



Département de Génie de l'Environnement
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement

Thèse de Doctorat en Sciences Génie de l'Environnement

Evaluation des émissions atmosphériques et modélisation de la qualité de l'air dans le grand Alger - Scénarios à l'horizon 2030

Présentée par : **BELHOUT Dalila**

Soutenu publiquement le 09/11/2019

Composition du jury :

Mme	BELHANACHE	Naima	Professeur, ENP, Alger	Présidente
Mr.	KERBACHI	Rabah	Professeur, ENP, Alger	Directeur de thèse
Mme	MIRANDA	Ana Izabel	Professeur, Univ. Aveiro, Portugal.	Co-directeur de thèse
Mr.	YASSAA	Nourreddine	Professeur, directeur du CDER, Alger	Examineur
Mr.	KERCHICH	Yacine	Maître de Conférences/A, Univ. Médea	Examineur
Mr.	BOUGHEDAOU	Menouar	Professeur, Univ. Blida	Examineur
Mr.	CHERGUI	Abdelmalek	Professeur, ENP, Alger	Examineur

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie de l'Environnement

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement

Thèse de Doctorat en Sciences

Génie de l'Environnement

Evaluation des émissions atmosphériques et modélisation de la qualité de l'air dans le grand Alger - Scénarios à l'horizon 2030

Présentée par : **BELHOUT Dalila**

Soutenu publiquement le 09/11/2019

Composition du jury :

Mme	BELHANACHE	Naima	Professeur, ENP, Alger	Présidente
Mr.	KERBACHI	Rabah	Professeur, ENP, Alger	Directeur de thèse
Mme	MIRANDA	Ana Izabel	Professeur, Univ. Aveiro, Portugal.	Co-directeur de thèse
Mr.	YASSAA	Nourreddine	Professeur, directeur du CDER, Alger	Examineur
Mr.	KERCHICH	Yacine	Maître de Conférences/A, Univ. Médea	Examineur
Mr.	BOUGHEDAOU	Menouar	Professeur, Univ. Blida	Examineur
Mr.	CHERGUI	Abdelmalek	Professeur, ENP, Alger	Examineur

DEDICACE

A toute ma famille

REMERCIEMENTS

Je remercie le professeur Rabah KERBACHI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, mon directeur de thèse, de m'avoir fait confiance pour ce travail et qui m'a beaucoup apporté au cours de ma recherche tant par ses qualités scientifiques qu'humaines.

Je remercie chaleureusement Madame Ana Izabel MIRANDA, Professeur à l'Université d'Aveiro, Portugal, mon Co-encadrant, qui m'a accueillie au sein de son laboratoire et qui a suivi mon travail et m'a soutenu avec un grand dévouement et beaucoup d'efficacité tout au long de mon stage à l'Université d'Aveiro.

Je remercie particulièrement Monsieur Hélder RELVAS, Docteur à l'Université d'Aveiro, qui s'est toujours rendu disponible pour m'aider dans ces présents travaux.

Je tiens à remercier vivement Madame Naima BELHANACHE, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Je suis très reconnaissante de l'honneur que m'a fait Monsieur Nourredine YASSAA, Professeur et Directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) d'Alger, en acceptant la tâche d'évaluer en qualité d'examineur les travaux présentés dans ce manuscrit.

Je tiens, également, à remercier Monsieur Yacine KERCHICH, Maître de Conférences/A à l'Université de Médéa, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie Monsieur Menouar BOUGHEDAOU, Professeur à l'Université de Blida pour avoir accepté de prendre part au jury.

Merci également à Monsieur CHERGUI Abdelmalek, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour avoir accepté d'évaluer mes travaux.

Mes remerciements vont également au Ministère Algérien de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique et au centre de recherche UDES/CDER pour leur assistance dans la réalisation de ce travail.

J'exprime mes remerciements à toute l'équipe de laboratoire des changements climatiques (GEMAC), département de l'environnement et planification, Université d'Aveiro.

Je dois finalement remercier de nombreuses personnes qui ont contribué, même indirectement, à ce travail.

Tout d'abord mes parents et toute ma famille, qui m'ont aidé et encouragé à poursuivre mes études universitaires jusqu'au doctorat.

Ensuite mes collègues de travail à l'Unité de Développement des Equipements Solaires UDES de Bous-mail, Tipaza, grâce à qui j'ai bénéficié d'une ambiance de travail stimulante et sympathique.

Et enfin mes collègues du laboratoire Sciences et Techniques de l'Environnement (LSTE) à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour l'indéfectible soutien qu'ils m'ont apporté.

ملخص : تقييم الانبعاثات الجوية ونمذجة نوعية الهواء في مدينة الجزائر. - سيناريوهات لعام 2030. يهدف هذا العمل الى رسم خرائط تلوث الهواء الناتج عن الانشطة البشرية (النقل ، الصناعة ، السكن والنفائات) للجزيئات العالقة التي لا يزيد قطرها عن 10 ميكرومتر (PM-10) وثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) في مدينة الجزائر لسنة 2012 ، وذلك باستعمال نموذج رقمي لتلوث الهواء (TAPM ، نسخة 4) للتنبؤ بالأرصاء الجوية والتلوث الهوائي. تشير نتائج مستوى القياسات الإحصائية للأرصاء الجوية الى توافق القيم المقاسة مع القيم المحاكاة، مؤشر التوافق (AOI) يفوق 0,65 بالنسبة لسرعة الرياح ومكوناتها و 0,99 بالنسبة لدرجة الحرارة. بالنسبة للتنبؤ بالتلوث، المقارنة بين القيم المقاسة والقيم المحاكاة تبين تقارب في مدى التلوث. تقدر التركيزات القصوى لـ PM-10 و NO_2 بـ 120 و 90 ميكروغرام / م³ على التوالي حسب النموذج، هذه النتائج تفوق المعدلات المنصوص عليها في التشريعات الوطنية والدولية، وهي بالأساس تتركز بالقرب من المناطق الصناعية والطرق الرئيسية. ثلاث سيناريوهات للتنبؤ (سيرورة العمل ، حكومية وإضافية) تم إعدادها لتقييم جودة الهواء في مدينة الجزائر 2030 بأفاق، تظهر نتائج النمذجة أن سيناريو سيرورة العمل يسجل أعلى المعدلات السنوية، في حين أن السيناريوهين الاخرين يسجلان نسبة أقل من التلوث. إجراءات التخفيض من التلوث المقترحة في السيناريو الإضافي بالنسبة لقطاعي السكن والنقل تسمح بالحد من معدلات التلوث تصل إلى 25% و 24% التي تعادل 35 و 30 ميكروغرام / م³ بالنسبة لـ PM-10 و NO_2 على التوالي. هذا الانخفاض في التلوث يؤدي إلى انخفاض معدل الوفيات.

الكلمات المفتاحية: انتشار تلوث الهواء، جرد الانبعاثات، نمذجة، علم الخرائط، السيناريو ، مدينة الجزائر.

Abstract: Evaluation of atmospheric emissions and modeling of the air quality in the greater Algiers – Scenarios by the horizon 2030.

The principal aim of this work is to develop an air pollution cartography by anthropogenic emissions (road traffic, industrial, residential, and waste) of suspended particles with diameter $<10 \mu m$ (PM-10) and Nitrogen dioxide (NO_2) in Algiers in 2012, using The Air Pollution Model (TAPM; version 4) to predict meteorology and air pollution. Results of the meteorology statistical measures show that the measured and predicted values are in agreement; Index of agreement of Willmott (IOA) for wind speed and its components is above 0,65, it is of 0,99 for temperature. For the pollution prediction, the comparison of predicted concentrations with the measured ones shows the same extent of pollution. Maximum concentrations ($120 \mu g/m^3$) for PM-10 and ($90 \mu g/m^3$) for NO_2 are higher than national and international legislation, the industrial districts are more affected by air pollution than the urban areas. Three forecast scenarios (Business as usual, governmental and additional) are developed to assess the air quality in Algiers by 2030. Modelling results show that the BaU scenario has higher annual averages but other scenarios have lower pollution levels. Additional scenario pollution mitigation measures for residential and traffic allow reductions of up to 25% for PM-10 and 24% for NO_2 . This corresponds to reductions in annual concentrations of around 35 and $30 \mu g/m^3$ for PM-10 and NO_2 , respectively. This reduction in pollution results in a decrease in mortality.

Key words: Air pollution dispersion, emission inventories, modeling, cartography, scenarios, Algiers.

Résumé : Evaluation des émissions atmosphériques et modélisation de la qualité de l'air dans le grand Alger - Scénarios à l'horizon 2030.

L'objectif principal de ce travail consiste à élaborer une cartographie de la pollution de l'air par les émissions anthropiques (trafic routier, industriel, résidentiel et déchets) des particules en suspension de diamètre $<10 \mu m$ (PM-10) et du dioxyde d'azote (NO_2) dans le Grand Alger pour l'année 2012, en utilisant le modèle de pollution de l'air (TAPM, version 4) pour la prédiction de la météorologie et de la pollution de l'air. Les résultats des statistiques des facteurs météorologiques indiquent que les valeurs simulées sont en bon accord avec celles mesurées, l'indice de performance de Willmott (IOA) pour la vitesse du vent et ses composantes est supérieur à 0,6 ; Il est de 0,99 pour la température. Pour la prédiction de la pollution, la comparaison des valeurs mesurées avec celles simulées indique la même ampleur de la pollution. Les concentrations maximales ($120 \mu g/m^3$) pour les PM-10 et ($90 \mu g/m^3$) pour le NO_2 dépassent les normes fixées par la législation nationale et internationale, les zones industrielles et les grands axes routiers sont plus affectés par la pollution de l'air que les zones urbaines. Trois scénarios prévisionnels (Maintien du Statu Quo, gouvernemental et additionnel) sont élaborés pour évaluer la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030. Les résultats obtenus montrent que le scénario MSQ enregistre les moyennes annuelles les plus élevées tandis que les deux autres scénarios enregistrent des niveaux de pollution moindres. Les mesures d'atténuation de la pollution introduites dans le scénario additionnel pour le résidentiel et le trafic routier permettent d'atteindre une atténuation de la pollution allant jusqu'à 25% pour les PM-10 et 24% pour le NO_2 correspondant à des réductions des concentrations annuelles de l'ordre de 35 et $30 \mu g/m^3$ pour les PM-10 et le NO_2 , respectivement. Cette réduction de pollution se traduit par une diminution de la mortalité.

Mots clés : Dispersion de la pollution de l'air, inventaires des émissions, modélisation, cartographie, scénarios, Alger.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DE MESURE

Introduction générale.....14

CHAPITRE I. Généralités sur la pollution de l'air en milieu urbain

1. 1. Contexte de la thèse	18
1. 2. Enjeux de la pollution de l'air	21
1. 2. 1. Sanitaires.....	21
1. 2. 2. Environnementaux.....	22
I. 3. Pourquoi modéliser ?.....	23
I. 3. 1. Comprendre	23
I. 3. 2. Prédire.....	24
I. 3. 3. Décider.....	26
1. 4. Echelles des circulations atmosphériques	26
1. 5. Caractéristiques de la pollution urbaine	29
I. 5. 1. Émissions : sources, polluants, réglementations	29
1. 6. Présentation des chapitres de la thèse.....	33

CHAPITRE II. Méthodologie et outils de simulation

II. 1. Modélisation de la dispersion atmosphérique.....	37
II. 2. Modèle utilisé.....	37
II. 3. Domaine de simulation	41
II. 4. Présentation de la zone d'étude.....	42
II. 5. Cadastre des émissions	43
II. 5. 1. Polluants choisis	45
II. 5. 2. Principe d'estimation des émissions.....	45
II. 6. Estimations des émissions.....	47
II. 6. 1. Emissions des grandes sources fixes	47
II. 6. 2. Emissions des grandes sources linéaires	49
II. 6. 3. Emissions surfaciques	51

II. 6. 3. 1. Emissions surfacique du secteur résidentiel	51
II. 6. 3. 2. Emissions surfaciques du trafic routier.....	52
II. 6. 3. 3. Emissions surfaciques du secteur industriel.....	53
II. 6. 3. 4. Emissions surfaciques des déchets domestiques.....	54
II. 6. 4. Emissions totales	56
 CHAPITRE III. Modélisation de la qualité de l'air dans la région d'Alger	
III. 1. Modélisation de la météorologie et de la pollution dans la région d'Alger	58
III. 1. 2. Modélisation de la météorologie	59
III. 1. 2. 1. Estimateurs d'erreur utilisés pour l'évaluation statistique des simulations	59
III. 1. 2. 2. Résultats de simulation météorologique et discussion.....	62
III. 1. 3. Modélisation de la qualité de l'air	66
III. 1. 3. 1. Résultats de simulation de la pollution et discussion.....	67
 CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour de la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030	
IV. 1. Prévision de la pollution	74
IV. 2. Différents scénarios prévisionnels	74
IV. 2. 1. Scénario de maintien du statu quo (MSQ) à l'horizon 2030	76
IV. 2. 1. 1. Calcul des émissions pour le scénario de maintien du statu quo (MSQ) à l'horizon 2030.....	76
IV. 2. 1. 1. 1. Secteur routier.....	76
IV. 2. 1. 1. 2. Secteur résidentiel.....	78
IV. 2. 1. 1. 3. Secteur industriel.....	78
IV. 2. 1. 1. 4. Secteur des déchets domestiques.....	79
IV. 2. 2. Scénario gouvernemental à l'horizon 2030	80
IV. 2. 2. 1. Programme de promotion de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030....	80
IV. 2. 2. 1. 1. Secteur routier.....	80
IV. 2. 2. 1. 2. Secteur résidentiel.....	81
IV. 2. 2. 1. 3. Secteur industriel.....	82
IV.2.2.2.Programme de développement des énergies renouvelables à l'horizon 2030.83	
IV.2.2.3. Calcul des émissions pour le scénario gouvernemental à l'horizon 2030.....	84
IV. 2. 2. 3. 1. Secteur routier.....	84
IV. 2. 2. 3. 2. Secteur résidentiel.....	85
IV. 2. 2. 3. 3. Secteur industriel.....	87

