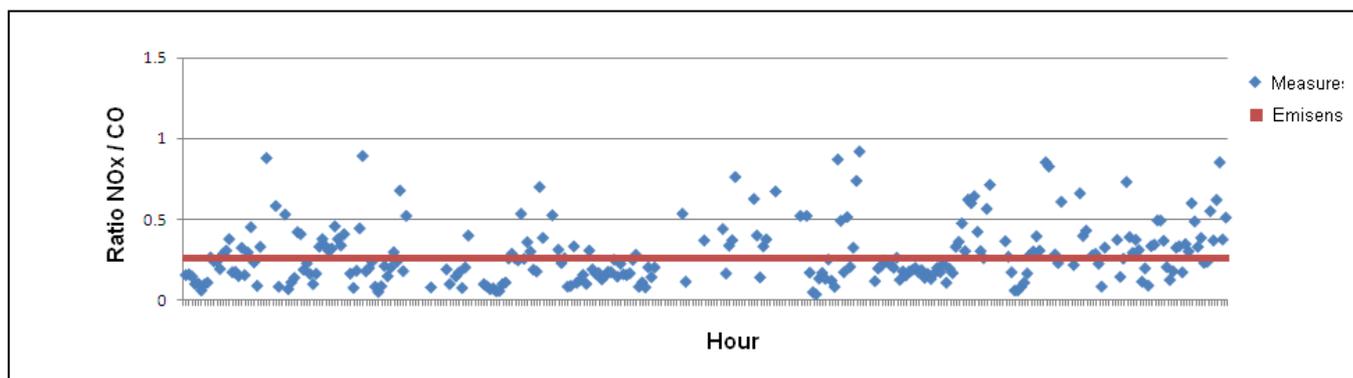
#### V.4 Validation des résultats.

Il est important d'estimer la qualité des résultats obtenus, d'une part en comparant les mesures observées et des données du cadastre concernant le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote, les polluants primaires émis principalement par le trafic routier.

Pour appréhender la validité du cadastre des émissions sur le site de la zone d'étude, nous avons comparé les ratios des concentrations de  $\text{NO}_x$  / CO observées à la station de mesure avec le taux de  $\text{NO}_x$  / CO des données d'inventaire construits avec le modèle EMISENS.

Dans les situations favorables, les ratios des concentrations ambiantes peuvent être directement comparés avec les rapports des espèces émises. Les ratios des concentrations ambiantes du CO sur le  $\text{NO}_x$  mesurées dans les zones urbaines ainsi que l'inventaire des émissions à base de combustibles indiquent que les estimations des émissions de  $\text{NO}_x$  sont raisonnablement précises (Parrish, 2006).

La **figure V.13** permet de visualiser ces rapports, qui sont relativement en bon accord, pour toutes les heures de la première quinzaine du mois de Février 2006.



**Figure V.13:** Comparaison des ratios de NOx / CO issues des mesures de concentrations avec les rapports de NOx / CO des émissions du cadastre construit avec le modèle Emisens.

La relation entre les mesures de concentration et la quantité émise par un flux de véhicules d'un polluant donné est:

$$C_{ip} = d F_{ip} + C_{ip}^0 \quad (V.1)$$

où

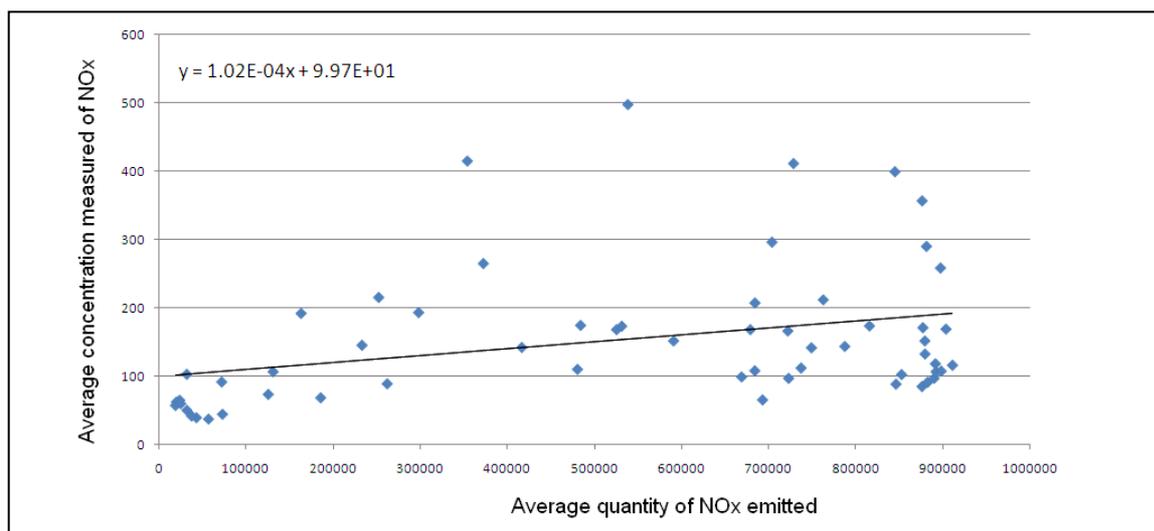
$C_{ip}$  est la concentration moyenne du polluant ip.

$d$  est le facteur de dispersion.

$F_{ip}$  est la quantité moyenne du polluant ip émise par le flux de véhicules.

$C_{ip}^0$  est la pollution de fond concernant le polluant ip.

Cette formule est représentée sur la **figure V.14**, qui montre la régression entre les valeurs des concentrations moyennes mesurées et la moyenne des émissions d'oxyde d'azote pour toutes les heures des jours ouvrables et des jours fériés de la période étudiée. Cette régression est utilisée pour déterminer le facteur de dispersion  $d$  et la fond pollution  $C_{NOx}^0$ .



**Figure V.14** : Régression des valeurs des concentrations moyennes mesurées avec celles de la moyenne des émissions d'oxyde d'azote, pour toutes les heures des jours ouvrables et des jours fériés du mois de Février 2006 pour la zone d'étude.

Nous procédons avec la même approche pour déterminer le facteur de dispersion et la pollution de fond pour le monoxyde de carbone.

On utilise la formule (V.1) pour avoir le rapport entre les oxydes d'azote avec le monoxyde de carbone. Nous avons alors la formule suivante:

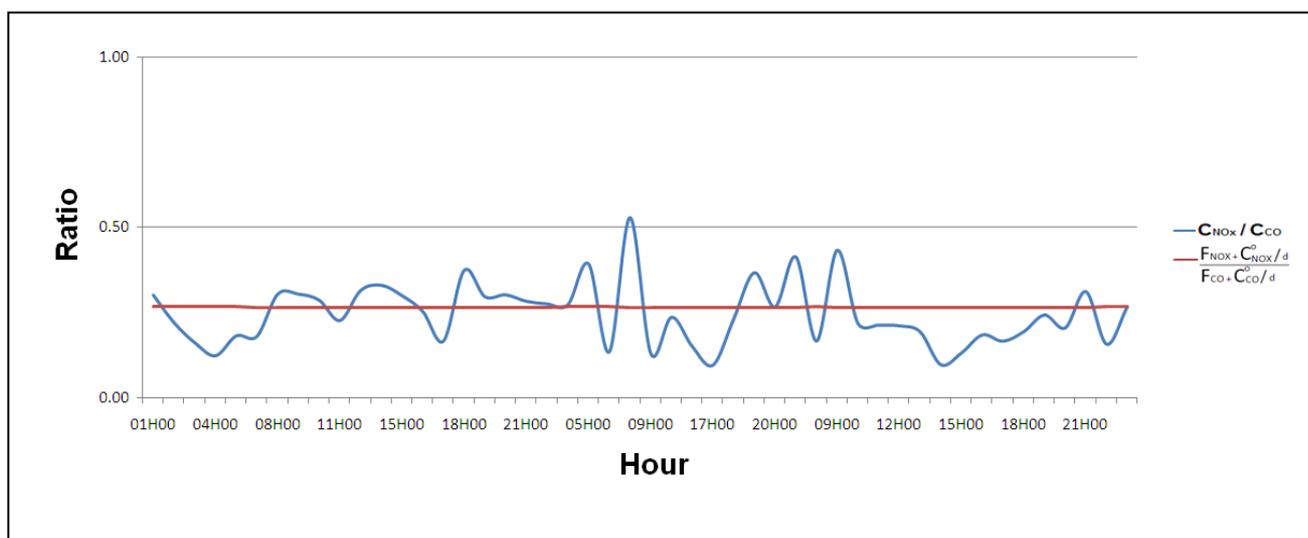
$$\frac{C_{NOx}}{C_{CO}} = \frac{d F_{NOx} + C_{NOx}^0}{d F_{CO} + C_{CO}^0} \quad (V.2)$$

Afin de valider le cadastre des émissions construites avec le modèle EMISENS, il est intéressant de comparer les ratios de NOx / CO déduit du cadastre des émissions avec les ratios de concentration calculées à partir des mesures de concentrations.