IV. 2. 3. Scénario additionnel à l’horizon 2030	88
IV. 2. 3. 1. Secteur routier.....	88
IV. 2. 3. 2 Secteur résidentiel.....	89
IV. 2. 3. 3. Calcul des émissions pour le scénario additionnel à l’horizon 2030.....	89
IV. 2. 3. 3. 1. Secteur routier.....	90
IV. 2. 3. 3. 2. Secteur résidentiel.....	90
IV. 3. Variation des émissions par les PM-10 et NO ₂ pour les scénarios prévisionnels en 2030	91
IV. 4. Modélisation de la qualité de l’air pour les trois scénarios prévisionnels.....	92
IV. 4. 1 Résultats de simulation de la pollution et discussion	92
IV. 5. Impacts de l’exposition aux PM-10 et NO ₂ sur la santé humaine.....	103
IV. 5. 1. Effets de la pollution atmosphérique en termes de mortalité.....	105
IV. 5. 2. Estimation de l’exposition	106
IV. 5. 3. Résultats de l’estimation de l’exposition de la population de la zone d’étude à la pollution atmosphérique par les PM-10 et NO ₂ pour l’année de référence (2012) ainsi que les trois scénarios prévisionnels à l’horizon 2030	107
Conclusion générale	112
Bibliographie	116
Annexe	123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01	Normes algériennes de la qualité de l'air établis par le décret exécutif N° 06-02 du 07 janvier 2006	32
Tableau 02	Valeurs limites des PM-10 et NO ₂ dans l'air recommandées par l'OMS et l'UE	33
Tableau 03	Mécanismes des réactions photochimiques (ensemble de réactions génériques)	40
Tableau 04	Répartition des types de sources d'émission	46
Tableau 05	Valeurs des paramètres d'émission pour les grandes sources fixes	48
Tableau 06	Distribution du flux de véhicules sur les grandes sources linéaires	50
Tableau 07	Clés de répartition des émissions des zones industrielles à Alger en fonction de la surface de chaque zone	53
Tableau 08	Emissions du NO _x (10 ⁺³ ton) en Algérie	53
Tableau 09	Estimateurs d'erreur utilisés pour l'évaluation statistique des simulations	61
Tableau 10	Evaluation statistique des variables météorologique, vitesse du vent \bar{U} en m/s, composantes Ouest-est (U) et sud nord (V) du vent en ms ⁻¹ et température (T) en °C	65
Tableau 11	Evolution du parc de véhicule algérien à l'horizon de 2030 (10 ⁺⁴)	77
Tableau 12	Besoin énergétique pour un projet de maison traditionnelle et un projet de maison pilote	86
Tableau 13	Comparaison entre les prix des carburants en Algérie avec ceux en Europe	88
Tableau 14	Evolution de la consommation nationale des carburants terre 2014-2018[unité : MT]	90
Tableau 15	Mesures choisies avec leurs codes pour les scénarios prévus	91
Tableau 16	Impact des scénarios prévisionnels prévus (2030) sur la variation des émissions des PM-10 et NO ₂ par SNAP dans la région d'Alger (le scénario MSQ est comparé à l'année de référence 2012, le scénario gouvernemental est comparé au scénario MSQ et le scénario additionnel est comparé au scénario gouvernemental)	92

LISTE DES FIGURES

Figure 01	Répartition de la consommation énergétique par secteur d'activité en Algérie	18
Figure 02	Situation des stations de mesure de la qualité de l'air Samasafia en Algérie	20
Figure 03	Mortalité attribuée par la pollution de l'air ambiant.....	21
Figure 04	Structure générale d'un modèle déterministe de la qualité de l'air.....	25
Figure 05	Classification des phénomènes atmosphériques en fonction de leur échelle spatio-temporelle	28
Figure 06	Contribution en Millions de tonnes de CO ₂ des différents secteurs d'activité aux émissions de polluants pour l'Algérie en 2012	30
Figure 07	Présentation de la démarche d'étude.....	34
Figure 08	Représentation schématique du model TAPM.....	39
Figure 09	Domaines imbriqués de simulation avec le modèle TAPM.....	41
Figure 10	Relief de la Wilaya d'Alger.....	42
Figure 11	Représentation schématique du cadastre des émissions.....	44
Figure 12	Positionnement des point de sources : Centrales thermiques (1 : Port d'Alger, 2 : Hamma, 3 : Boufarik, 4 : Arbaa), Cimenteries (5 : Rais Hamidou, 6 : Meftah), Raffinerie (7 : Baraki), Usine du verre plat (8 : Cevital)	48
Figure 13	Positionnement de grandes sources linéaires.....	50
Figure 14	Grille des émissions du cadastre EMEP (Mailles 50 km x 50 km).....	52
Figure 15	Répartition spatiale des sources d'émissions surfacique.....	55
Figure 16	Emissions relatives des PM-10 et de NO ₂ de différentes sources.....	56
Figure 17	Présentation de la modélisation de la météorologie et de la pollution dans la région d'Alger	58
Figure 18	Comparaison entre la rose du vent simulée par TAPM et celle mesurée par la station météorologique d'Ain Bessam durant l'année 2012	62
Figure 19	Comparaison entre la température simulée par TAPM et celle mesurée par la station météorologique d'Ain Bessam durant l'année 2012	63
Figure 20	Comparaison entre la vitesse du vent simulée par TAPM et celle mesurée par la station météorologique d'Ain Bessam durant l'année 2012	63
Figure 21	Comparaison entre la direction du vent simulée par TAPM et celle mesurée par la station météorologique d'Ain Bessam durant l'année 2012	64
Figure 22	Corrélation entre les paramètres météorologiques simulés par TAPM et ceux mesurés par la station météorologique d'Ain Bessam durant l'année 2012	64

Figure 23	Comparaison entre la concentration moyenne annuelle de PM-10 mesurée par la station Samasafia dans la période (2003 à 2007) et la valeur simulée durant l'année 2012, pour différents sites à Alger	68
Figure 24	Comparaison entre la concentration moyenne annuelle de NO ₂ mesurée par la station Samasafia dans la période (2003 à 2007) et la valeur simulée durant l'année 2012, pour différents sites à Alger	68
Figure 25	Distribution spatiale du PM-10 dans la zone d'étude pour l'année 2012.....	70
Figure 26	Distribution spatiale du NO ₂ dans la zone d'étude pour l'année 2012.....	70
Figure 27	Organigramme des scénarios prévisionnels.....	75
Figure 28	Evolution du parc automobile de 1997 à 2015.....	77
Figure 29	Evolution de la population algérienne.....	78
Figure 30	Répartition du parc automobile par type de véhicules 2013.....	84
Figure 31	Charge annuelle et gain solaire en kWh par an.....	87
Figure 32	Concentrations moyennes annuelles des PM-10 (a) et de NO ₂ (b) en (µg/m ³) simulées avec TAPM pour l'année de référence (2012) dans la zone d'étude. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres)	93
Figure 33	Concentrations moyennes annuelles des PM-10 (a) et de NO ₂ (b) en (µg/m ³) simulées avec TAPM pour le scénario MSQ (2030) dans la zone d'étude. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres).	94
Figure 34	Concentrations moyennes annuelles des PM-10 (a) et de NO ₂ (b) en (µg/m ³) simulées avec TAPM pour le scénario gouvernemental (2030) dans la zone d'étude. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres)	95
Figure 35	Concentrations moyennes annuelles des PM-10 (a) et de NO ₂ (b) en (µg/m ³) simulées avec TAPM pour le scénario additionnel (2030) dans la zone d'étude. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres)	96
Figure 36	Réduction (en pourcentage) des moyennes annuelles des PM-10 (a) et de NO ₂ (b) pour le scénario 2 (scénario gouvernemental) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres)	98
Figure 37	Réduction (en concentration) des moyennes annuelles des PM-10 (a) et de NO ₂ (b) pour le scénario 2 (scénario gouvernemental) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres)	99

Figure 38	Réduction (en pourcentage) des moyennes annuelles des PM-10 (a) et de NO ₂ (b) pour le scénario 3 (scénario additionnel) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres)	101
Figure 39	Réduction (en concentration) des concentrations moyennes annuelles des PM-10 (a) et de NO ₂ (b) pour le scénario 3 (scénario additionnel) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres)	102
Figure 40	Distribution de la population algéroise en 2012. Les coordonnées (échelle) sont UTM (degrés)	104
Figure 41	Distribution de la population algéroise en 2030. Les coordonnées (échelle) sont UTM (degrés)	105
Figure 42	Nombre de décès par an pour l'année de référence en 2012 et les trois scénarios prévisionnels en 2030 dans la zone d'étude.	107
Figure 43	Pourcentage de réduction de la mortalité par les PM-10 pour le scénario 2 (scénario gouvernemental) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées (échelle) sont UTM (degrés)	108
Figure 44	Pourcentage de réduction de la mortalité par les NO ₂ pour le scénario 2 (scénario gouvernemental) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées (échelle) sont UTM (degrés)	109
Figure 45	Pourcentage de réduction de la mortalité par les PM-10 pour le scénario 3 (scénario additionnel) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées (échelle) sont UTM (degrés)	110
Figure 46	Pourcentage de réduction de la mortalité par les NO ₂ pour le scénario 3 (scénario additionnel) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées (échelle) sont UTM (degrés)	110

LISTE DES ABREVIATIONS

ADEME :	Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
APM :	Particules en suspension dans l'air
APRUE :	Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Energie
BaU :	Maintien du statu Quo (Business as Usual)
BIAS :	Différence moyenne
BTEX:	(benzene, toluene, ethylbenzene, o-, m-, and p-xylenes)
CES :	Chauffe-Eau Solaire
CET :	Centres d'Enfouissement Techniques
COPERT:	Programme d'ordinateur pour calculer les emissions du trafic routier (Computer Program to calculate Emission from Road Transport)
CORINAIR:	CORE inventaire des emissions de l'air (CORE Inventory of AIR emissions)
CSIRO:	Organisation de recherche scientifique et industrielle du Commonwealth (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)
E:	Erreur
EMEP:	Programme européen de surveillance et d'évaluation (European Monitoring and Emission Program)
ECRHS:	Enquête sur la santé respiratoire dans la communauté européenne (European Community Respiratory Health Survey)
EGM :	Module de grille eulérienne (Eulerian Grid Module)
FPM :	Matières Particulaires Fines
GNC :	Gaz Naturel Comprimé
GPL :	Gaz de Pétrole Liquéfié
GSL :	Grandes Sources Linéaires
HAP :	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
IOA :	Indice de performance
INSP :	Institut National de Santé Publique
LPM :	Module de Particules Lagrangiennes
MSQ :	Maintien du Statu Quo
MTEP :	Millions de Tonnes Equivalent Pétrole
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
ONEDD :	Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable
ONS :	Office National des Statistiques
PTS :	Poussières Totales en Suspension
r :	Coefficient de corrélation
RMSE	Erreur quadratique moyenne
RP :	Pool Radicalaire
SGN :	Produits stables d'azote gazeux
SKVAR :	Variance des compétences
SIG :	Système d'Information Géographique
SNAP:	Nomenclature sélectionnée pour la pollution atmosphérique (Selected Nomenclature for sources of Air Pollution)
SNGN :	Produits stables d'azote non gazeux
SNGOC :	Carbone organique stable non gazeux
SNGS :	Produits stables de soufre non gazeux
STDE :	Écart type d'erreur
TAPM:	Modèle de la pollution de l'air (The Air Pollution Model)
UE :	Union Européen
UTM :	Transverse universelle de mercator (Universal Transverse Mercator)
VP :	Véhicules Particuliers
n.d :	Non disponible

LISTE DE MESURE

μ	Micro
N	Nano
M	Mètre
°C :	Degré Celsius
Hv	Photon d'irradiation solaire
Wh	Watt-heure
K	Degré Kelvin
S	Seconde
ton	Tonne
hab.	Habitant
K	Kilo
ha	Hectare
DA	Dinard Algérien
M	Méga
G	Giga
g :	Gramme
TEP :	Tonnes Equivalent de Pétrole
USD :	United States dollar

Introduction générale

Les agglomérations urbaines d'aujourd'hui connaissent une triple croissance : celle de la population, celle des activités économiques et celle du trafic routier. La résultante environnementale de ces croissances est non seulement la pollution atmosphérique, mais aussi la congestion, elle-même cause aussi 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.

Au-delà des émissions dues au trafic automobile et le résidentiel en Algérie, l'atmosphère urbaine continue d'être affectée par la présence de certaines industries réparties au sein du tissu urbain ainsi que par la combustion à l'air libre de déchets municipaux dans des décharges sauvages (Khedidji et al., 2013; Boudehane et al., 2016; Terrouche et al., 2016; Belamri et al., 2017). Cette situation affecte de nombreuses villes du pays et constitue une cause majeure de dégradation de la qualité de l'air particulièrement au voisinage de ces sources de rejet.

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 (Kerbachi et al., 2009; Seraghni et al., 2009; Oucher et al., 2015).

Selon le rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) : plus de 90% des décès liés à la pollution se produisent dans les pays à revenus faibles ou moyens, principalement en Afrique et délivre des informations inquiétantes à propos de la qualité de l'air en Algérie (11 424 décès attribuables à la pollution atmosphérique par an) (OMS, 2016).

Selon ses termes, notre pays serait classé parmi les pays dont l'air est le plus pollué dans le monde. La pollution de l'air varie dans les zones rurales et semi-urbaines entre 9 et 74 grammes $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de particule en sachant que la norme fixée par l'OMS est de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dans les zones urbaines, cette pollution oscille entre 8 et 73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec une moyenne de 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Paradoxalement, cette étude prouve que plus on va vers le sud du pays plus les taux de pollution augmentent pour atteindre des seuils critiques dépassant les 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les zones où la pollution atteint des sommets s'étalent sur schéma qui va du Mexique à la Chine, en passant par les pays du Maghreb, les pays du Golfe et l'Inde (OMS, 2016).

Introduction générale

La surveillance de la qualité de l'air n'est pas développée en Algérie. C'est à peine s'il existe quelques réseaux de mesure de la qualité de l'air implantés dans les quatre villes industrialisées du pays telles que Alger, Oran, Annaba et Skikda et qui sont souvent non opérationnels.

Face à cette situation problématique, la modélisation est idéale pour avoir les premières informations de base sur la qualité de l'air qui ne cesse de se dégrader. Elle est également importante pour l'amélioration de la qualité de l'air car elle permet de simuler l'impact de nouvelles émissions et l'effet de réduction ou d'augmentation des émissions de certaines sources (études d'impact et études prospectives).

Par ailleurs, elle est utilisée pour la prévision de la qualité de l'air et la cartographie des concentrations de certains polluants. La prévision de la qualité de l'air est un enjeu important, notamment pour les personnes ayant des problèmes respiratoires qui nécessitent d'être informées ou prévenus en cas de pics sévères de pollution. De la même façon, en cas d'émissions importantes de polluants dans l'atmosphère, qu'elles soient accidentelles ou naturelles, il est important de connaître les régions vers lesquels les polluants seront transportés afin que les mesures de protection des populations puissent être, si nécessaires, mises en œuvre. On pensera par exemple aux accidents nucléaires survenus à Tchernobyl en Ukraine et Fukushima au Japon ou encore à la récente éruption du volcan Eyjafjallajokull en Islande. La cartographie de la pollution est utilisée par exemple pour l'information du public et pour des études d'exposition de la population ou d'épidémiologie (Briant, 2012).

En absence d'équipement de mesure, la modélisation reste le seul outil qui permet de fournir aux décideurs les données nécessaires à la mise en œuvre de moyens de prévention et de lutte contre la dégradation de la qualité de l'air. Depuis plus d'une décennie, le développement des moyens de calcul a permis la mise en place de modèles numériques de prévision du temps à l'échelle régionale. D'autres modèles météorologiques, comme le modèle The Air Pollution Model (TAPM) (Hurley, 2008), ont montré leur efficacité à prédire les conditions atmosphériques méso-échelles à partir des données synoptiques.

Les observations de distribution de pollution, apparaissant dans l'agglomération algéroise, peuvent générer des pics de pollution. Pour tenter d'évaluer et de prévenir les risques des émissions associées à la pollution atmosphérique d'ici 2030, une analyse des scénarios prévisionnels suivi par l'impact sur la santé humaine, est très indiquée.

Introduction générale

C'est dans ce contexte que s'insère notre travail de recherche axé sur l'évaluation de la pollution de l'air par les PM-10 et le NO₂ dans la région d'Alger avec un modèle de chimie-transport de méso-échelle TAPM, qui permet d'estimer la distribution de polluants atmosphériques liés aux sources d'émissions résidentielles, industrielles, trafic routier et aux déchets solides. L'objectif étant d'identifier les zones à forte pollution qui doivent faire l'objet d'une surveillance accrue.

Le choix des PM-10 et NO₂ est édicté par l'importance de ces deux polluants qui sont considérés comme étant des indicateurs de la qualité de l'air dans les milieux urbains. Ils sont émis en grandes quantités par les activités humaines et exercent des effets nocifs bien connus sur l'homme et l'environnement (AEE, 2017). Ce sont de plus, des polluants qui sont règlementés par le monde, y compris par la législation algérienne.

Les prévisions futures de la pollution par les mêmes polluants atmosphériques et pour la même zone d'étude à l'horizon 2030 sont également étudiées, par l'élaboration, d'une part, de trois différents scénarios de pollution et, d'autre part, par l'estimation de la mortalité totale de la population pour chaque cas d'étude.

Nous présenterons dans le chapitre 1, une synthèse bibliographique des connaissances dans le domaine de la modélisation des circulations atmosphériques, ainsi que l'état de la pollution de l'air observés en Algérie et particulièrement sur le grand Alger.

Le chapitre 2 est consacré à la description de la méthodologie et des principaux outils employés. La configuration du modèle chimie et transport TAPM, le modèle et les polluants choisis ainsi que la zone d'étude sont aussi présentés.

Les résultats des simulations numériques méso-échelles TAPM (avec 3 domaines de résolutions respectives 10, 3 et 1 km), et de la dispersion de polluants sont décrits et discutés dans le chapitre 3.

Les différents scénarios prévisionnels étudiés à l'horizon 2030 dans la zone d'étude sont examinés au chapitre 4.

Enfin dans la partie conclusion et perspectives, nous résumons les principaux résultats et discussions de ce travail, et nous présentons quelques perspectives à développer dans de futures travaux.

CHAPITRE I.

Généralités sur la pollution de l'air en milieu urbain

CHAPITRE I. Généralités sur la pollution de l'air en milieu urbain

I. 1. Contexte de la thèse

Il est connu que les villes à forte densité urbaine, représentent des zones de forte pollution. En Algérie, les problèmes de pollution accumulés au fil des décennies passées sont à l'image de ces grandes villes dont le développement industriel, la circulation automobile et les déchets ménagers asphyxient leur environnement (Boughedaoui et al., 2008; Khedidji et al., 2013; Ladjji et al., 2014; Belamri et al., 2017). Alger est une grande métropole au sens où elle concentre une forte population estimée à 4 million d'habitants recensés en 2017 (ONS, 2017) du fait de la forte urbanisation et de la centralisation des pôles économique, technologique, culturel et politique.

Avec le développement industriel et technologique, ainsi que la croissance démographique, les demandes en énergie fossile suivent une croissance exponentielle, entraînant avec ceci une augmentation des émissions des substances polluantes.

La figure 01, montre la répartition de la consommation énergétique par secteur d'activité en Algérie en 2012.

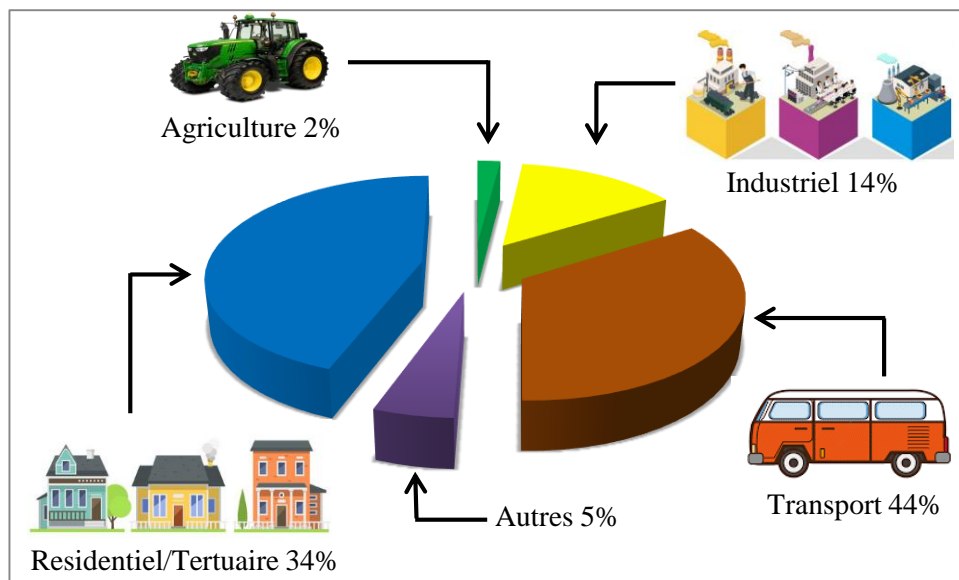


Fig. 01 Répartition de la consommation énergétique par secteur d'activité en Algérie (APRUE, 2012).

Le trafic routier représente une part importante de la pollution de l'air en ville (Boughedaoui et al., ; Chikhi et al., 2014) . La ville d'Alger abrite plus d'un million de véhicules, ce qui induit

de très fortes émissions de polluants atmosphériques, notamment pour les polluants tels que les PM-10 et le NO₂ (Kerbachi et al., 2006).

Malgré des efforts technologiques réalisés pour une meilleure maîtrise de l'énergie, les émissions du secteur résidentiel n'ont pas diminué. La croissance de ces émissions est due également à l'utilisation exclusive et accrue de combustibles d'origine fossile. Ces derniers présentent en effet des facteurs d'émission élevés qui contribuent à maintenir à son plus haut niveau la présence des oxydes d'azote dans l'atmosphère.

L'activité industrielle continue de contribuer à la dégradation de la qualité de l'air dans le voisinage des localités où se trouvent implantées certaines grandes industries tels que les cimenteries, les centrales électriques, les complexes chimiques, pétrochimiques et métallurgiques etc. La sensibilisation des opérateurs aux problèmes de protection de l'environnement associée à une plus grande pression des pouvoirs publics sur ces derniers a permis d'aboutir à une légère amélioration de la situation sur le terrain (MATE, 2012). Pour pallier aux problèmes de pollution, la loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable (JORADP, 2003), consacre des dispositions spéciales relatives à la pollution de l'air. Ainsi, les industries polluantes sont tenues de prendre toutes les dispositions nécessaires pour réduire ou supprimer leurs émissions et répondre aux normes exigées Décret exécutif n°93-165 du 10 juillet 1993 réglementant les émissions atmosphériques de fumées, gaz, poussières, odeurs et particules solides, des installations fixes (JORADP, 1993) et le Décret exécutif n°06-02 définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de la qualité de l'air (JORADP, 2006).

La pratique de combustion des déchets à l'air libre persiste encore sur l'ensemble du territoire en raison de l'accroissement des quantités de déchets générés qui continuent de s'accumuler sur des décharges sauvages et dont une partie est éliminée par auto-combustion sur le site même des décharges (MATE, 2012). Même si un certain nombre de centres d'enfouissement techniques (CET) ont vu le jour dans plusieurs agglomérations, à l'exemple CET de Hamici implanté dans la commune de Mahelma à l'ouest d'Alger après la fermeture de la décharge d'Ouled Fayet en 2013, la pollution atmosphérique engendrée par les décharges domestiques constitue encore un problème majeur dans la plupart des villes du pays.

Pendant très longtemps, les niveaux de pollution dans les principales zones urbaines du pays n'étaient pas connus. Il existe pratiquement que des études ponctuelles effectuées dans le cadre

de mémoires, thèses et projets de recherches au niveau de l'agglomération d'Alger (Kerchich and Kerbachi, 2012; Ladji et al., 2014; Abderrahim et al., 2016; Talbi et al., 2017).

Pour combler ce manque d'informations sur l'état de la pollution de l'air dans des zones qui sont caractérisées par une forte densité d'habitat, il a été jugé nécessaire de mettre en place des réseaux pour mesurer en continu les concentrations de certains polluants, le Ministère en charge de l'environnement a lancé une tentative de mise en place de quelques réseaux pour mesurer en continu les concentrations de certains polluants. Des réseaux à nombre très restreint de stations ont ainsi été installés dans les quatre villes industrialisées du pays Alger, Oran, Annaba et Skikda (figure 02).

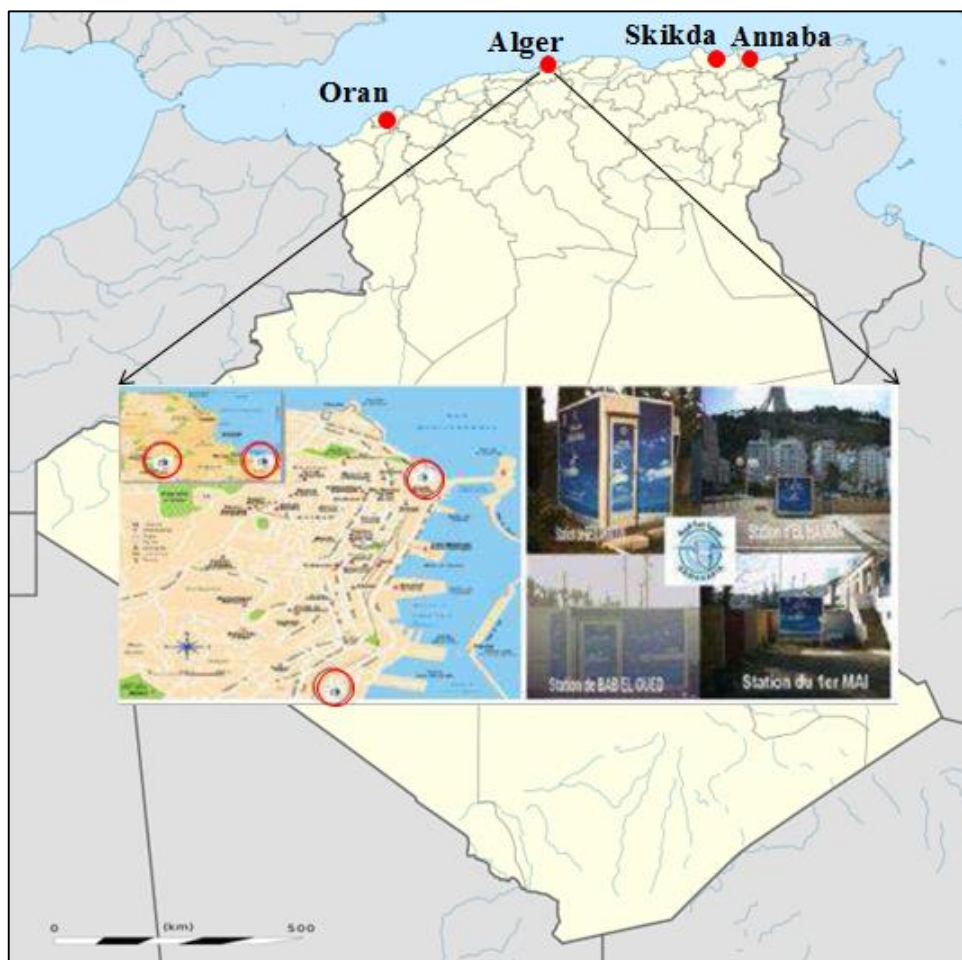


Fig. 02 Situation des stations de mesure de la qualité de l'air Samasafia en Algérie.