La **figure V.15** permet une comparaison des ratios  $C_{NOx} / C_{CO}$  et  $\frac{F_{NOx} + C_{NOx}^0/d}{F_{CO} + C_{CO}^0/d}$

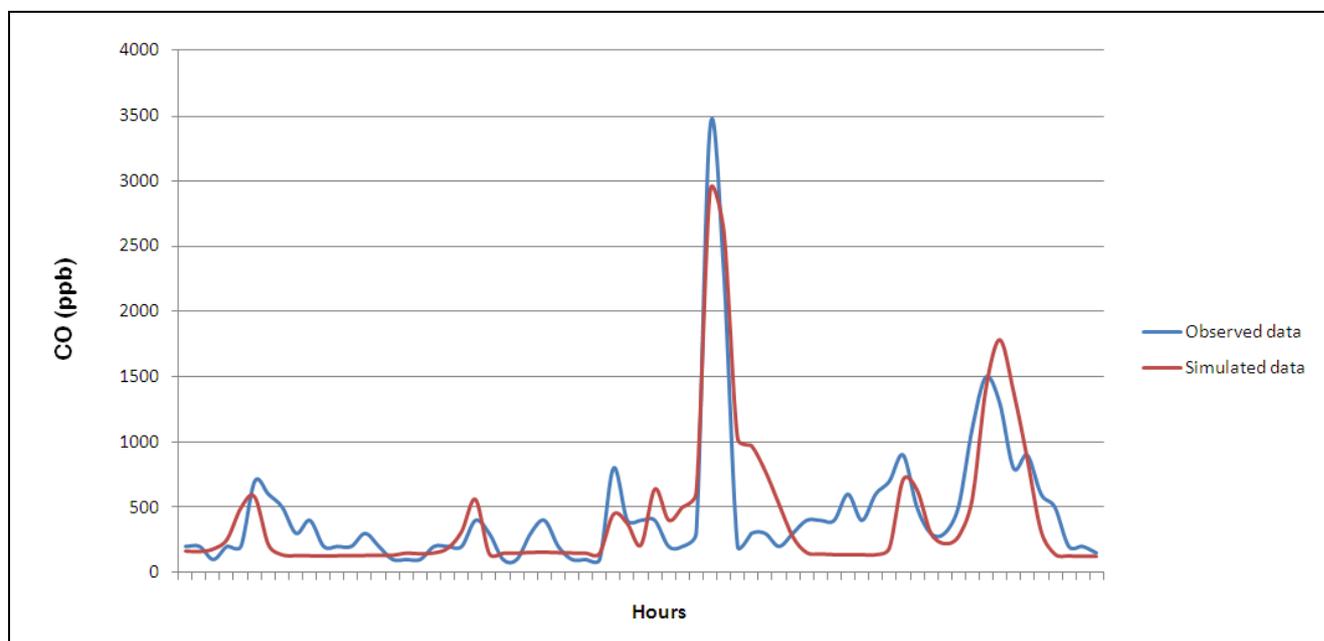
Cette figure montre que l'inventaire construit avec le modèle EMISENS, simule assez bien les jours de travail et dans une moindre mesure, les jours fériés qui étaient en 2006 jeudi et vendredi.

La surestimation par le modèle EMISENS du vendredi est due à l'utilisation des comptages sur les routes principales. Comme le montre la **figure IV.14** dans le chapitre précédent, le trafic routier diminue fortement entre 11h et 15h, mais il décline encore plus dans les petits axes routiers, qui ne figuraient pas dans les données du trafic en entrée du modèle EMISENS.



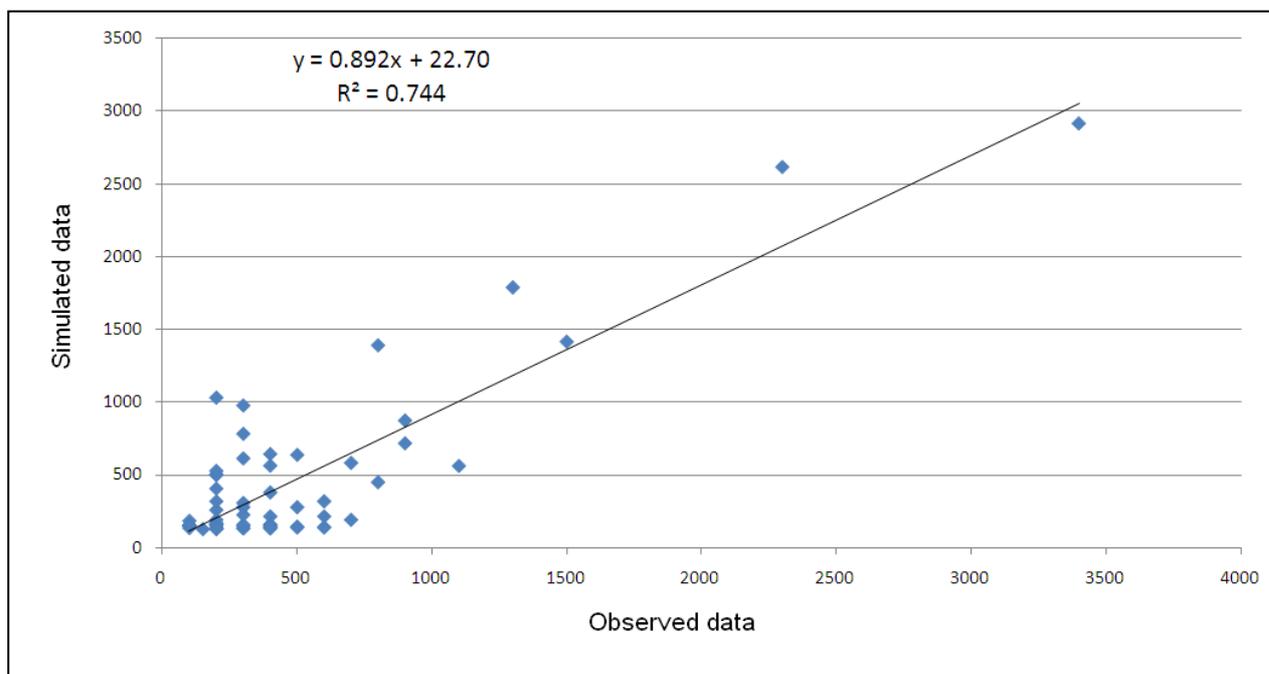
**Figure V.15:** Comparaison des ratios de NOx / CO déduit du cadastre des émissions avec des ratios de concentration calculées à partir de mesures de la concentration.

La simulation du modèle CHIMERE avec, comme données d'entrée, l'utilisation, des émissions construites avec le modèle EMISENS, nous permet de comparer les données simulées avec les données observées comme montré par la **figure V.16**, pour le monoxyde de carbone.



**Figure V.16:** Comparaison entre les données observées et les données simulées avec le modèle CHIMERE pour le monoxyde de carbone (ppb) durant les jours ouvrables de la première semaine de Février 2006.

La comparaison révèle que le modèle simule bien les pics de pollution mais présente quelques difficultés pour simuler les faibles concentrations. Le coefficient de détermination de la régression linéaire entre les données observées et simulées est 0.744 que montre la **figure V.17**. La simulation est acceptable, mais peut masquer des différences avec la réalité pouvant être significatives.



**Figure V.17** : Régression des données observées et les données simulées avec le modèle CHIMERE pour le monoxyde de carbone (ppb) durant les jours ouvrables de la première semaine de Février 2006.

## V.5 Conclusion.

Nous avons simulé la qualité de l'air dans la région d'Alger par la modélisation, d'abord, de la météorologie grâce au modèle MM5, ensuite des processus physico-chimiques avec le modèle CHIMERE, en utilisant le cadastre des émissions construit avec le modèle EMISENS, afin d'obtenir une cartographie des concentrations des polluants étudiées dans cette région.

Nous avons évalué la précision des résultats de la simulation par comparaison avec des mesures de données de surface, recueillies par les stations de l'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable, relative à l'ozone, au monoxyde de carbone et aux oxydes d'azote.

Globalement, les performances de la plate-forme de modélisation utilisée sont satisfaisantes en termes de coefficients de corrélation entre les concentrations mesurées et celles fournies, mais les résultats peuvent être encore améliorés.

La zone côtière d'Alger est caractérisée par des épisodes de pollution atmosphérique photochimique due au rayonnement solaire intense, couplée à des émissions locales et régionales et joue un rôle important sur les épisodes d'ozone tout au long de la circulation des polluants anciens en raison de la brise de mer le jour et la brise de terre la nuit. Le système de modélisation reproduit bien le cycle de l'ozone pour la période simulée, mais a des difficultés à simuler le niveau des pics d'ozone.

Nous avons validé la chaîne de modélisation, constituée des modèles EMISENS, MM5 et CHIMERE, en comparant les ratios de NO<sub>x</sub> / CO déduits de l'inventaire des émissions avec des ratios de concentration calculées à partir des simulations et des mesures de concentration. La comparaison montre que l'inventaire des émissions est meilleur pour les jours ouvrables par rapport aux jours fériés.

La qualité des inventaires des émissions peut être améliorée, notamment par l'utilisation des comptages de la circulation dans les axes de moindre importance, qui ne sont pas englobés dans cette étude. La prise en compte de ce type de routes pourrait donner de meilleurs résultats, en particulier pour les jours de repos. L'amélioration des résultats peut également être obtenue par l'utilisation de données météorologiques avec une meilleure résolution notamment les résultats du modèle ALADIN de Météo-Algérie.

Afin de tirer des conclusions définitives sur la chaîne de modélisation réalisée, il serait judicieux d'exécuter le modèle de chimie-transport sur une période beaucoup plus longue, ce qui demande une grande capacité de calcul et de stockage. Malgré cela, la chaîne de modélisation mise au point peut être utilisée, pour aider les décideurs à évaluer l'impact sur les différentes mesures et règlements à prendre ou à reconsidérer et relatifs à la vitesse urbaine, aux taux de véhicules fonctionnant au GPL ou au GNC, aux projets routiers qui sont nombreux dans cette région (2eme rocade, autoroute Est-Ouest, ...). Cette modélisation a montré que les rejets de polluants les plus importants dans la région d'Alger se trouvent à l'hyper-centre et au centre ainsi que le long des principales routes en particulier l'autoroute de l'Est et la Rcade Sud. Ainsi, il sera possible de tester et de simuler divers scénarios pour aider à la mise en œuvre des procédures de prévention des épisodes de pollution, car les sites pour réduire les niveaux de pollution peuvent être différenciés par zone géographique.

## **Conclusion générale et perspectives.**

L'histoire de la modélisation tridimensionnelle de la physico-chimie de l'atmosphère est une histoire jeune, tout au plus une vingtaine d'année. Elle avance aujourd'hui au même titre que la modélisation météorologique, en tirant partie notamment de l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs.

De nombreux modèles destinés à la recherche en physico-chimie troposphérique sont développés sous Licence Publique Générale (LPG). Ils sont ainsi accessibles via les sites internet à des chercheurs assurant la mise à jour régulière des modèles. Le libre accès aux programmes est un point fort car il permet, aux différents utilisateurs, de faire évoluer le système en permanence tout en partageant les améliorations apportées à celui-ci en contrepartie.