Alger a été équipée en 2003 de quatre stations de mesure Samasafia qui mesurent les concentrations des principaux polluants atmosphériques (Safar Zitoun and Tabti-Talamali, 2009), mais ces dernières ont connu beaucoup de problèmes de maintenance et d'étalonnage et sont depuis plusieurs années à l'arrêt.

Contrairement aux stations de mesure en continu, dont le nombre est réduit, la modélisation permet de couvrir une large zone géographique et ainsi d'atteindre un niveau d'information élevé sur la répartition spatiale d'un polluant sur la zone.

C'est dans ce contexte que s'insère cette thèse portant sur l'évaluation de la pollution de l'air par les PM-10 et le NO₂ dans la région d'Alger et les prévisions futurs. L'objectif étant d'identifier les zones à forte pollution qui doivent faire l'objet d'une surveillance accrue.

1. 2. Enjeux de la pollution de l'air

1. 2. 1. Sanitaires

De nombreuses études épidémiologiques ont été menées pour mettre en évidence la dépendance entre pollution urbaine et impacts sanitaires à court et long terme (Zanobetti et al., 2008 ; Cesaroni et al., 2014 ; Korek et al., 2015). Cependant, peu d'études sanitaires ont été réalisées en Algérie sur les populations exposées aux émissions atmosphériques (Laid et al., 2006; Terfaya et al., 2016; Terniche, 2016) alors que selon l'Office National des Statistiques, (ONS) estima qu'en 2012, environ 69% de la population vivait sous l'influence de la ville (aire urbaine de plus de 2000 habitants) (ONS, 2017).

L'OMS a déclaré que près de 7 millions de personnes meurent chaque année des suites de l'exposition à la pollution de l'air (OMS, 2016). La figure 03, montre la mortalité attribuée par la pollution de l'air ambiant dans le monde.

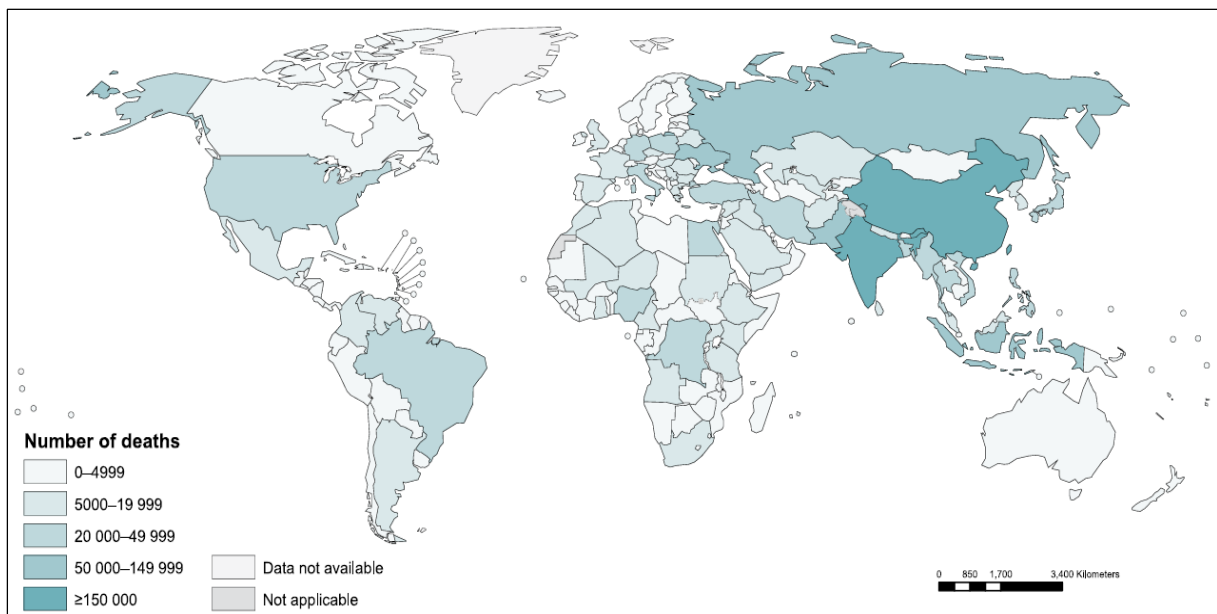


Fig. 03 Mortalité attribuée par la pollution de l'air ambiant (OMS, 2016).

En Algérie, selon le rapport national sur l'Etat et l'avenir de l'environnement, édité par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, chaque année 10 à 12 millions d'habitants consultent pour des épisodes aigus de maladies respiratoires. On peut supposer qu'un certain nombre de ces épisodes soient directement en relation avec l'exposition à la pollution atmosphérique (MATE, 2000).

Quatre enquêtes essentielles ont été menées pour étudier l'asthme en Algérie. Celle de 1986, concernant une population âgée de 12 à 70 ans, a retrouvé une prévalence de l'asthme de 0,44% au Sahara. Les autres enquêtes effectuées en Algérie entre 1986 et 1992 (Belhocine and Ait khaled, 1991; Moumeni, 1995) situent cette prévalence entre 1,91% et 3,4% en fonction des populations étudiées, population générale, enfants scolarisés ou d'âge scolaire, mais non scolarisé. La participation de l'Algérie, représentée par Institut National de Santé Publique, INSP, à l'enquête épidémiologique European Community Respiratory Health Survey, ECRHS, a permis d'obtenir des résultats précis (Terniche, 2016).

I. 2. 2. Environnementaux

Outre les effets sur la santé, la pollution urbaine induit des dégradations environnementales importantes. Le transfert des polluants dans ces écosystèmes se fait soit directement par dépôts sec et humide, soit indirectement par ruissellement et infiltration des eaux de pluie. La détérioration du bâti est un autre aspect de dégradation liée à la pollution urbaine mais affectant plutôt la conservation dans le temps du patrimoine historique.

Parmi les effets sur les écosystèmes urbains, on retrouve notamment la mise à nu des sols (Bernhardt-Römermann et al., 2006) et des changements de végétation aux abords des autoroutes avec notamment un développement propice aux espèces rudérales nitrophytes (« mauvaises herbes » consommatrices d'azote) au détriment d'espèces conifères (Maltby et al., 1995). Cette disparition de la haute végétation est par ailleurs préjudiciable en termes de qualité de l'air puisqu'elle constitue une surface préférentielle de dépôt des polluants et peut donc participer à faire réduire les niveaux de pollution dans la couche atmosphérique plus basse.

On peut également citer la contamination des terres cultivées par les polluants métalliques transportés depuis les sources d'émission, particulièrement pour les espèces feuillues (Säumel et al., 2012), mais aussi la contamination des écosystèmes aquatiques. Par exemple, plusieurs réponses génotoxiques au sein des bivalves ont été associées à la pollution au benzo[a]pyrène et aux métaux (principalement concernant le cuivre) par Gomez-Mendikute et al., (2002) aux

abords côtiers de grandes villes. D'autres études ont montré le lien direct entre concentrations en Hydrocarbure Aromatique Polycyclique (HAP) dans les sols, leur dépôt sous forme solide sur la route ainsi que leur transfert dans les eaux de ruissellement. Liu et al., (2016) ont notamment mis en évidence un fort risque écologique, basé sur le facteur de réponse toxique, concernant la réutilisation des eaux pluviales provenant des zones commerciales urbaines.

Le bâti, particulièrement les monuments historiques, font l'objet d'étude de conservation alors que les concentrations en dioxyde de carbone (CO₂) croissantes favorisent la dissolution du calcaire et donc l'érosion pariétale.

I. 3. Pourquoi modéliser ?

I. 3. 1. Comprendre

Les épisodes de pollution dans une région durant lesquels les dépassements des polluants sont élevés amènent à réfléchir sur les raisons de ce fort niveau de pollution et sur la stratégie de réduction mise en place par les pouvoirs publics.

Pour comprendre ces situations critiques, les stations de mesure vont fournir une tendance très générale sur l'aire de représentativité des stations, mais elles ne restituent pas toujours une résolution appropriée pour décrire un processus atmosphérique local ou au contraire de plus grande échelle (Thouron, 2017).

Dans ce contexte, les modèles déterministes basés sur la description mathématique et numérique des phénomènes peuvent servir pour suivre ou reconstruire un événement météorologique ou atmosphérique afin de diagnostiquer l'origine des polluants et des précurseurs et la dimension spatio-temporelle de la pollution. Par ailleurs, en raison des hypothèses de départ, le modèle n'a pas toujours de solution analytique propre et donne une solution numérique approximative. Le caractère aléatoire des processus environnementaux conduit à une irréductible et inhérente incertitude (Oreskes et al., 1994).

En outre, les données d'entrée peuvent aussi porter des incertitudes de mesure. C'est pourquoi un modèle parfait n'existe pas, des indicateurs statistiques permettent alors d'accéder à une évaluation de la performance qui permet de juger si les résultats sont satisfaisants pour l'utilisation des modèles. Deux références (Chang et Hanna, 2004 ; Yu et al., 2006) définissant un ensemble de métriques statistiques sont classiquement utilisées pour l'évaluation des modèles de qualité de l'air.

I. 3. 2. Prédire

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 déposer d'un très grand nombre d'observations afin d'obtenir une corrélation adéquate (Thouron, 2017).

Les approches déterministes (basées sur les équations d'évolution de la physique ainsi que sur la chimie) de modélisation de la qualité de l'air s'adaptent à l'échelle à laquelle on souhaite faire de la prévision et au processus qui lui sont liés.

Il existe deux principales approches dans la modélisation déterministe, l'approche lagrangienne et l'approche eulérienne.

Les modèles lagrangiens : basés sur le suivi des trajectoires d'un grand nombre de particules dans l'écoulement, ils permettent de bien modéliser l'influence de la turbulence sur la dispersion. Couplé à un modèle à bouffées, ils peuvent permettre de déterminer les fluctuations de concentration. Le temps de calcul peut néanmoins être important lorsque l'on étudie un grand nombre de sources.

Les modèles eulériens : basées sur la résolution de l'équation d'advection-diffusion sur un maillage, ces approches permettent de prendre en compte toute la complexité de l'écoulement. Elles peuvent cependant s'avérer coûteuse en temps de calcul et ne sont pas adaptées au voisinage des sources.

La méthode eulérienne consiste à suivre l'ensemble des concentrations de particule en chaque point du domaine. Cette approche est très gourmande en mémoire et en temps de calcul. La méthode lagrangienne consiste à suivre une particule ou un groupe de particule. Dans cette section, nous nous focaliserons sur la méthode eulérienne. Les modèles déterministes de la pollution atmosphérique, dont la structure est présentée en figure 04, s'efforce de décrire le plus fidèlement possibles les phénomènes physicochimiques ainsi que leurs interactions (Cécé, 2014).

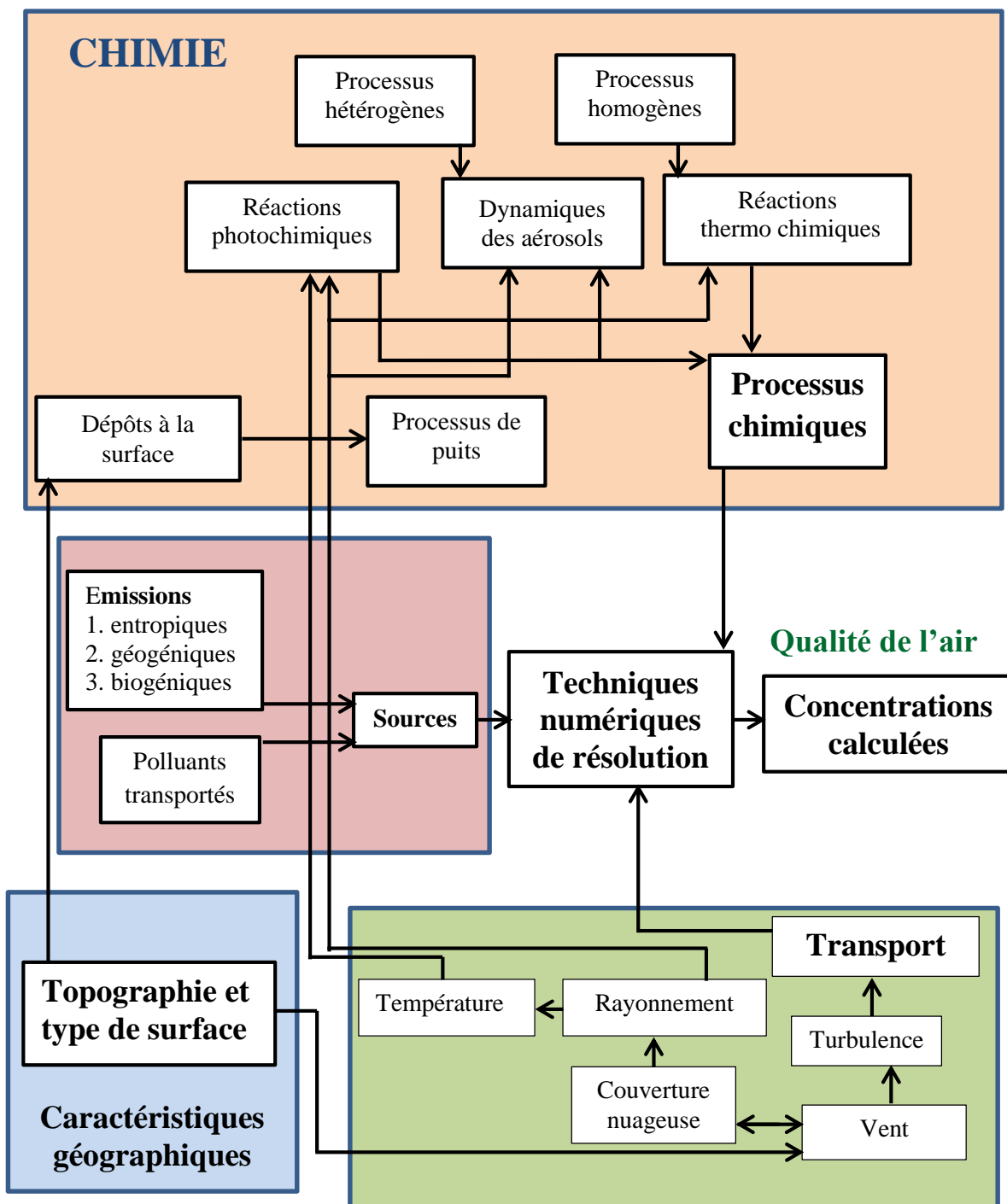


Fig. 04 Structure générale d'un modèle déterministe de la qualité de l'air (Rahal, 2015).

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.

Les modèles de dispersion ont besoin de données d'entrée sur les conditions météorologiques. On distingue pour cela deux approches :

Les préprocesseurs météorologiques, qui servent à calculer les différentes variables décrivant l'état de l'atmosphère, en particulier en ce qui concerne la stabilité thermique et la turbulence de l'écoulement. Les préprocesseurs sont généralement adaptés pour utiliser des données provenant de mesures de terrain.

L'utilisation d'un champ de vent tridimensionnel, obtenu à l'aide d'un modèle d'écoulement. (Cécé, 2014).

Les modèles courants de qualité de l'air constituent des outils de prévision dont la performance est traditionnellement évaluée par comparaison à des observations via des analyses statistiques. Ces modèles peuvent être utilisés en mode prévision, c'est-à-dire pour modéliser un événement de pollution sans perturbation supplémentaire, ou alors en mode études d'impact (pour tester l'effet d'un paramètre d'entrée) ou encore en mode études de prospection (pour tester différentes stratégies de réduction des émissions par exemple). La variabilité de la météorologie étant attribuée à la prévision, tandis que les modifications des émissions ou d'autres paramètres maîtrisés sont relatives à la prospection et à l'impact (Thouron, 2017).

I. 3. 3. Décider

D'un point de vue général, les simulations numériques constituent de vrais outils d'aide à la décision pour les raisons citées plus hauts (section I.3), c'est-à-dire en termes de compréhension des phénomènes et de leur anticipation (grâce à l'utilisation des modèles).

Néanmoins, l'opérabilité des modèles numériques est un vrai challenge scientifique car un consensus doit être trouvé entre perfectibilité des modèles, temps de calculs et temps impartis pour décider. En effet, « décider » c'est aussi se placer sous plusieurs contraintes, dont notamment les délais de simulation, la puissance de calcul mise à disposition, la complexité de prise en main.

Les simulations en mode opérationnel ou diagnostique permettent d'avoir le recul et de comprendre plus en détail les niveaux de pollution afin de dégager des axes d'action pour les pouvoirs publics (Thouron, 2017).

I. 4. Echelles des circulations atmosphériques

Comme décrit par Malardel (2009), l'atmosphère subit plusieurs types d'excitations extérieures comme les variations cycliques du rayonnement solaire durant l'année, ou des excitations plus irrégulières et complexes comme les interactions avec la surface terrestre ou océanique. Il en

résulte une forte variabilité spatio-temporelle de l'état du fluide atmosphérique. Dans l'atmosphère excitée, des circulations se mettent en place et permettent un retour à l'équilibre. Ces circulations présentent un large champ d'échelles spatiales et temporelles: du millimètre à la taille de la planète, et de la seconde à plusieurs années (Malardel, 2009). D'après Stull (2000), les échelles de temps de la plupart des phénomènes sont approximativement proportionnelles aux échelles horizontales avec un coefficient proche d'1 s/m. Par exemple, dans la couche limite atmosphérique, les vents thermiques d'1 km de diamètre ont une durée de circulation de 15 min. Les cellules orageuses qui ont une taille de 10 km peuvent durer une demi-journée tandis que les perturbations cycloniques de l'ordre de 1000 km ont des durées de vie allant de quelques jours à quelques semaines (Stull, 2000).

Stull (1988) a proposé une classification des phénomènes atmosphériques en fonction de leur échelle spatio-temporelle comme montre la figure 05. Les échelles (larges) planétaires et synoptiques ne sont pas décrites dans ce schéma. L'échelle planétaire est caractérisée par une dimension spatiale de l'ordre de grandeur de 10 000 km (la circonférence de la terre représentant 4 fois cette valeur) et une dimension temporelle allant de plusieurs semaines à plusieurs années.

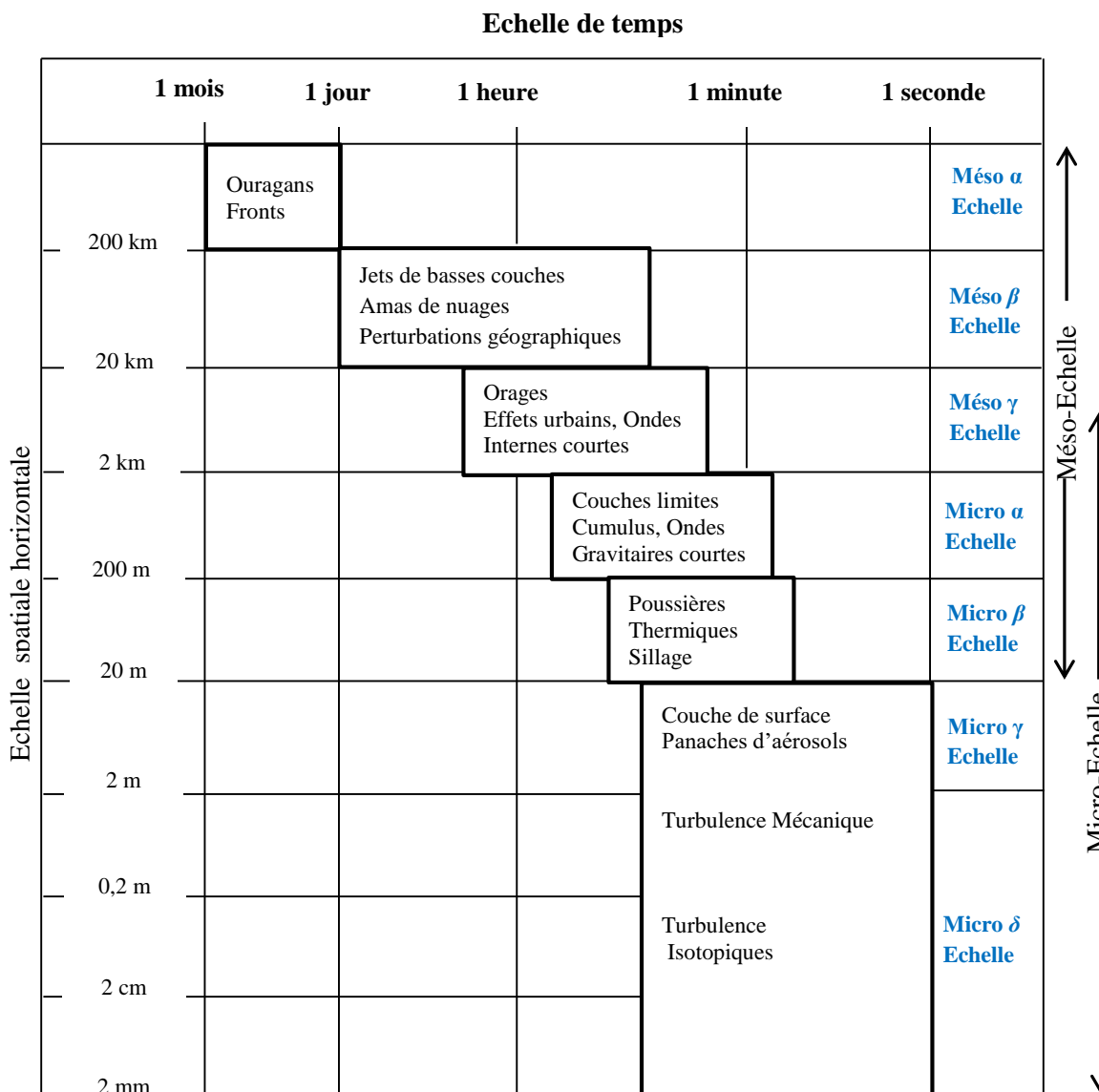


Fig. 05 Classification des phénomènes atmosphériques en fonction de leur échelle spatio-temporelle (Orlanski, 1975; Stull, 1988).

L'échelle synoptique a une dimension spatiale d'un millier de kilomètres et une dimension temporelle de plusieurs jours. Elle correspond aux circulations générées par l'intensité et la position des centres anticycloniques et dépressionnaires (comme les alizés).

La méso-échelle s'étend sur un espace horizontal allant de 200 km à plusieurs centaines de mètres et un espace temporel allant de quelques jours à la demi-heure. Plusieurs sous-échelles sont définies dans la méso-échelle : la méso- α (les cyclones et les fronts), la méso- β (les jets de basses couches, les amas de nuages), la méso- γ (les orages, les effets urbains) et la micro- α (les couches limites atmosphériques, les nuages cumuliformes).

Les phénomènes comme la turbulence, avec des échelles spatiales inférieures à 3 km et des échelles de temps inférieures à l'heure, sont classés dans la micro-échelle. La méso-échelle et la micro-échelle semblent confondues dans les sous-échelles : méso- et micro-.

Cette zone d'imbrication inclut les écoulements locaux de la couche limite atmosphérique (comme les brises de terre « mer et les écoulements catabatiques » anabatiques). Les études de pollution atmosphérique comme la dispersion de panaches de polluants s'appliquent aussi dans le domaine de la micro-échelle.

L'ensemble des phénomènes météorologiques sont bien classés dans des échelles d'espace et de temps, leur modélisation est donc simplifiée.

I. 5. Caractéristiques de la pollution urbaine

I. 5. 1. Émissions : sources, polluants, réglementations

La dispersion atmosphérique caractérise le devenir dans le temps et dans l'espace d'un ensemble de particules (aérosols, gaz, poussières) rejetées dans l'atmosphère.

L'émission d'un produit à l'atmosphère peut revêtir un caractère :

- Soit chronique, avec des émissions à l'atmosphère plus ou moins continues ou périodiques dans le temps. Les rejets sont les sous-produits indésirables de toute activité humaine, par exemple, les gaz d'échappement des voitures, les fumées d'usines, de chauffages urbains ou toute forme de pollution diffuse (émission de gaz issu d'une décharge...).
- Soit accidentel, avec des émissions à l'atmosphère ponctuelles dans le temps, non désirées comme la fuite d'une cuve ou un dégagement de fumées dû à un incendie.

En amont à la modélisation de la dispersion atmosphérique d'une substance, il convient généralement de quantifier un « terme source », c'est-à-dire de caractériser le rejet de la substance étudiée vers l'air en termes de débit, température, vitesse de sortie du gaz etc...

Les conditions de dispersion atmosphérique d'un produit vont dépendre de plusieurs paramètres :

- Les conditions de rejet (nature du nuage de produit, mode d'émission...);
- Les conditions météorologiques (champ de vent, de température...);
- L'environnement (nature du sol, présence d'obstacles, topographie...).

Les émissions sont géographiquement variables et restent liées à de nombreux critères spécifiques au territoire (degré d'urbanisation, densité des infrastructures routières, etc.).

Dans cette thèse nous nous intéressons aux émissions générées par le trafic routier, l'industrie, le résidentiel et les déchets domestiques. Nous nous focalisons dans ce paragraphe sur ces sources d'émission qui représentent une part importante des polluants émis en ville dans l'atmosphère. La figure 06 présente la contribution en millions de tonnes de CO₂ des différents secteurs d'activité aux émissions de polluants pour l'Algérie en 2012.