Tous les modèles utilisés dans cette thèse obéissent à cette philosophie coopérative qui permettent d'exploiter les connaissances et les travaux des chercheurs internationaux, mais aussi, de contribuer à ces travaux de modélisation de la pollution atmosphérique qui ne connaît ni barrière ni frontière. Tous les pays sont concernés. Pour gérer la qualité de l'air, chaque pays a besoin de connaître les émissions des polluants et leurs dispersions dans les pays voisins.

Dans cette optique, des projets internationaux sont lancés à l'effet de mieux comprendre les phénomènes influant sur la qualité de l'air. Les travaux accomplis dans cette thèse, ont contribué au projet euro-méditerranéen CHARMEX (Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment) qui a pour objectif d'évaluer l'état actuel et d'anticiper les évolutions de la pollution de l'air dans le bassin méditerranéen, de tracer les espèces gazeuses et particulaires dans la troposphère en raison du manque d'une vision intégrée de l'état de l'environnement de l'atmosphère méditerranéenne, de ses impacts régionaux, et des évolutions récentes et futures possibles.

La position géographique de l'Algérie, la rend incontournable dans toute étude sur la qualité de l'air en région méditerranéenne qui est considérée comme l'une des zones les plus sensibles du globe aux conséquences du réchauffement du climat, notamment en été, avec plus de sécheresse et plus de chaleur qui sont généralement des facteurs favorisant et aggravant la pollution atmosphérique gazeuse et particulaire.

La capitale politique et économique de l'Algérie est représentative à plus d'un titre. La région d'Alger est caractérisée par la densité du tissu industriel et du réseau routier. Cette densité est due à la concentration de l'activité humaine. D'où des émissions polluantes importantes que

nous avons inventoriées et réparties dans l'espace et le temps selon un maillage de la zone d'étude pour aboutir à un cadastre des émissions.

Les préoccupations sur l'évolution de la pollution atmosphérique à Alger portent moins aujourd'hui sur l'industrie que sur le secteur des transports. Du fait de la concentration de la population et des activités en ville, à cause du flux croissant des échanges et de l'accroissement constant du parc et de la circulation automobile. Le secteur du trafic routier est le plus difficile à appréhender car les sources sont mobiles, diverses et dont les informations doivent être exhaustives. Le modèle EMISENS, à l'approche novatrice, nous a permis de contourner l'insuffisance des données grâce à la combinaison des méthodologies top-down et bottom-up, pour construire le cadastre des émissions issues du trafic routier. Nous y avons ajouté les émissions rejetées par le secteur industriel et par l'incinération des déchets afin d'avoir un inventaire des émissions le plus complet possible, spatialement et temporellement réparti.

Ces émissions polluantes sont transportées à des distances variables par les mouvements des masses d'air et les nuages. Le phénomène de brises, dans la région d'Alger, caractérisant toute région côtière, participe encore plus au transport des polluants dans cette zone d'étude.

Pendant leur transport, les substances polluantes sont transformées, l'atmosphère fonctionnant comme une véritable usine chimique. La dispersion des polluants dans l'air résulte de nombreux facteurs. Cependant, la qualité de la dispersion influe directement sur la qualité de l'air. Si la dispersion est bonne, les concentrations peuvent rester faibles malgré des émissions importantes. Par contre, si la dispersion se fait mal, des rejets relativement limités peuvent suffire à dégrader la qualité de l'air. Après les émissions, ce qui influe sur la pollution atmosphérique, ce sont les conditions météorologiques que nous avons modélisé avec le modèle méso-échelle MM5 qui est largement utilisé dans le monde pour la recherche météorologique mais aussi pour la météorologie opérationnelle. Ce modèle prévoit et simule l'ensemble des paramètres météorologiques nécessaires au calcul de la chimie atmosphérique. Les données d'émission et les champs météorologiques alimentent le modèle déterministe CHIMERE pour la modélisation du transport, de la dispersion et de la transformation chimique des polluants. Le modèle de chimie-transport utilisé permet de calculer heure par heure, l'évolution des concentrations au voisinage du sol pour différents épisodes et pour les principaux polluants mesurés.

Nous avons ainsi constitué une plate-forme de modélisation, formée d'abord du modèle EMISENS pour générer un inventaire cohérent des émissions, ensuite du modèle MM5 pour

générer les données météorologiques de la zone d'étude et enfin du modèle CHIMERE afin de réaliser une cartographie des concentrations des polluants étudiées dans la région d'Alger. Afin de juger la pertinence des résultats obtenus, nous avons procédé à leurs comparaisons avec les mesures du réseau de surveillance de la qualité de l'air à Alger. Lors de cette première validation, les résultats de la simulation se rapprochent des données mesurées, ce qui encourage à continuer le travail pour l'amélioration de la chaîne de modélisation.

Nous avons proposé dans cette thèse une méthodologie pour autre validation en comparant les ratios de NO<sub>x</sub> / CO déduite de l'inventaire des émissions avec des ratios de concentrations, des mêmes polluants, calculées à partir des simulations et des mesures de concentrations. Cette comparaison montre que l'inventaire des émissions est meilleur pour les jours ouvrables par rapport aux jours fériés.

Afin de tirer des conclusions définitives sur la chaîne de modélisation construite, il serait nécessaire d'exécuter les modèles sur une période beaucoup plus longue. Malgré cela, la chaîne de modélisation développée peut être utilisée et adaptée à toute autre région de l'Algérie.

Les résultats de ces modèles sont des cartes de distribution de polluants qui permettent une surveillance de la pollution en terme de pronostic pour l'information par des prévisions quotidiennes du public ou en terme de diagnostic à posteriori de la pollution pour mieux cerner les phénomènes enjeux.

Les perspectives concernant la plateforme de modélisation conçue sont prometteuses. En effet, une telle étude vise non seulement à améliorer nos connaissances sur la pollution atmosphérique mais pourrait aider l'Algérie à consolider la législation en faveur de la qualité de l'air. Ajouté à cela, une carte détaillée de pollution permettrait d'indiquer les lieux où mener les efforts d'antipollution et de prévoir l'effet de l'application de différents programmes de réduction des émissions : restrictions de trafic, normes sur les véhicules ou les combustibles, limitation des émissions industrielles, etc.

Les résultats des simulations pourraient être utilisés comme aide pour l'implantation de futures stations de surveillances dans des sites stratégiques. Enfin, ils constitueraient une source d'informations de qualité facilement compréhensible pour les citoyens.

Il s'agit d'outils de prospective et d'aide à la décision pouvant être utilisés dans le cadre de la définition de politiques d'amélioration de la qualité de l'air afin de protéger l'environnement et la santé des citoyens en Algérie.

## **Références bibliographiques.**

**Abderrahim, H. (2012).** « Apport du sondeur à laser (Lidar) dans l'étude de la pollution par les aérosols ». Thèse de Doctorat. Université d'Oran.

**APPL. (2003).** « Rapport d'étape relatif au suivi et au contrôle de la pollution au niveau des unités industrielles de la Wilaya d'Alger ». Agence urbaine chargée de la protection et de la promotion du littoral Algérois (APPL), Septembre 2003.

**Aumont, B., Jaeger-Voirol, A., Martin, B., & Toupance, G. (1996).** « Tests of some reduction hypotheses made in photochemical mechanisms ». *Atmospheric Environment*, 30(12), 2061-2077.

**Baouni, T. (2008).** « Mobilité et systèmes de transport face à la croissance urbaine d'Alger ». Conférence : Les défis du développement durable des transports dans les villes des pays en développement : les bonnes solutions- Codatu XIII à Hô Chi Minh Ville (Vietnam) - 12 au 14 novembre 2008.

**Belalcazar, L. C., Clappier, A., Blond, N., Flassak, T., Eichhorn, J. (2010).** « An evaluation of the estimation of road traffic emission factors from tracer studies ». *Atmospheric Environment*, 44(31), 3814-3822.

**Belalcazar, L. C., Fuhrer, O., Ho, M. D., Zarate, E., Clappier, A. (2009).** « Estimation of road traffic emission factors from a long term tracer study ». *Atmospheric Environment*, 43(36), 5830-5837.

**Beekmann, M., Derognat, C. (2003).** « Monte Carlo uncertainty analysis of a regional-scale transport chemistry model constrained by measurements from the Atmospheric Pollution Over the Paris Area (ESQUIF) campaign ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 108(D17).

**Bessagnet, B., Hodzic, A., Vautard, R., Beekmann, M., Cheinet, S., Honoré, C., Rouil, L. (2004).** « Aerosol modeling with CHIMERE-Preliminary evaluation at the continental scale ». *Atmospheric Environment*, 38(18), 2803-2817.

**Blond, N. (2002).** « Assimilation de données photochimiques et prévision de la pollution troposphérique ». Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique X.

**Bouchlaghem, K., Nsom, B., Latrache, N. (2008).** « An Experimental Study of the Coastal Photochemical Pollution During the Breeze Diurnal Cycle in a Mediterranean Tunisian Region », *European Journal of Scientific Research*, Vol.24 No.3 , pp.387-395.

**Boughedaoui, M., Kerbachi, R., Kessali, D., Joumard, R. (2004).** « Mesure de la Pollution Plombifere dans l'air Ambient d'Alger [Measurement of Lead Pollution in the Ambient Air of Algiers] ». *Pollut. Atmos*, 181, 105-111.

**Boughedaoui, M., Joumard, R., Kerbachi, R. (2008).** « On-Board Emission Measurement of High-Loaded Light-Duty Vehicles in Algeria ». *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(1), 45-54.

**Boughedaoui, M., Chikhi, S., Driassa, N., Kerbachi, R., Joumard, R. (2009).** « Caractérisation du parc de véhicule algérien et son usage ». Ghardaïa, Algeria 16-18 February 2009, 201.

**Bouziati M., (2010),** Introduction à la santé environnementale, Edition Dar El Gharb.

**Boynard, A. (2009).** « Exploitation des observations satellitaires IASI couplées à un modèle régional pour l'amélioration de la prévision des épisodes de pollution en ozone ». Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.

**Carter, W. P. (2000).** « Implementation of the SAPRC-99 chemical mechanism into the Models-3 framework ». Report to the United States Environmental Protection Agency, January, 2000, vol. 29.