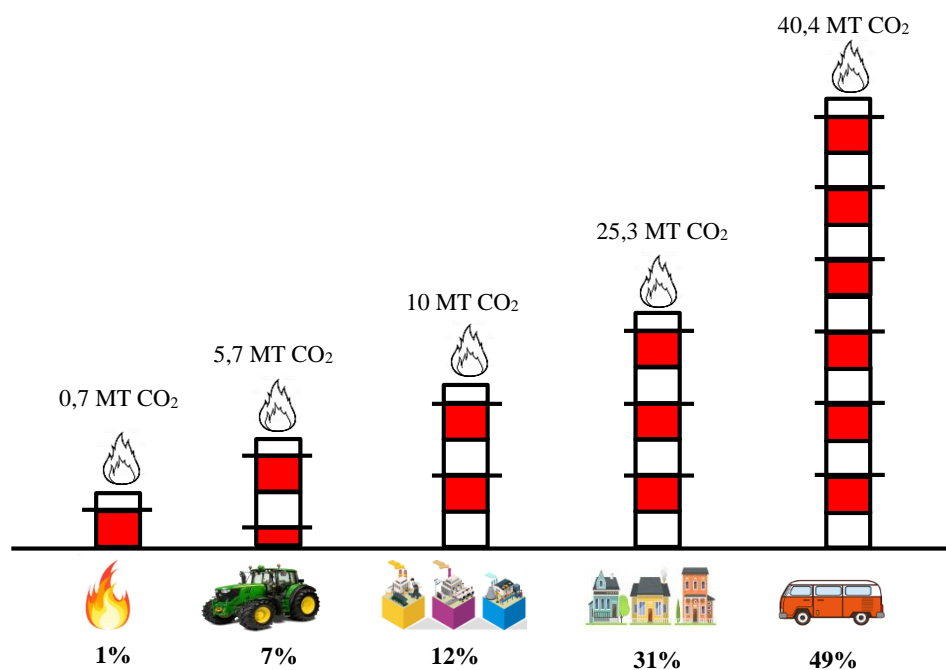


Fig. 06 Contribution en millions de tonnes de CO₂ des différents secteurs d'activité aux émissions de polluants pour l'Algérie en 2012 (APRUE, 2012).

En Algérie les concentrations en NO₂ suivent l'évolution du trafic routier qui est considéré comme la principale source de dioxyde d'azote dans l'agglomération urbaine (Kerbachi et al., 1998). Dans les villes, jusqu'à 80% de NO₂ provient du trafic routier (Toro et al., 2006). Tous les moteurs à explosion forment des oxydes d'azote durant leur fonctionnement. Cependant, les quantités émises sont différentes selon les moteurs, et le carburant utilisé.

La pollution par le secteur résidentiel à l'intérieur des locaux provient généralement des appareils domestiques de combustion (appareils de chauffage et de cuisson à gaz, appareils de chauffage au fioul etc...) et elle peut également être transféré de l'air extérieur par les systèmes de ventilation.

Les activités énergétiques (extraction et transformation) sont une source majeure d'émissions de NO₂. Ces émissions doivent cependant être considérées dans un contexte plus large qui doit prendre en compte la contribution des transformations physico-chimiques dans l'atmosphère (polluants secondaires) et celles du transport à longue distance (pollution de fond) (Thouron, 2017).

Les émissions des gaz par les déchets incluent les émissions imputables à la mise en décharge des déchets solides et à l'incinération des déchets et toute autre activité de gestion des déchets. Il faut noter qu'en Algérie, la contribution des déchets solides mis en décharge est la plus importante avec 85,34% des émissions dues aux déchets (MATE, 2001).

Les polluants réglementés dans l'air ambiant par les normes algériennes sont le dioxyde d'azote (NO₂), le dioxyde de soufre (SO₂), l'ozone (O₃) et les particules fines en suspension de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm (PM-10).

Les critères nationaux de qualité de l'air sont définis selon les recommandations des organismes internationaux tels que l'OMS dans 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 Janvier 2006 confie la surveillance de la qualité de l'air à l'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable (ONEDD) et donne et prévoit plusieurs seuils (Objectifs de qualité, valeur limite, seuil d'information et de recommandation et seuil d'alerte, Centile 98 et Centile 99,9) pour les polluants réglementés en Algérie (JORADP, 2006).

→ L'**Objectif de qualité** correspond au 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.

→ La **valeur limite** correspond au niveau maximal de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base de connaissances scientifiques.

→ Le **seuil d'information** correspond au niveau de concentration de 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.

→Le **seuil d'alerte** correspond au niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou pour l'environnement.

→Le **centile 98** correspond au pourcentage de valeurs de dépassement autorisé par année civile, soit 175 heures de dépassement autorisées par année civile de 365 jours.

→Le **centile 99,9** correspond au pourcentage de valeurs de dépassement autorisé par année civile, soit 24 heures de dépassement autorisées par année civile de 365 jours.

Décret exécutif N° 06-02 du 07 janvier 2006 définit les objectifs et les valeurs limites de la qualité de l'air comme montre le tableau 01.

Tab. 01 Normes algériennes de la qualité de l'air établis par le décret exécutif N° 06-02 du 07 janvier 2006.

Polluants	Normes en $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	Objectif de qualité	Valeur limite	Seuil d'information	Seuil d'alerte
Dioxyde d'azote	135	200	400	600
Dioxyde de soufre	150	350	350	600
Ozone	110	200	180	360
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 ou une exposition, même de courte durée, qui pourrait entraîner des effets négatifs sur l'homme ou sur l'environnement.

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 du Wali concerné de prendre toutes les mesures visant à protéger la santé humaine et l'environnement ainsi que les mesures de réduction/ou restriction des activités polluantes.

L'OMS qui a toujours considéré qu'il n'y a pas un seuil de sécurité en de ça du quel, il n'y aurait pas d'effets sur la santé, vient de promulguer de nouvelles recommandations dans sa très récente révision des normes (OMS, 2006). Chose intéressante ces nouvelles directives

s'adressent à toutes les régions du monde, alors que traditionnellement l'OMS établit des recommandations uniquement pour les pays d'Europe.

Le tableau 02 résume les normes et valeurs guides des PM-10 et de NO₂ en vigueur recommandées par l'OMS et l'Union Européen (UE).

Tab. 02 Valeurs limites des PM-10 et de NO₂ dans l'air recommandées par l'OMS et l'UE (OMS, 2006; EEA, 2011).

Normes de l'OMS de NO₂ en µg/m³		
Seuil d'information et de recommandations seuil d'alerte à la population aux personnes sensibles		
200 en moyenne horaire		
Valeur limites pour la protection de la santé humaine		
Moyenne horaire	Moyenne annuelle	Moyenne pour 24h
200 en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 18 heures par an	40 en moyenne annuelle	150 en moyenne journalière
Normes de l'OMS des PM-10 en µg/m³		
Moyenne annuelle	Moyenne pour 24h	
20	50	
Normes de l'UE de NO₂ en µg/m³		
Moyenne horaire	Moyenne annuelle	Moyenne pour 24h
200 en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 18 heures par an	40 en moyenne annuelle	200 en moyenne journalière
Normes de l'UE de PM-10 en µg/m³		
Moyenne annuelle	Moyenne pour 24h	
20	50 en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 7 fois par an.	

1. 6. Présentation des chapitres de la thèse

L'étude porte sur la wilaya d'Alger qui est une région particulière du pays de part le fait qu'elle est non seulement la capitale, mais aussi la plus importante du point de vue démographie, du point de vue trafic routier (le taux de motorisation est plus du double de la moyenne nationale), et où la plupart des administrations et des entreprises industrielles et commerciales sont domiciliés. Dans cette thèse, nous modélisons la pollution urbaine à Alger avec un modèle de chimie-transport de méso-échelle, The Air Pollution Model (TAPM), qui permet d'estimer les concentrations et la distribution spatiale et temporelle de polluants atmosphériques comme détaillé dans l'organigramme en figure 07.

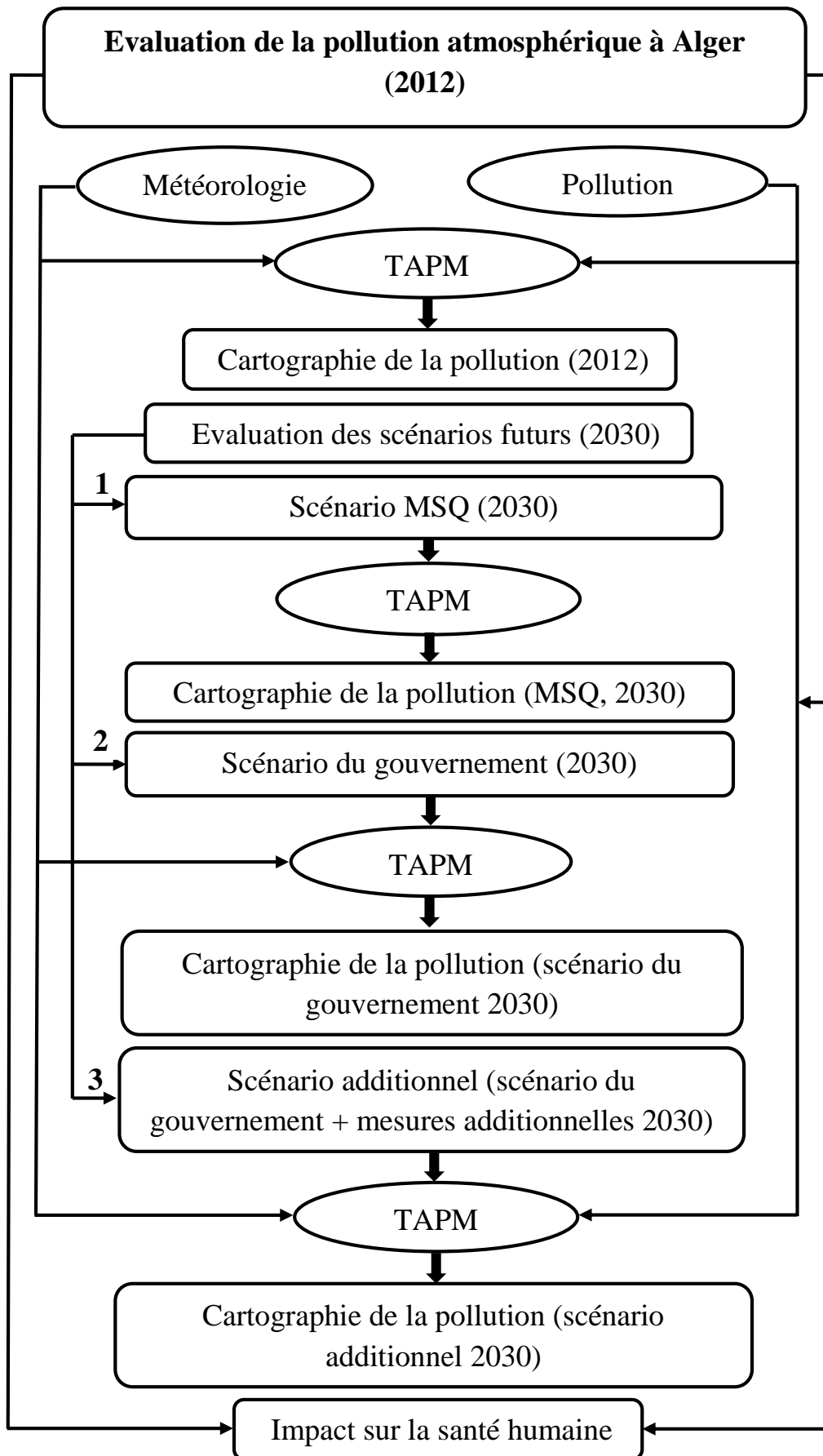


Fig. 07 Présentation de la démarche d'étude.

CHAPITRE I. Généralités sur la pollution de l'air en milieu urbain

Nos simulations concernent les polluants PM-10 et NO₂ issus de différents secteurs dans la région d'Alger.

Dans une première partie, notre étude porte sur la modélisation de la météorologie et de la pollution à Alger pour l'année 2012 en utilisant le modèle TAPM.

Les résultats de la simulation météorologique sont comparés par la suite avec les données mesurées par la station météorologique. Tandis que les résultats de la simulation de la pollution sont, par manque des données mesurées, comparés avec les moyennes annuelles mesurées dans les années antérieures à 2012 par le réseau de la surveillance de la qualité de l'air Samasafia.

Cette étape de modélisation permet de distinguer les concentrations et les zones de distribution de polluants atmosphériques dans la zone d'étude.

Nous étudions dans une deuxième partie les prévisions futures de la pollution par les mêmes polluants atmosphériques et pour la même zone d'étude à l'horizon 2030, par l'évaluation d'une part, de trois scénarios districts de pollution et d'autre part, par l'estimation de la mortalité totale de la population pour chaque cas d'étude.

Ce travail est à notre connaissance, la première simulation des PM-10 et du NO₂ avec une fine résolution spatiale (1 km x 1 km) sur la région d'Alger. Il correspond également à une étude de cas illustrant la distribution spatiale et temporelle de polluants en milieu urbain, afin de pouvoir dégager des recommandations pour la réduction de la pollution atmosphérique issue des différents secteurs à Alger.

CHAPITRE II.