**Carter, W. P. (1990).** « A detailed mechanism for the gas-phase atmospheric reactions of organic compounds ». Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 24(3), 481-518.

**Chabane L., (2010),** « Spatial inequality in the supply of urban by bus in Algiers ». The 12th World Conference on Transport Research, WCTR2010, Lisbon, Portugal.

**Chin, M., Ginoux, P., Kinne, S., Torres, O., Holben, B. N., Duncan, B. N., Nakajima, T. (2002).** « Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sun photometer measurements ». Journal of the atmospheric sciences, 59(3).

**Cortinovis, J., Moreto, F., Yahyaoui, A., Sauvage, A., Letinois, L. (2006).** « Élaboration d'un cadastre d'émissions interrégional pour la plate-forme de modélisation de prévisions cartographiques EMERALDA ». Pollution atmosphérique, 48(189), 79-98.

**Derognat, C. (1998).** « Elaboration d'un code chimique simplifié applicable à l'étude de la pollution photooxydante en milieu urbain et rural ». Rapport de stage de master, Université Paris, 6.

**Deletraz, G. (2002).** « Géographie des risques environnementaux liés aux transports routiers en montagne. Incidences des émissions d'oxydes d'azote en vallées d'Aspe et de Biriattou (Pyrénées) ». Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour.

**Dudhia, J., Gill, D., Manning, K., Wang, W., Bruyere, C., Kelly, S., Lackey, K. (2005).** « PSU/NCAR Mesoscale modeling system. Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version, 3 ».

**François, S. (2004).** « Méthodologie d'établissement de cadastres d'émissions à l'échelle régionale: Application au cadastre ESCOMPTE et à son extension à la région PACA ». Thèse de doctorat, Université de Strasbourg 1.

**Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J. M., Holben, B., Dubovik, O., Lin, S. J. (2001).** « Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model ». Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 106(D17), 20255-20273.

**Gkatzoflias, D., Kouridis, C., Ntziachristos, L., Samaras, Z. (2007).** « COPERT 4: Computer programme to calculate emissions from road transport ». Disponible sur: <http://lat.eng.auth.gr/copert/files/tech01.pdf>.

**Grell, G. A., Dudhia, J., Stauffer, D. R. (1994).** « A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5) ».

**Hanna, A., Benjey, W. (2006).** « Special issue on model evaluation: Evaluation of urban and regional Eulerian air quality models ». *Atmospheric Environment*, 40(26), 4809-4810.

**Hauglustaine, D. A., Hourdin, F., Jourdain, L., Filiberti, M. A., Walters, S., Lamarque, J. F., Holland, E. A. (2004).** « Interactive chemistry in the Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model: Description and background tropospheric chemistry evaluation ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 109(D4).

**Ho, Q. B. (2010).** « Optimal Methodology to Generate Road Traffic Emissions for Air Quality Modeling: Application to Ho Chi Minh City ». Disponible en: [http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2010/4793/EPFL\\_TH4793.pdf](http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2010/4793/EPFL_TH4793.pdf), recuperado, vol. 25. Thèse de doctorat. EPFL.

**Ho, B. Q., Clappier, A. (2011).** « Road traffic emission inventory for air quality modelling and to evaluate the abatement strategies: a case of Ho Chi Minh City, Vietnam ». *Atmospheric Environment*, 45(21), 3584-3593.

**Hodzic, A., Vautard, R., Bessagnet, B., Lattuati, M., Moreto, F. (2005).** « Long-term urban aerosol simulation versus routine particulate matter observations ». *Atmospheric Environment*, 39(32), 5851-5864.

**IPCC. (2014).** « The IPCC's Fifth Assessment Report (AR5) ».

**JICA. (2006).** « Étude de Microzonage Sismique de la Wilaya d'Alger » Agence Japonaise de Coopération Internationale, Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.

**JORADP. (2006).** « Décret exécutif n° 06-02 du 07 janvier 2006 définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique ». *Journal Officiel*, 2006. <http://www.joradp.dz>.

**Joumard, R., Vidon, R., Pruvost, C., Tassel, P., De Soete, G. (1995).** « Évolution des émissions de polluants des voitures particulières lors du départ à froid ». *Science of the total environment*, 169(1), 185-193.

**Khatami, A., Ponche, J. L., Jabry, E., Mirabel, P. (1998).** « The air quality management of the region of Great Casablanca (Morocco). Part 1: Atmospheric emission inventory for the year 1992 ». *Science of the total environment*, 209(2), 201-216.

**Köne, A. Ç., Büke, T. (2014).** « The evaluation of the air pollution index in Turkey ». *Ecological Indicators*, 45, 350-354.

**Lacour, S., Joumard, R. (2002).** « Parc, usage et émissions des véhicules routiers en France de 1970 à 2020 ».

**Laïd, Y., Atek, M., Oudjehane, R., Filleul, L., Baough, L., Zidouni, N., Tessier, J. F. (2006).** « Impact sanitaire de la pollution de l'air par les PM<sub>10</sub> dans une ville du sud: le cas d'Alger ». *Int J Tuberc Lung Dis*, 10(12), 1406-1411.

**Lattuati, M. (1997).** « Impact des émissions européennes sur le bilan de l'ozone troposphérique à l'interface de l'Europe et de l'Atlantique nord: apport de la modélisation lagrangienne et des mesures en altitude ». Thèse de doctorat.

**Lelieveld, J., Barlas, C., Giannadaki, D., Pozzer, A. (2013).** « Model calculated global, regional and megacity premature mortality due to air pollution ». *Atmos. Chem. Phys*, 13, 7023-7037.

**Liu, H., Chan, J. C. (2002).** « An investigation of air-pollutant patterns under sea-land breezes during a severe air-pollution episode in Hong Kong ». *Atmospheric Environment*, 36(4), 591-601.

**Safar Zitoun, M., Tabti-Talamali, A. (2009).** « La mobilité urbaine dans l'agglomération d'Alger: évolutions et perspectives ». The World Bank.

**Madronich, S., Flocke, S. (1998)** « The role of solar radiation in atmospheric chemistry » . *Handbook of Environmental Chemistry*, edited by P. Boule, pp. 1-26, Springer

**Mallet, V. (2005).** « Estimation de l'incertitude et prévision d'ensemble avec un modèle de chimie transport-Application à la simulation numérique de la qualité de l'air ». Thèse de doctorat. Ecole des Ponts ParisTech).

**Mallet, V. (2008).** Prévision d'ensemble. INRIA, Université Paris Est.

**MATE. (2005).** « Rapport du Programme d'Aménagement Côtier (PAC) - Zone côtière algéroise - Lutte contre la pollution liée aux déchets solides - Phase II- Programmes de gestion ». Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

**Menut, L. (2003).** «Adjoint modeling for atmospheric pollution process sensitivity at regional scale ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 108(D17).

**Menut, L., Bessagnet, B., Khvorostyanov, D., Turquety, S., Monge, J. L., Valari, M., Vautard, R. (2011).** « Modélisation de la composition chimique de la troposphère avec CHIMERE ». *Météorologie*, (75), 23-32.

**Monteiro, A., Lopes, M., Miranda, A. I., & Borrego, C. (2005).** « Air pollution forecast in Portugal: a demand from the new air quality framework directive ». *International journal of environment and pollution*, 25(1), 4-15.

**Monteiro, A., Vautard, R., Borrego, C., Miranda, A. I. (2005).** « Long-term simulations of photo oxidant pollution over Portugal using the CHIMERE model ». *Atmospheric Environment*, 39(17), 3089-3101.

**Ntziachristos, L., Gkatzoflias, D., Kouridis, C., Mellios, G., Geivanidis, S., Samaras, Z. (2008).** « COPERT 4 ». COPERT 4 training workshop, European Environment Agency Copenhagen, Denmark, 19-20 June 2008.

**Ntziachristos, L., Samaras, Z., Gkatzoflias, D., Kouridis C. (2007).** « COPERT IV– Computer programme to calculate emissions from road transport, User manual (version 5.0)». EEA.

**OMS. (2006).** « Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre - Mise à jour mondiale 2005, Synthèse de l'évaluation des risques ». Organisation Mondiale de la Santé.

**Philippe, C. (2004).** « Analyse de la pollution atmosphérique aux échelles locale et régionale. Modélisation spatiale et temporelle à l'aide d'une méthode de scénarii épisodiques ». Thèse de doctorat, INSA de Rouen.

**Pleim, J. E., Chang, J. S., Zhang, K. (1991).** « A nested grid mesoscale atmospheric chemistry model ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 96(D2), 3065-3084.

**Ponche, J-L. (2002).** « Inventaires des émissions atmosphériques : un outil pour la gestion de la qualité de l'air ». Lettre n°13. Programme International Géosphère Biosphère-Programme Mondial de Recherches sur le Climat (PIGB-PMRC).

**Robra, J. P. (2010).** « An emissions inventory of air pollutants for the city of Bogotá, Colombia ». EPFL.

**Schmidt, H., Derognat, C., Vautard, R., Beekmann, M. (2001).** « A comparison of simulated and observed ozone mixing ratios for the summer of 1998 in Western Europe ». *Atmospheric Environment*, 35(36), 6277-6297.

**Seraghni, N. (2007).** « Mesure de la pollution particulaire et métallique dans l'air au niveau de trois sites urbains de la ville de Constantine » – Magister - Laboratoire Pollution et Traitement des Eaux (LPTE), Université Mentouri de Constantine.

**Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. (2012).** « Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change ». John Wiley & Sons.

**Simpson, D., Guenther, A., Hewitt, C. N., Steinbrecher, R. (1995).** « Biogenic emissions in Europe: 1. Estimates and uncertainties ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 100(D11), 22875-22890.

**Stockwell, W. R., Middleton, P., Chang, J. S., Tang, X. (1990).** « The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 95(D10), 16343-16367.

**Stockwell, W. R., Kirchner, F., Kuhn, M., Seefeld, S. (1997).** « A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 102(D22), 25847-25879.

**Terrenoire, E. (2009).** « Application des systèmes MM5-CHIMERE et MM5-FLEXPART à la modélisation de l'ozone et des PM<sub>10</sub> sur la région Nord-Pas-de-Calais ». Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I.

**Vautard, R., Beekmann, M., Roux, J., Gombert, D. (2000).** « Validation of a deterministic forecastin syste for the ozone concentrations over the Paris area ». by Atmos. Env.

**Vautard, R., Martin, D., Beekmann, M., Drobinski, P., Friedrich, R., Jaubertie, A., Theloke, J. (2003).** « Paris emission inventory diagnostics from ESQUIF airborne measurements and a chemistry transport model ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 108(D17).

**Vautard, R., Bessagnet, B., Chin, M., Menut, L. (2005).** « On the contribution of natural Aeolian sources to particulate matter concentrations in Europe: Testing hypotheses with a modelling approach ». *Atmospheric Environment*, 39(18), 3291-3303.

**Vernier, J-P. (2007).** « Modélisation déterministe de la pollution photochimique en région PACA – Etude de sensibilité sur la plate-forme AIRES », Rapport, Université du Sud.

**Vestreng, V. (2003).** « Review and revision. Emission data reported to CLRTAP ». MSC-W Status Report.

**Werner, S. (2009).** « Optimisation des cadastres d'émissions: estimation des incertitudes, détermination des facteurs d'émissions du " black carbon" issus du trafic routier et estimation de l'influence de l'incertitude des cadastres d'émissions sur la modélisation: Application aux cadastres Escompte et Nord-Pas-de-Calais ». Thèse de doctorat. Strasbourg.

**Wilhelm, M., Ghosh, J. K., Su, J., Cockburn, M., Jerrett, M., Ritz, B. (2011).** « Traffic-related air toxics and preterm birth: a population-based case-control study in Los Angeles county, California ». *Environ Health*, 10, 89.

**Yahi, H. (2010).** « Méthodologie de prévision de la pollution atmosphérique particulaire: vers une télédétection satellitaire ». Thèse de doctorat de l'Université du Littoral, Institut Pierre Simon Laplace.

**Zárate, E., Carlos Belalcázar, L., Clappier, A., Manzi, V., Van den Bergh, H. (2007).** « Air quality modelling over Bogota, Colombia: Combined techniques to estimate and evaluate emission inventories ». *Atmospheric Environment*, 41(29), 6302-6318.

## **Annexe I**

### **Le mécanisme chimique MELCHIOR .**

## AI.1. Introduction.

Le mécanisme chimique original appelé MELCHIOR (Modèle d'Etude Lagrangienne de la Chimie de l'Ozone à l'échelle Régionale), contient 333 réactions chimiques de 82 espèces gazeuses (Lattuati, 1997). Ce mécanisme chimique a été élaboré pour la modélisation de la pollution photo-oxydante non seulement sous conditions polluées en précurseurs d'ozone (NO<sub>x</sub> et COV) près des sources d'émission mais aussi sous conditions relativement propres. Il est basé sur le mécanisme en phase gazeuse d'EMEP (Simpson, 1995) et inclut d'importantes extensions relatives à la chimie des nitrates NO<sub>3</sub> et organiques, la dégradation des hydrocarbures biogéniques et aromatiques et la recombinaison des radicaux peroxy organiques.

## AI.2. Intégration du mécanisme MELCHIOR dans le modèle CHIMERE.

La charge de calcul de la partie chimique d'un modèle de la qualité de l'air augmente en fonction du nombre d'espèces et de réactions prises en compte. Il est important d'avoir un mécanisme chimique comportant le moins d'espèces possibles. Cependant, ce mécanisme doit tout de même représenter correctement la chimie atmosphérique (Philippe, 2004).

Afin de réduire le temps de calcul, le mécanisme utilisé dans CHIMERE est une version réduite de MELCHIOR, suivant le concept "d'opérateurs chimiques" (Carter, 1990). Cette version contient 44 espèces chimiques condensées et 116 réactions chimiques.

Les réactions de photolyse prennent en compte le rayonnement actinique. (Boynard, 2009)

### AI.2.1. Les espèces chimiques du mécanisme chimique Melchior.

Les espèces chimiques prises en considération dans le modèle CHIMERE sont des espèces inorganiques, hydrocarbures, carbonées, organiques nitrates

Tableau AI.1 : Espèces inorganiques de Melchior

Espèces inorganiques					
O <sub>3</sub> <i>ozone</i>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <i>Hydrogen peroxide</i>	OH <i>Hydroxy radical</i>	HO <sub>2</sub> <i>Hydroperoxy radical</i>	NO <i>Nitric oxide</i>	NO <sub>2</sub> <i>Nitrogen dioxide</i>
NO <sub>3</sub> <i>Nitrogen trioxide</i>	N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <i>Dinitrogen pentoxide</i>	HONO <i>Nitrous acide</i>	HNO <sub>3</sub> <i>Nitric acide</i>	CO <i>Carbon monoxide</i>	SO <sub>2</sub> <i>Sulfur dioxide</i>

**Tableau AI.2 : Espèces hydrocarbures de Melchior**

Espèces hydrocarbures			
CH <sub>4</sub> <i>methane</i>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> <i>ethane</i>	NC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> <i>n-butane</i>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <i>ethene</i>
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> <i>propene</i>	OXYL <i>o-xylene</i>	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> <i>isoprene</i>	APINEN <i>α-pinene</i>

**Tableau AI.3 : Espèces carbonées de Melchior**

Espèces carbonées			
HCHO <i>formaldehyde</i>	CH <sub>3</sub> CHO <i>acetaldehyde</i>	CH <sub>3</sub> COE <i>Methyl ethyl ketone</i>	GLYOX <i>glyoxal</i>
MGLYOX <i>Methyl glyoxal</i>	CH <sub>3</sub> COY <i>Dimethyl glyoxal</i>	MEMALD <i>Unsaturated dicarbonyls</i>	MVK <i>Methyl vinyl ketone</i>
MAC <i>meihacroleine</i>			

**Tableau AI.4 : Espèces organiques nitrates de Melchior**

Espèces organiques nitrates		
PAN <i>Peroxyacetyl nitrate</i>	CARNIT <i>Nitrate carbonyl taken as α-nitrooxy acetone</i>	ISNI <i>Unsaturated nitrate from isoprene degradation</i>

**Tableau AI.5 : Espèces organiques peroxides de Melchior**

Espèces organiques peroxides	
CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H <i>methyl hydroperoxide</i>	PAA <i>peroxy acetyl acid</i>

**Tableau AI.6 : Espèces organiques (per) oxy radicaux de Melchior**

Espèces (per)oxy radicaux	
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> <i>methyl peroxy radical</i>	CH <sub>3</sub> COO <i>peroxy acetyl radical</i>

**AI.2.2. Les opérateurs du mécanisme chimique Melchior.****Tableau AI.7 : Les opérateurs utilisés dans le mécanisme chimique Melchior**

Opérateurs			
ORO <sub>2</sub> <i>Représente les peroxyde radicaux créés par OH sur C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, NC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, OXYL, CH<sub>3</sub>COE, MEMALD et MVK</i>	OROOH <i>Représente les peroxydes organiques provenant des réactions ORO<sub>2</sub>+HO<sub>2</sub></i>	ORO <sub>2</sub> b <i>Représente les radicaux peroxydes produits par C<sub>5</sub>H<sub>8</sub> et APINEN+OH</i>	OROOHb <i>Représente les peroxydes organiques biogéniques de ORO<sub>2</sub>b+HO<sub>2</sub> et ORO<sub>2</sub>b+ORO<sub>2</sub>b</i>
ORCO <sub>3</sub> <i>Représente les radicaux peroxydes produits par MACR+OH et MEMALD photoïyse</i>	OPAN <i>Représente les composants homologues à PAN</i>	ORCO <sub>3</sub> H <i>Représente les peroxydes organiques de ORCO<sub>3</sub>+HO<sub>2</sub></i>	ORO <sub>2</sub> NI <i>Représente les radicaux peroxydes nitrates organiques de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>, APINEN avec NO<sub>3</sub> et de ISNI avec OH</i>

**AI.2.3. Les réactions chimiques du mécanisme chimique Melchior.**

Les réactions chimiques utilisées dans le mécanisme chimique Melchior sont de différentes sortes : les réactions inorganiques, la chimie des SO<sub>x</sub>, la chimie des COV biogéniques, celle des ORO<sub>2</sub>, des PAN, des nitrates, des hydrocarbures oxydés par OH, des carbonyles et peroxydes oxydés par OH, des hydrocarbures et aldéhydes oxydés par NO<sub>3</sub>, des hydrocarbures insaturés oxydés par O<sub>3</sub>, de conversion des radicaux organiques, de recombinaison des radicaux organiques, des nitrates organiques et pernitrates, et enfin les réactions photolytiques. L'ensemble de ces réactions sont présentées dans les tableaux suivants.