Méthodologie et outils de simulation

CHAPITRE II. Méthodologie et outils de simulation

II. 1. Modélisation de la dispersion atmosphérique

L'un des buts de la modélisation de la dispersion atmosphérique est d'obtenir une estimation cartographiée des concentrations de substances gazeuses ou particulaires dans l'atmosphère, suffisamment précise et représentative des conditions réelles, dans le temps et dans l'espace. Afin d'estimer ces concentrations, des données d'entrée doivent être fournies aux modèles, telles que les variables météorologiques et les émissions, ou encore les conditions aux limites du domaine d'étude. Certaines catégories de modèles de chimie-transport ne produisent pas leurs propres données météorologiques, il faut donc les leur fournir (de même que les émissions), sur le domaine de modélisation durant la période que l'on souhaite simuler, à partir des modèles numériques météorologiques. On parle généralement de modèles off-line, la météorologie est une donnée d'entrée qui n'est pas influencée par le calcul des concentrations (Michelot, 2014).

Pour choisir le modèle qui sera adapté à une problématique et à l'application voulue (recherche, risque industriel, qualité de l'air urbain, transport de pollution longue distance), il convient de combiner plusieurs critères de sélection, les principaux sont les suivants :

- L'échelle spatiale ;
- L'échelle temporelle ;
- La complexité du site : a-t-on affaire à un paysage plus ou moins hétérogène ? Le relief est-il marqué (cuvette, vallée, gorges, fortes pentes) ? L'occupation des sols varie-t-elle (forêt, prairie, surface goudronnée) ? Y a-t-il présence de nombreux bâtiments alignés (rue canyon) ou d'un obstacle particulier (remblai d'une voie ferrée) ? ;
- Les types de polluants : est-il question de gaz ou particules, de polluants primaires ou secondaires qui résultent de réactions chimiques plus ou moins complexes ? ;
- La nature des sources : sont-elles ponctuelles (four d'une cimenterie), routières ou diffuses (habitat) ? ou – généralement – multiples ? (Michelot, 2014).

II. 2. Modèle utilisé

Les modèles de pollution de l'air qui peuvent être utilisés pour prédire les concentrations de pollution heure par heure pour des périodes allant jusqu'à un an, sont généralement des approches semi-empiriques / analytiques basées sur des panaches gaussiens ou des bouffées.

Ces modèles utilisent généralement soit un fichier météorologique en surface simple, soit un modèle de champ de vent de diagnostic basé sur les observations disponibles.

Le modèle TAPM est différent de ces approches dans la mesure où il résout des approximations de la dynamique fondamentale des fluides et des équations de transport scalaire pour prédire la météorologie et la concentration de polluants pour les applications de pollution atmosphérique.

Le TAPM conçu par le Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO, <http://www.dar.csiro.au/tapm>), Australie (Hurley et al., 2001), prédit la météorologie et la dispersion des polluants atmosphériques provenant de différentes sources. Il simule le transport, la diffusion, les dépôts secs et humides depuis des sources de pollution qu'elles soient ponctuelles, linéaires, surfaciques ou volumiques. Le modèle TAPM est utilisé sous licence par plus de 240 utilisateurs nationaux et internationaux dans 28 pays.

Le TAPM est constitué de composantes de concentration météorologique pronostique et de concentration de la pollution de l'air, ce qui élimine le besoin d'observations météorologiques spécifiques au site. Au lieu de cela, le modèle prédit les flux importants pour la pollution de l'air à l'échelle locale, tels que les brises marines et les écoulements induits par le terrain, dans un contexte de météorologie à grande échelle fourni par des analyses synoptiques.

La composante météorologique du TAPM est un modèle d'équation primitive incompressible, non hydrostatique, avec une coordonnée verticale suivant le terrain pour les simulations tridimensionnelles. L'architecture globale du modèle TAPM est présentée en figure 08.

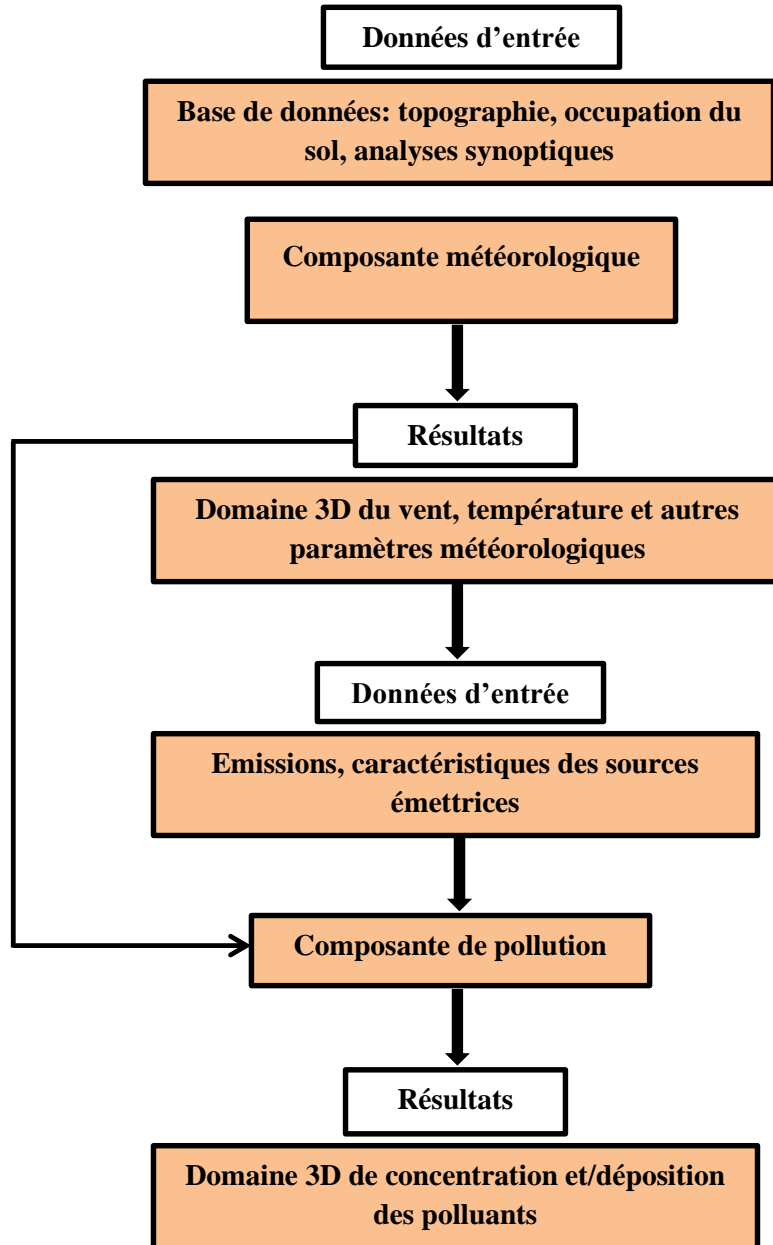


Fig. 08 Représentation schématique du modèle TAPM (Hurley et al., 2001).

Les processus microphysiques explicites des nuages sont inclus. Les termes de turbulence dans ces équations ont été déterminés en résolvant des équations d'énergie cinétique de turbulence et de vitesse de dissipation des turbulences, puis en utilisant ces valeurs pour représenter les flux verticaux par une approche de diffusion en gradient, y compris les termes contre-gradient. Un couvert végétal, un schéma de sol et un schéma urbain sont utilisés à la surface, tandis que des flux radiatifs, à la surface et aux niveaux supérieurs, sont également inclus.

La composante de la pollution atmosphérique du TAPM, qui utilise la météorologie et la turbulence prévues de la composante météorologique, comprend quatre modules. Le Module

Eulerian Grid (EGM) résout les équations pronostiques de la moyenne et de la variance de la concentration. Le Module de Particules lagrangiennes (LPM) peut être utilisé pour représenter plus précisément la dispersion proche de la source. Le module Plume Rise est utilisé pour prendre en compte les effets de la dynamique du panache et de la flottabilité pour les sources ponctuelles. Le Building Wake Module permet l'augmentation et la dispersion du panache pour inclure les effets de sillage sur la météorologie et la turbulence.

En mode chimie, il y a dix réactions pour treize espèces: réactivité de smog (R_{smog}), radicaux de combustion (RC), peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), monoxyde d'azote (NO), dioxyde d'azote (NO_2), ozone (O_3), dioxyde de soufre (SO_2), carbone organique stable non gazeux (COSNG), produits azotés stables gazeux (NSG), produits azotés stables non gazeux (NSNG), produits soufrés stables non gazeux (SSNG) et plus particules en suspension dans l'air (APM) et les matières particulaires fines (FPM), qui comprennent les concentrations de particules secondaires constituées de (COSNG), (NSNG), et (SSNG) (voir tableau 03).

Tab. 03 Mécanismes des réactions photochimiques (ensemble de réactions génériques) (Hurley, 2008).

Reactions	Taux de réactions
$R_{smog} + hv \longrightarrow RC + R_{smog} + \eta SNGOC$	$R_1 = k_1 [R_{smog}]$
$RC + NO \longrightarrow NO_2$	$R_2 = k_2 [RC] [NO]$
$NO_2 + hv \longrightarrow NO + O_3$	$R_3 = k_3 [NO_2]$
$NO + O_3 \longrightarrow NO_2$	$R_4 = k_4 [NO] [O_3]$
$RC + RC \longrightarrow RC + \alpha H_2O_2$	$R_5 = k_5 [RC] [RC]$
$RC + NO_2 \longrightarrow SGN$	$R_6 = k_6 [RC] [NO_2]$
$RC + NO_2 \longrightarrow SNGN$	$R_7 = k_7 [RC] [NO_2]$
$RC + SO_2 \longrightarrow SNGS$	$R_8 = k_8 [RC] [SO_2]$
$H_2O_2 + SO_2 \longrightarrow SNGS$	$R_9 = k_9 [H_2O_2] [SO_2]$
$O_3 + SO_2 \longrightarrow SNGS$	$R_{10} = k_{10} [O_3] [SO_2]$

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 (Hurley, 2008).

Le modèle 3D et la version la plus utilisée et la plus couteuse. 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). Le modèle comprend également des réactions photochimiques en phase gazeuse basées sur l'ensemble de réaction générique, des réactions chimiques en phase gazeuse et aqueuse pour le dioxyde de soufre et des particules et un mode de poussière pour les particules totales en suspension ($PM_{2,5}$, PM_{10} , PM_{20} et PM_{30}). Les effets de dépôt humides et secs sont également inclus.

La taille du domaine du modèle horizontal est limitée à moins de 1500 km x 1500 km, car les équations du modèle négligent les fuseaux horaires, la courbure de la terre et supposent un espacement uniforme de la distance dans le modèle (Hurley, 2008).

II. 3. Domaine de simulation

Dans le but de simuler la météorologie et la pollution, nous avons utilisé trois domaines (D01, D02, D03), avec des résolutions respectives en km: 10, 3, 1. La figure 09, représente les domaines imbriqués de simulation avec le modèle TAPM.

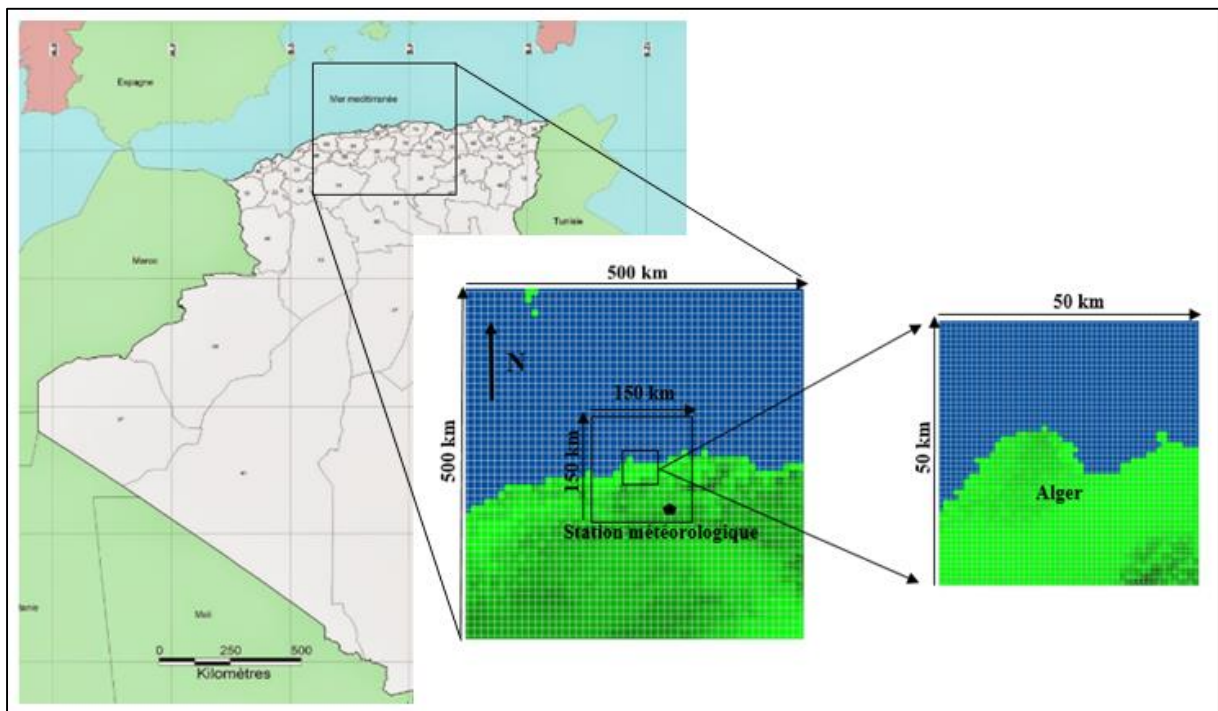


Fig. 09 Domaines imbriqués de simulation avec le modèle TAPM.