**Tableau AI.8 :** Les réactions inorganiques du mécanisme chimique Melchior.

<b>Réaction de chimie inorganique</b>			
O <sub>3</sub>	+	NO	→ NO <sub>2</sub>
O <sub>3</sub>	+	NO <sub>2</sub>	→ NO <sub>3</sub>
O <sub>3</sub>	+	OH	→ HO <sub>2</sub>
O <sub>3</sub>	+	HO <sub>2</sub>	→ OH
NO	+	HO <sub>2</sub>	→ NO <sub>2</sub> + OH
HO <sub>2</sub>	+	OH	→ H <sub>2</sub> O
OH	+	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	→ HO <sub>2</sub>
HNO <sub>3</sub>	+	OH	→ NO <sub>3</sub>
CO	+	OH	→ HO <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>
HO <sub>2</sub>	+	HO <sub>2</sub>	→ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
HO <sub>2</sub>	+	HO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	→ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
NO <sub>3</sub>	+	NO	→ 2 NO <sub>2</sub>
NO <sub>2</sub>	+	NO <sub>3</sub>	→ NO + NO <sub>2</sub>
HONO	+	OH	→ NO <sub>2</sub>
NO <sub>3</sub>	+	HO <sub>2</sub>	→ OH + NO <sub>2</sub>
NO <sub>3</sub>	+	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	→ HO <sub>2</sub> + HNO <sub>3</sub>
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	+	H <sub>2</sub> O	→ 2 HNO <sub>3</sub>
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	+	2 H <sub>2</sub> O	→ 2 HNO <sub>3</sub>
NO <sub>2</sub>	+	OH + M	→ HNO <sub>3</sub>
NO <sub>2</sub>	+	NO <sub>3</sub> + M	→ N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	+	M	→ NO <sub>3</sub> + NO <sub>2</sub>
NO	+	OH + M	→ HONO

**Tableau AI.9** : Les réactions la chimie des SOx.

<b>Réaction de la chimie des SOx</b>				
SO <sub>2</sub>	+	OH + M	→	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + HO <sub>2</sub>
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	+	SO <sub>2</sub>	→	HO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + HCHO

**Tableau AI.10** : Les réactions de la chimie des COV biogéniques

<b>Réaction des opérateurs des COV biogéniques</b>				
ORO <sub>2</sub> b	+	NO	→	0.86 NO <sub>2</sub> + 0.78 HO <sub>2</sub> + 0.14 ISNI
ORO <sub>2</sub> b	+	HO <sub>2</sub>	→	ORO <sub>2</sub> Hb
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	+	ORO <sub>2</sub> b	→	0.8 HO <sub>2</sub> + 0.5 HCHO
CH <sub>3</sub> COO	+	ORO <sub>2</sub> b	→	0.5 HCHO + 1.5 HO <sub>2</sub> + 0.7 CO <sub>2</sub>
ORO <sub>2</sub> b	+	NO <sub>3</sub>	→	HO <sub>2</sub> + NO <sub>2</sub>
ORO <sub>2</sub> Hb	+	OH	→	OH

**Tableau AI.11** : Les réactions de la chimie des ORO<sub>2</sub>

<b>Réaction des opérateurs des ORO<sub>2</sub></b>				
ORO <sub>2</sub>	+	HO <sub>2</sub>	→	ORO <sub>2</sub> H
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	+	ORO <sub>2</sub>	→	0.65 HCHO + 0.8 HO <sub>2</sub> + 0.35 CH <sub>3</sub> OH
CH <sub>3</sub> COO	+	ORO <sub>2</sub>	→	0.8 CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> + 0.8 CO <sub>2</sub> + 0.8 HO <sub>2</sub>
ORROH	+	OH	→	0.8 OH + 0.2 ORO <sub>2</sub>
ORO <sub>2</sub>	+	NO	→	NO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub>
ORO <sub>2</sub>	+	ORO <sub>2</sub>	→	1.3 HO <sub>2</sub>
ORO <sub>2</sub>	+	NO <sub>3</sub>	→	NO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub>

**Tableau AI.12** : Les réactions de la chimie des PAN.

<b>Réaction des opérateurs PAN</b>			
MAC	+	OH	→ 0.5 CH <sub>3</sub> COE + 0.5 CO <sub>2</sub> + 0.5 ORCO <sub>3</sub>
ORCO <sub>3</sub>	+	HO <sub>2</sub>	→ <b>ORCO<sub>3</sub>H</b>
ORCO <sub>3</sub>	+	CH <sub>3</sub> CO O	→ CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub>
ORCO <sub>3</sub>	+	CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	→ HCHO + 0.5 HO <sub>2</sub>
OPAN	+	OH	→ NO <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub>
ORCO <sub>3</sub>	+	NO	→ NO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub>
ORCO <sub>3</sub>	+	NO <sub>3</sub>	→ NO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub>
ORCO <sub>3</sub> H	+	HO <sub>2</sub>	→ 0.2 ORCO <sub>3</sub>
ORCO <sub>3</sub>	+	NO <sub>2</sub> + M	→ OPAN
OPAN	+	M	→ ORCO <sub>3</sub> + NO <sub>2</sub>

**Tableau AI.13** : Les réactions de la chimie des nitrates.

<b>Réaction des opérateurs nitrates</b>			
APINEN	+	NO <sub>3</sub>	→ CH <sub>3</sub> CHO + CH <sub>3</sub> COE + ORO <sub>2</sub> NI
ORO <sub>2</sub> NI	+	HO <sub>2</sub>	→
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	+	NO <sub>3</sub>	→ 0.5 CARNIT + HCHO + ORO <sub>2</sub> NI
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	+	NO <sub>3</sub>	→ 0.5 CARNIT + 1.5 HCHO + 0.5 CH <sub>3</sub> CHO + 0.5 HO <sub>2</sub> + ORO <sub>2</sub> NI
ISNI	+	OH	→ ORO <sub>2</sub> NI + 0.95 CH <sub>3</sub> CHO + 0.475 CH <sub>3</sub> COE + 0.475 MGLYOX + 0.05 ISNI + 0.05 HO <sub>2</sub>
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	+	NO <sub>3</sub>	→ ORO <sub>2</sub> NI + 0.85 ISNI + 0.1 MAC + 0.05 MVK + 0.15 HCHO + 0.8 HO <sub>2</sub>
ORO <sub>2</sub> NI	+	NO	→ 1.5 NO <sub>2</sub>
ORO <sub>2</sub> NI	+	NO <sub>3</sub>	→ 1.5 NO <sub>2</sub>

**Tableau AI.14** : Les réactions de la chimie des hydrocarbures oxydés par OH.

<b>Réaction hydrocarbures oxydés par OH</b>			
CH <sub>4</sub>	+	OH	→ CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	+	OH	→ CH <sub>3</sub> CHO + ORO <sub>2</sub>
NC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	+	OH	→ 0.9 CH <sub>3</sub> COE + 0.1 CH <sub>3</sub> CHO + 0.1 CH <sub>3</sub> COO + 0.9 ORO <sub>2</sub>
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	+	OH	→ 0.32 MAC + 0.42 MVK + 0.74 HCHO + ORO <sub>2</sub> b
APINEN	+	OH	0.8 CH <sub>3</sub> CHO + 0.8 CH <sub>3</sub> COE + ORO <sub>2</sub> b
<hr/>			
OXYL	+	OH <sub>3</sub>	→ MEMALD + MGLYOX + ORO <sub>2</sub>
<hr/>			
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	+	OH + M	→ 2 HCHO + ORO <sub>2</sub>
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	+	OH + M	→ HCHO + CH <sub>3</sub> CHO + ORO <sub>2</sub>

**Tableau AI.15** : Les réactions de la chimie des carbonyles et peroxydes oxydés par OH.

<b>Réaction carbonyles et peroxydes oxydés par OH</b>			
HCHO	+	OH	→ CO + HO <sub>2</sub>
CH <sub>3</sub> CHO	+	OH	→ CH <sub>3</sub> COO
CH <sub>3</sub> COE	+	OH	→ CH <sub>3</sub> COY + ORO <sub>2</sub>
MVK	+	OH	→ 0.266 MGLYOX + 0.266 HCHO + 0.684 CH <sub>3</sub> CHO + 0.684 CH <sub>3</sub> COO + 0.05 ISNI + 0.95 ORO <sub>2</sub>
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> H	+	OH	→ CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>
PPA	+	OH	→ CH <sub>3</sub> COO
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> H	+	OH	→ HCHO + OH
MEMALD	+	OH	→ GLYOX + MGLYOX + ORO <sub>2</sub>
GLYOX	+	OH	→ 2 CO + HO <sub>2</sub>
MGLYOX	+	OH	→ CH <sub>3</sub> COO + CO

**Tableau AI.16** : Les réactions de la chimie des hydrocarbures et aldéhydes oxydés par NO<sub>3</sub>.

<b>Réactions hydrocarbures et aldéhydes oxydés par NO<sub>3</sub></b>			
HCHO	+	NO <sub>3</sub>	→ CO + HNO <sub>3</sub> + HO <sub>2</sub>
CH <sub>3</sub> CHO	+	NO <sub>3</sub>	→ CH <sub>3</sub> COO + HNO <sub>3</sub>
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	+	NO <sub>3</sub>	→ HCHO + HO <sub>2</sub> + NO <sub>2</sub>
CH <sub>3</sub> COO	+	NO <sub>3</sub>	→ CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> + NO <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>

**Tableau AI.17** : Les réactions de la chimie des hydrocarbures insaturés oxydés par O<sub>3</sub>.

<b>Réactions des hydrocarbures insaturés oxydés par O<sub>3</sub></b>			
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	+	O <sub>3</sub>	→ HCHO + 0.12 HO <sub>2</sub> + 0.13 H <sub>2</sub> + 0.44 CO
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	+	O <sub>3</sub>	→ 0.53 HCHO + 0.5 CH <sub>3</sub> CHO + 0.31 CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> + 0.28 HO <sub>2</sub> + 0.15 OH + 0.065 H <sub>2</sub> + 0.4 CO + 0.7 CH <sub>4</sub>
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	+	O <sub>3</sub>	→ 0.67 MAC + 0.26 MVK + 0.55 OH + 0.07 C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> + 0.8 HCHO + 0.06 HO <sub>2</sub> + 0.05 CO + 0.3 O <sub>3</sub>
MAC	+	O <sub>3</sub>	→ 0.8 MGLYOX + 0.7 HCHO + 0.215 OH + 0.275 HO <sub>2</sub> + 0.2 CO + 0.2 O <sub>3</sub>
MVK	+	O <sub>3</sub>	→ 0.82 MGLYOX + 0.8 HCHO + 0.04 CH <sub>3</sub> CHO + 0.08 OH + 0.06 HO <sub>2</sub> + 0.05 CO + 0.2 O <sub>3</sub>
APINEN	+	O <sub>3</sub>	→ 1.27 CH <sub>3</sub> CHO + 0.53 CH <sub>3</sub> COE + 0.14 CO + 0.62 ORO <sub>2</sub> + 0.42 HCHO + 0.85 OH + 0. HO <sub>2</sub>

**Tableau AI.18** : Les réactions de conversion des radicaux organiques

<b>Réactions de conversion des radicaux organiques</b>			
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	+	NO	→ HCHO + NO <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub>
CH <sub>3</sub> COO	+	NO	→ CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> + NO <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>

**Tableau AI.19** : Les réactions de recombinaison des radicaux organiques.

<b>Réactions de recombinaison des radicaux organiques</b>			
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	+	HO <sub>2</sub>	→ CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> H
CH <sub>3</sub> COO	+	HO <sub>2</sub>	→ 0.67 PPA + 0.33 O <sub>3</sub>
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	+	CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	→ 1.35 HCHO + 0.7 HO <sub>2</sub>
CH <sub>3</sub> COO	+	CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	→ 0.5 CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> + 0.5 CO <sub>2</sub> + HCHO + 0.5 HO <sub>2</sub>
CH <sub>3</sub> COO	+	CH <sub>3</sub> COO	→ 2 CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> + 2 CO <sub>2</sub>

**Tableau AI.20** : Les réactions des nitrates organiques et pernitrites

<b>Réactions des nitrates organiques et pernitrites</b>			
CH <sub>3</sub> COO	+	NO <sub>2</sub>	→ PAN
		M	
PAN	+	M	→ CH <sub>3</sub> COO + NO <sub>2</sub>
PAN	+	OH	→ HCHO + NO <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub>
CARNIT	+	OH	→ CH <sub>3</sub> CHO + CO + NO <sub>2</sub>

**Tableau AI.21** : Les réactions photolytiques..

<b>Réactions photolytiques</b>			
O <sub>3</sub>	+	Hv	→ 2 OH
NO <sub>2</sub>	+	Hv	→ NO + O <sub>3</sub>
NO <sub>3</sub>	+	Hv	→ NO
NO <sub>3</sub>	+	Hv	→ NO <sub>2</sub> + O <sub>3</sub>
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	+	Hv	→ 2 OH
HNO <sub>3</sub>	+	Hv	→ NO <sub>2</sub> + OH
HONO	+	Hv	→ NO + OH
HCHO	+	Hv	→ 2 HO <sub>2</sub> + CO
HCHO	+	Hv	→ CO + H <sub>2</sub>
CH <sub>3</sub> CHO	+	Hv	→ CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> + HO <sub>2</sub> + CO
CH <sub>3</sub> COY	+	Hv	→ 2 CH <sub>3</sub> COO
MGLYOX	+	Hv	→ CH <sub>3</sub> COO + HO <sub>2</sub> + CO
GLYOX		Hv	→ 0.6 HO <sub>2</sub>   2 CO   1.4 H <sub>2</sub>
MEMALD		Hv	→ 0.5 MVK   0.5 MALEIC   0.5 ORCO <sub>3</sub>   0.5 HCHO   0.5 HO <sub>2</sub>
CH <sub>3</sub> COE	+	Hv	→ CH <sub>3</sub> COO + CH <sub>3</sub> CHO + ORO <sub>2</sub>
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	+	Hv	→ NO <sub>2</sub> + NO <sub>3</sub>
CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> H	+	Hv	→ HCHO + OH + HO <sub>2</sub>
PPA	+	Hv	→ CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> + OH
PAN	+	Hv	→ CH <sub>3</sub> COO + NO <sub>2</sub>
ORCO <sub>3</sub> H	+	Hv	→ OH + HO <sub>2</sub>
OROOH	+	Hv	→ OH + HO <sub>2</sub>
OROOHb	+	Hv	→ OH + HO <sub>2</sub>

## **Annexe II**

### **Les variables du modèle météorologique MM5.**

Nom de la variable	Description	Dimension	Unité
U	Vent (composante U)	3	m/s
V	Vent (composante V)	3	m/s
T	Température	3	K
Q	Humidité spécifique	3	kg/kg
CLW	Humidité spécifique dans les nuages	3	kg/kg
RNW	Humidité spécifique de l'eau	3	kg/kg
ICE	Glace	3	kg/kg
SNOW	Neige	3	kg/kg
GRAUPEL	Neige roulée	3	kg/kg
RAD TEND	Pluie	3	K/DAY
W	Vent (composante W)	3	m/s
PP	Tendance pression	3	Pa
PSTARCRS	Pression de départ	2	Pa
GROUND T	température au sol	2	K
RAIN CON	précipitation convective	2	cm
RAIN NON	précipitation non-convective	2	cm
TERRAIN	altitude	2	m
MAPFACCR	facteur d'échelle	2	(sans unité)
MAPFACDT	facteur	2	(sans unité)
CORIOLIS	paramètre de Coriolis	2	1/s
RES TEMP	température du substrat	2	K
LATITCRS	latitude	2	Degré
LONGICRS	longitude	2	Degré
LAND USE	catégorie du terrain	2	category
TSEASF	température surface de la mer	2	K
PBL HGT	Hauteur de la CLA	2	m
REGIME	régime de la CLA utilisé	2	(sans unité)
SHFLUX	Flux courtes longueur d'onde (desc)	2	W/m <sup>2</sup>
LHFLUX	Flux longues longueur d'onde (desc)	2	W/m <sup>2</sup>
UST	Vitesse de friction	2	m/s
SWDOWN	Flux courtes longueurs d'ondes (asc)	2	W/m <sup>2</sup>
LWDOWN	Flux longues longueurs d'ondes (asc)	2	W/m <sup>2</sup>
SWOUT	Flux courtes longueurs d'ondes (desc)	2	W/m <sup>2</sup>
LWOUT	Flux longues longueurs d'ondes (desc)	2	W/m <sup>2</sup>

Nom de la variable	Description	Dimension	Unité
SOIL T 1	Température dans le sol à 10 cm	2	K
SOIL T 2	Température dans le sol à 20 cm	2	K
SOIL T 3	Température dans le sol à 100 cm	2	K
SOIL T 4	Température dans le sol à 200 cm	2	K
T2	Température dans l'air à 2m	2	K
Q2	Humidité spécifique	2	kg/kg
U10	Vitesse du vent zonal à 10 m	2	m/s
V10	Vitesse du vent meridien à 10 m	2	m/s
ALBD	Albedo	2	(%)
SLMO	Humidité du sol disponible	2	fraction
SFEM	Emission de la surface	2	fraction
SFZ0	Rugosité	2	cm
THERIN	Inertie thermique de la surface	2	cal cm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> s <sup>1/2</sup>
SFHC	Capacité thermique du sol	2	J m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
SCFX	Effet de la couverture de neige	1	fraction
SIGMAH	Niveau sigma	1	sigma

## **Annexe III**

### **Les variables du modèle CHIMERE sous le format NetCDF.**

### AIII.1 Les variables concernant les émissions sous le format NetCDF.

NcFileName	EMI_ALG01.08.s.nc
------------	-------------------

Global Attributes Name	NcType	Value
Title	NC_CHAR	"CHIMERE SUITE"
Sub-title	NC_CHAR	"Hourly emission for species"
Chimere_type	NC_CHAR	"EMISSIONS"
Generating_process	NC_CHAR	"Generated by sectoremis"
Conventions	NC_CHAR	"None"
Domain	NC_CHAR	"ALG01"
Emission_version	NC_CHAR	"200706"

Dimensions Name	Value
Time	24
west_east	26
south_north	18
bottom_top	6
type_day	3
SpStrLen	23
DateStrLen	19
Species	30

Variables Name	NcType	Dimension	Attribute Name	Attribute NcType	Attribute Value
Times	NC_CHAR	Time x DateStrLen			
species	NC_CHAR	Species x SpStrLen			
lon	NC_FLOAT	south_north x west_east	units	NC_CHAR	"degrees_east"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"Longitude"
lat	NC_FLOAT	south_north x west_east	units	NC_CHAR	"degrees_north"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"Latitude"
EMEP_levels	NC_FLOAT	bottom_top	units	NC_CHAR	"meters"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"Cut_off_heights_for_redistribution"
BCAR_fin	NC_FLOAT	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"molecule/cm2/s"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"BCAR_fin Emission"
OCAR_fin	NC_FLOAT	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"molecule/cm2/s"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"OCAR_fin Emission"
BaP_fin	NC_FLOAT	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"molecule/cm2/s"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"BaP_fin Emission"
BbF_fin	NC_FLOAT	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"molecule/cm2/s"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"BbF_fin Emission"
BkF_fin	NC_FLOAT	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"molecule/cm2/s"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"BkF_fin Emission"
PPM_big	NC_FLOAT	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"molecule/cm2/s"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"PPM_big Emission"
PPM_coa	NC_FLOAT	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"molecule/cm2/s"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"PPM_coa Emission"
PPM_fin	NC_FLOAT	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"molecule/cm2/s"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"PPM_fin Emission"
NO	NC_FLOAT	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"molecule/cm2/s"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"NO Emission"
NO2	NC_FLOAT	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"molecule/cm2/s"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"NO2 Emission"
HONO	NC_FLOAT	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"molecule/cm2/s"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"HONO Emission"

Variables Name	NcType	Dimension	Attribute Name	Attribute NcType	Attribute Value
CO -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "CO Emission"
SO2 -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "SO2 Emission"
H2SO4_fin -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "H2SO4_fin Emission"
NH3 -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "NH3 Emission"
CH4 -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "CH4 Emission"
TOL -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "TOL Emission"
TMB -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "TMB Emission"
C2H6 -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "C2H6 Emission"
NC4H10 -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "NC4H10 Emission"
C2H4 -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "C2H4 Emission"
C3H6 -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "C3H6 Emission"
APINEN -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "APINEN Emission"
C5H8 -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "C5H8 Emission"
OXYL -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "OXYL Emission"
HCHO -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "HCHO Emission"
CH3CHO -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "CH3CHO Emission"
CH3COE -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "CH3COE Emission"
CH3OH -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "CH3OH Emission"
C2H5OH -	NC_FLOAT -	Time x type_day x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm2/s" "C2H5OH Emission"

## AIII.2 Les variables concernant les sorties sous le format NetCDF.

<b>NcFileName</b>	out.20060811_20060815_ALG01.nc
-------------------	--------------------------------

Global Attributes Name	NcType	Value
Title	NC_CHAR	"CHIMERE SUITE"
Sub-title	NC_CHAR	"Hourly output concentrations file"
Chimere_type	NC_CHAR	"out"
Generating_process	NC_CHAR	"Generated by chimere"
Conventions	NC_CHAR	"None"
Domain	NC_CHAR	"ALG01"
Chimere_version	NC_CHAR	"V200709C"

Dimensions Name	Value
Time	1
DateStrLen	19
west_east	23
south_north	18
bottom_top	8
vcoord_dim	8
number_of_cut_off_diameters	9

Variables Name	NcType	Dimension	Attribute Name	Attribute NcType	Attribute Value
lon	NC_FLOAT	south_north x west_east	units	NC_CHAR	"degrees_east"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"Longitude"
lat	NC_FLOAT	south_north x west_east	units	NC_CHAR	"degrees_north"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"Latitude"
a_vcoord	NC_FLOAT	vcoord_dim	units	NC_CHAR	"no_units"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"A_sigma_coefficient"
b_vcoord	NC_FLOAT	vcoord_dim	units	NC_CHAR	"no_units"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"B_sigma_coefficient"
cut_off_diameters	NC_FLOAT	number_of_cut_off_diameters	units	NC_CHAR	"meters"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"cut_off_diameters"
Times	NC_CHAR	Time x DateStrLen			
O3	NC_FLOAT	Time x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"ppb vol"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"O3 Concentration"
NO2	NC_FLOAT	Time x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"ppb vol"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"NO2 Concentration"
NO	NC_FLOAT	Time x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"ppb vol"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"NO Concentration"
PAN	NC_FLOAT	Time x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"ppb vol"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"PAN Concentration"
HNO3	NC_FLOAT	Time x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"ppb vol"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"HNO3 Concentration"
H2O2	NC_FLOAT	Time x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"ppb vol"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"H2O2 Concentration"
HONO	NC_FLOAT	Time x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"ppb vol"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"HONO Concentration"
SO2	NC_FLOAT	Time x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"ppb vol"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"SO2 Concentration"
pBCAR	NC_FLOAT	Time x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"ug/m3"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"pBCAR Concentration"
pDUST	NC_FLOAT	Time x bottom_top x south_north x west_east	units	NC_CHAR	"ug/m3"
-	-	-	long_name	NC_CHAR	"pDUST Concentration"

Variables Name	NcType	Dimension	Attribute Name	Attribute NcType	Attribute Value
pOCAR -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "pOCAR Concentration"
pPPM -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "pPPM Concentration"
pSALT -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "pSALT Concentration"
pAnA1D -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "pAnA1D Concentration"
pAnBmP -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "pAnBmP Concentration"
pBiA1D -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "pBiA1D Concentration"
pBiBmP -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "pBiBmP Concentration"
pH2SO4 -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "pH2SO4 Concentration"
pHNO3 -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "pHNO3 Concentration"
pNH3 -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "pNH3 Concentration"
pWATER -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "pWATER Concentration"
PM25 -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "PM25 Concentration"
PM25bio -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "PM25bio Concentration"
PM25ant -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "PM25ant Concentration"
PM10 -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "PM10 Concentration"
PM10bio -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "PM10bio Concentration"
PM10ant -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"ug/m3" "PM10ant Concentration"
hlay -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"meter" "Layer top altitude"
airm -	NC_FLOAT -	Time x bottom_top x south_north x west_east -	units long_name	NC_CHAR NC_CHAR	"molecule/cm**3" "Air density"

## **Annexe IV**

# **SAMASAFIA, le réseau de surveillance de la qualité de l'air à Alger.**

### **AIV.1 Présentation.**

L'organisme public SAMASAFIA d'Alger qui appartient à l'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable, est la structure responsable de surveillance de la qualité de l'air à Alger.

Les missions de SAMASAFIA d'Alger se définissent en 5 axes :

- Surveiller la qualité de l'air sur l'ensemble de la région.
- Analyser et expliquer les phénomènes de pollution atmosphérique.
- Informer la population et les décideurs.
- Alerter en cas de pic de pollution atmosphérique.
- Communiquer sur la qualité de l'air Alger.

Le rôle réglementaire de SAMASAFIA d'Alger consiste à :

- fournir des indications sur l'ensemble des polluants réglementés (dioxyde de soufre, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, ozone, poussières, benzo(a)pyrène, benzène, arsenic, nickel, cadmium, plomb) sur les agglomérations où les valeurs guides risquent d'être dépassées.
- rendre accessible des données à toute personne (mise en ligne sur internet, indice de qualité de l'air quotidien et alerte en cas de pic de pollution).

Mais au travers de ses missions, outre l'aspect réglementaire, SAMASAFIA d'Alger répond également à toute demande de mesure de qualité de l'air dans une logique de politique régionale de surveillance de la pollution atmosphérique.

### **AIV.2 Moyens mis en œuvre.**

SAMASAFIA d'Alger appuie son expertise sur un réseau permanent de surveillance pour assurer que l'air respiré quotidiennement soit de bonne qualité.

Toutes ces stations de mesure, permanentes, permettent de suivre en continu et de manière automatique les polluants atmosphériques réglementés mais également des polluants plus spécifiques tels que les métaux lourds,...

L'ensemble de ces moyens constitue un dispositif de surveillance et d'analyse efficace qui permet à SAMASAFIA d'Alger de remplir les différentes missions qui lui incombent.

### AIV.3 Couverture géographique.

Le réseau comprend 4 sites pour une vingtaine d'analyseurs (**Figure AIV.1**).

Les quatre agglomérations concernées sont : Ben Aknoun, Bab El Oued, El Hamma et la Place du 1er Mai et sont équipés de stations de mesures automatiques en continu (24h/24, 7j/7).



**Figure AIV.1** : Situation des stations de mesure de la qualité de l'air à Alger.

#### **Agglomération de Ben Aknoun**

La surveillance de la qualité de l'air est assurée sur l'agglomération de Ben Aknoun par une station située au niveau de la direction générale des forêts. L'objectif de cette station est le suivi du niveau de la population à des maxima de pollution photochimique (ozone et oxydes d'azote) à la périphérie du centre urbain de l'agglomération. Les polluants surveillés sont les oxydes d'azote, l'ozone, le monoxyde de carbone, les poussières en suspension fines et le benzène.

#### **Agglomération de Bab El Oued**

La surveillance de la qualité de l'air est assurée sur l'agglomération de Bab El Oued d'une station située au niveau du CHU. Elle a pour but de suivre le niveau d'exposition moyen de la population aux phénomènes de pollution atmosphériques dits « de fond » des centres urbains. Ainsi cette station permet le suivi de la pollution gazeuse et particulaire. Les polluants surveillés sont les oxydes d'azote, les poussières en suspension, le monoxyde de carbone, les hydrocarbures méthaniques.

#### **Place du 1er Mai**

La surveillance de la qualité de l'air est assurée sur l'agglomération par une station située au niveau du CHU Mustapha Pacha. Elle a pour but de suivre le niveau d'exposition moyen de la

population aux phénomènes de pollution atmosphériques dits « de fond » des centres urbains. Ainsi cette station surveille le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, les poussières en suspension, le benzène, le monoxyde de carbone et les hydrocarbures méthaniques.

#### **Place d'El Hamma**

La surveillance de la qualité de l'air est assurée sur l'agglomération par une station située au niveau de l'esplanade de la Bibliothèque Nationale. Elle a pour but de suivre le niveau d'exposition moyen de la population aux phénomènes de pollution atmosphériques dits « de fond » des centres urbains. Les polluants surveillés sont les oxydes d'azote, les poussières en suspension, le monoxyde de carbone, les hydrocarbures méthaniques.

#### **AIV.4 Organisation du réseau SAMASAFIA**

Le réseau automatique mesure les polluants classiques : NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, COV et des paramètres météorologiques.

Ce parc de matériels nécessite :

- Une maintenance préventive ou corrective de tous les équipements qui le composent.
- le contrôle automatique des analyseurs en station à l'aide d'étalons de contrôle.
- la configuration et la gestion d'un système informatique spécifique à notre métier qui permet une supervision du réseau automatique très performante.

#### **AIV.5 Présentation de l'indice de qualité de l'air**

La définition d'un indice de qualité de l'air résulte de la volonté de rendre l'information accessible au plus grand nombre sans entrer dans des considérations scientifiques parfois complexes. Cet indice est une appréciation qualitative de la qualité de l'air qui a peu de valeur scientifique. En effet, il synthétise en un seul paramètre les résultats pour des polluants dont les effets sur la santé peuvent être très différents et définit la qualité de l'air par rapport au polluant pour lequel la situation est la pire. On compare donc des choses très différentes et il ne faut en aucun cas commencer à établir des statistiques sur ces indices. Les indices ne remplacent en aucun cas les rapports et les interprétations qui doivent toujours s'effectuer à partir des données.

Ces indices sont basés sur les teneurs en ozone, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre et les particules PM<sub>10</sub>. Ils ne tiennent donc pas compte des composés en métaux lourds ou organiques dont les effets résultent plutôt (mais pas toujours) d'une exposition à long terme.

Les indices portent donc sur les principaux polluants irritants. Pour chacun des polluants, on définit une échelle de concentrations pour calculer un sous-indice. Les échelles de

concentrations sont basées à la fois sur les valeurs limites imposées par les directives internationales et sur l'historique des données (**Tableau AIV.1**). L'indice de qualité est alors déterminé comme étant le sous-indice le plus élevé, donc la qualité la plus médiocre. Si l'un des sous-indices manque, l'indice global n'est pas calculé et il faut au minimum 50 % de données valides pour calculer un sous-indice.

**Tableau AIV.1** : Définition des indices de pollution.

<b>Polluant</b>		<b><math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math></b>									
<b>SO<sub>2</sub></b>	Moy. 24 h	0 ->15	-> 30	-> 45	-> 60	-> 80	-> 100	-> 125	-> 165	-> 250	>250
<b>NO<sub>2</sub></b>	Max. 1 h	0 ->25	-> 45	-> 60	-> 80	-> 110	-> 150	-> 200	-> 270	-> 400	>400
<b>O<sub>3</sub></b>	Max 8 h	0 -> 30	-> 45	-> 60	-> 80	-> 100	-> 120	-> 150	-> 200	-> 270	>270
<b>PM10</b>	Moy. 24 h	0 -> 10	-> 20	-> 30	-> 40	-> 50	-> 70	-> 100	-> 150	-> 200	>200
<b>Indice</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Appréciation</b>		Excellent	Très bon	Bon	Assez bon	Moyen	Médiocre	Très médiocre	Mauvais	Très mauvais	Exécrable