Le premier domaine D01 qui couvre une grille de 500 x 500 km inclut le nord algérien. Le domaine D02 qui couvre une grille de 150 x 150 km englobe la région allant de Chlef à l'ouest de Bejaia à l'est, de Médéa et Bouira au sud et la mer méditerranée au nord. Le dernier domaine

de plus basse résolution D03 couvre une grille de 50 x 50 km présentant la région d'Alger et quelques municipalités de la Wilaya de Blida. C'est ce domaine D03 qui représente notre zone d'étude.

II. 4. 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 caractérisées par le massif de Bouzareah 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 comme illustre la figure 10. Dans l'arrière-pays se dressent les montagnes de l'Atlas tellien.

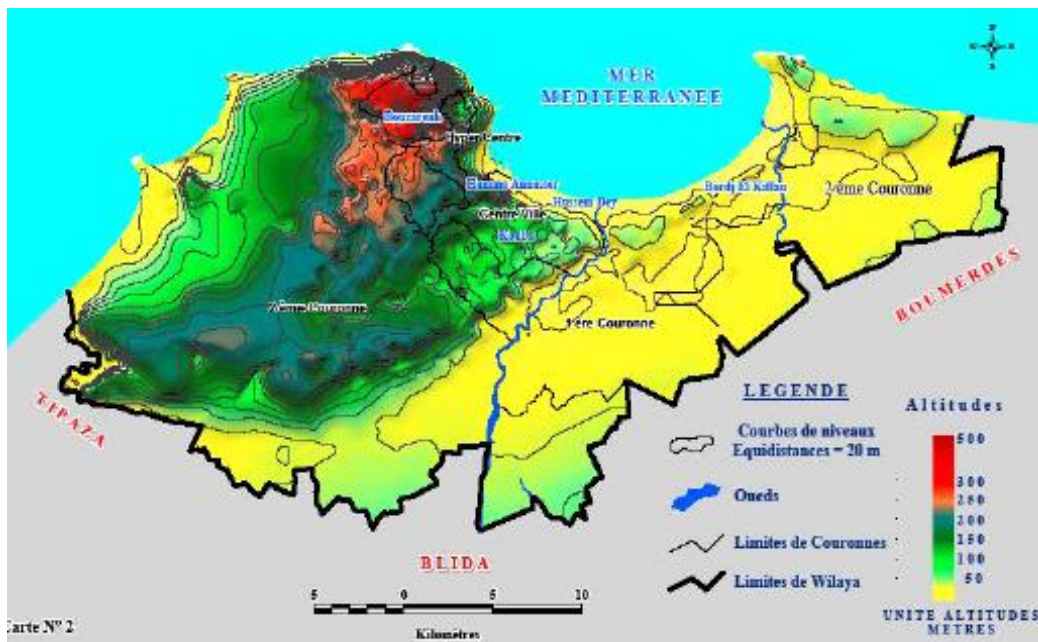


Fig. 10 Relief de la wilaya d'Alger (Safar Zitoun and Tabti-Talamali, 2009).

Alger est la capitale du pays, elle concentre les fonctions de commandement et de pouvoir politique, mais elle 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.

Le choix de concentrer l'analyse sur le territoire administratif de la wilaya d'Alger, pour des commodités relatives à la disponibilité des séries statistiques, n'exclut pas pour autant, quand les données chiffrées et ordres de grandeurs nous paraîtront significatifs, de convoquer des

arguments montrant l'amplitude des mobilités à l'échelon régional (Safar Zitoun and Tabti-Talamali, 2009). Au recensement de 2008, la population de la wilaya d'Alger comptait 3 millions habitants dans un territoire d'une superficie de 809,22 km². Selon ONS (ONS, 2017), la population a augmenté à 3,7 millions habitants en 2012.

La wilaya d'Alger comporte 57 communes regroupées en 13 circonscriptions administratives issues du découpage administratif du 2 août 1997 ayant intégré à la wilaya des circonscriptions administratives (communes) relevant antérieurement des wilayas limitrophes de Tipaza, Blida et Boumerdes, caractérisées par leur très faible densité de peuplement par rapport à celles de la wilaya d'Alger (Safar Zitoun and Tabti-Talamali, 2009).

II. 5. Cadastre des émissions

La prévention dans le domaine de la pollution atmosphérique nécessite une connaissance parfaite des principales sources de polluants atmosphériques dans les principales zones d'étude, via l'élaboration d'inventaire d'émissions et des cartographies, matières nécessaires pour la modélisation (voir figure 11).

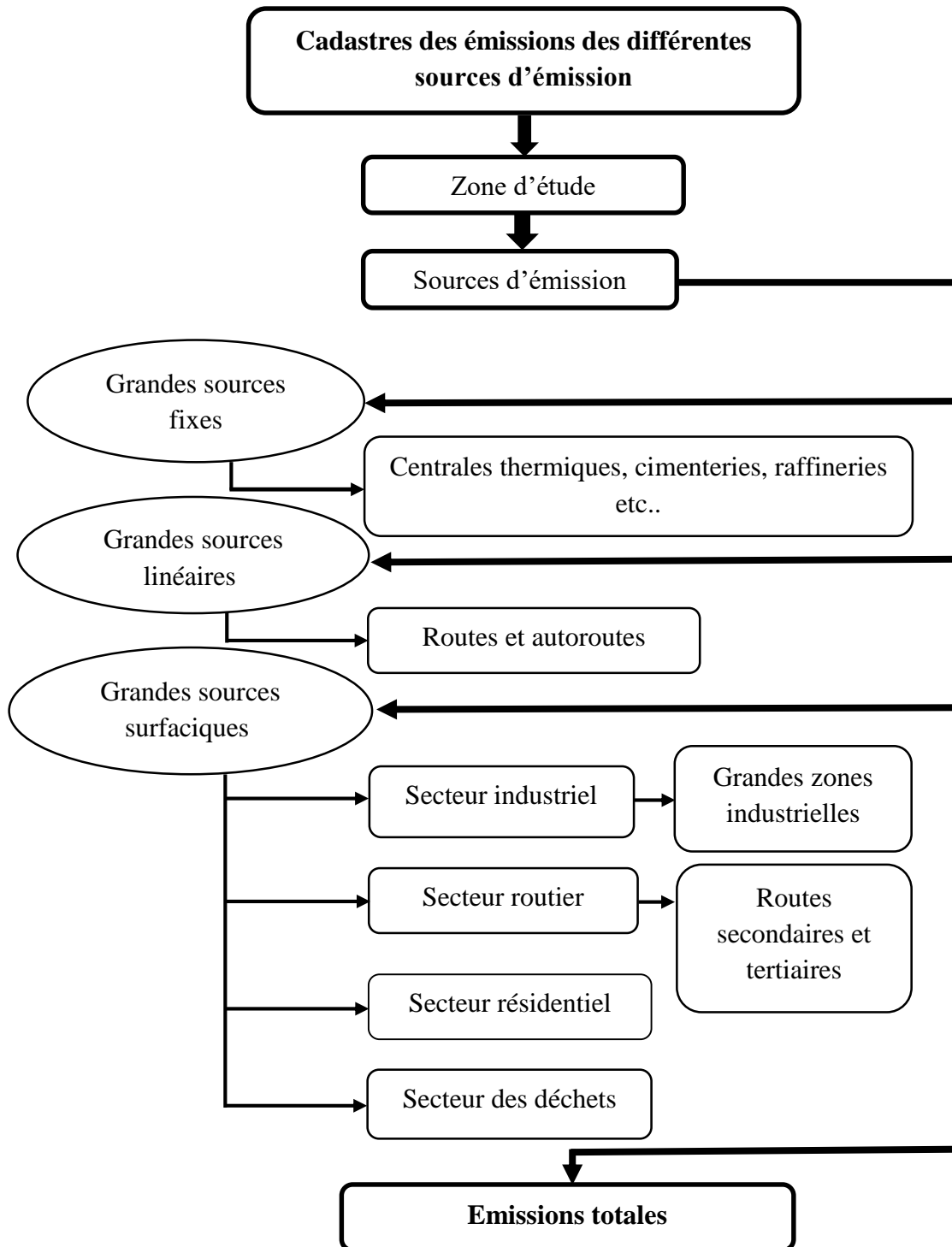


Fig. 11 Représentation schématique du cadastre des émissions.

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. Ce travail s'intéressera surtout aux émissions issues du trafic routier, de l'industrie, du résidentiel et de la combustion des déchets.

La classification des sources d'émission est faite selon la classification SNAP (Selected Nomenclature for sources of Air Pollution) de la méthodologie CORINAIR (CORE Inventory of AIR émissions) initiée par l'Union Européenne (EEA, 2016).

Le cadastre des émissions issues de ces différents secteurs permet de déduire à l'aide du modèle TAPM, les concentrations des polluants avec une répartition spatiale et temporelle.

II. 5. 1. Polluants choisis

Dans notre pays, le problème de la pollution atmosphérique en milieu urbain se pose à toutes les villes, mais il l'est encore plus pour le cas de l'agglomération d'Alger.

En 2012, la ville d'Alger abritait plus d'un million de véhicules et sa population croit fortement, elle compte pour la même année environ 3,7 millions d'habitants, de plus, Alger compte un nombre important des unités industrielles, ce qui induit de très fortes émissions de polluants atmosphériques comme les PM-10 et le NO₂.

Alger a été certes d'équipée en 2003 d'un réseau de surveillance de quatre stations de mesure comme mentionné auparavant, malheureusement, ces stations ont connu divers de problèmes de maintenance et d'étalonnage et sont à l'arrêt depuis 2009.

Face à cette situation, on s'est intéressé dans ce travail à l'évaluation de la pollution de l'air par les PM-10 et le NO₂ dans la région d'Alger. L'objectif étant d'identifier les zones à forte pollution, qui doivent faire l'objet d'une surveillance accrue. Le choix de ces deux polluants est dicté, d'une part, par le fait qu'ils sont de très bons indicateurs de la qualité de l'air et d'autre part, en raison de l'ampleur des quantités émises et leurs effets négatifs sur l'homme et l'environnement. De plus, les PM-10 et le NO₂ sont des polluants réglementés en Algérie.

II. 5. 2. Principe d'estimation des émissions

Il existe deux façons d'accéder aux émissions atmosphériques des polluants :

- La mesure des flux rejetés par les cheminées ou tous autres types de rejets (émissions diffuses et fugitives).

La mesure est principalement utilisée pour les sources fixes les plus importantes telles que les centrales thermiques, les cimenteries, les raffineries, etc...

- Le calcul en utilisant un facteur d'émission sur le modèle ci-dessous (IPCC, 2006):

$$\text{Emission}_{i,j} = \text{Facteur d'émission}_{i,j} \times \text{Taux d'activité}_j \quad (1)$$

- L'émission i,j traduit la quantité du polluant i rejetée par an par une activité j ;
- Le facteur d'émission i,j est la quantité de polluant i qui est rejetée dans l'air par l'activité j par unité de matière traitée ou produite (par exemple en tonnes ou en litres) ou par quantité d'énergie consommée (GWh par exemple).
- Le taux d'activité j est la quantité annuelle de matière traitée ou produite, ou la quantité annuelle d'énergie consommée par l'activité j .

Il est classique, lorsqu'on entreprend un cadastre des émissions, de classer les sources d'émissions en trois catégories comme indiqué en tableau 04.

Tab. 04 Répartition des types de sources d'émission.

Types de sources	Sources fixes	Sources linéaires	Sources surfaciques
Centrales thermiques	X		
Cimenteries	X		
Raffineries	X		
Verreries	X		
Autoroutes, routes nationales...		X	
Trafic routier secondaire et tertiaires			X
Emissions résidentielles			X
Zones industrielles			X
Décharges publiques			X

Les grandes sources fixes: Il s'agit de sources fixes d'émission qui sont suffisamment importantes pour pouvoir être individualisées et collecter toutes sortes d'informations nécessaires. Par exemple, une cimenterie, une centrale électrique, une raffinerie, etc....

Les grandes sources linéaires: Comme précédemment, il s'agit de sources fixes d'émission par des véhicules automobiles qui sont suffisamment importantes pour être individualisées et collecter toutes sortes d'informations nécessaires.

Les sources surfaciques: Elles regroupent toutes les sources qui, de par leur taille et/ou leur nombre, ne peuvent pas être individualisées dans des conditions raisonnables. Par exemple, les

zones industrielles, les activités domestiques, le trafic routier secondaire effectué dans le réseau secondaire, etc.

Il est évident que plus il sera possible de faire passer des sources de l'état sources surfaciques à l'état des sources fixes ou des sources linéaires, plus l'estimation des émissions pourra être précise puisque plus on aura des informatisées individualisées. Mais une telle opportunité est loin d'être rencontrée dans beaucoup de cadastres.

Les émissions globales constituent alors la somme des émissions des sources fixes, des grandes sources linéaires et des sources surfaciques.

II. 6. Estimations des émissions

II. 6. 1. Emissions des grandes sources fixes

En matière de modélisation de la dispersion atmosphérique, les émissions de polluants par les grandes sources industrielles sont évidemment de première importance au même titre que le trafic routier.

Dans la zone d'étude, les grandes sources fixes industrielles que nous avons identifiées sont: les centrales thermiques (Port d'Alger, Hamma, Boufarik, Arbaa), la raffinerie de Baraki, les cimenteries de rais Hamidou et de Meftah et l'usine de verre plat de Cevital. Ces sources industrielles fixes émettent des polluants atmosphériques à travers leurs cheminées.

La figure 12 présente le positionnement des sources fixes industrielles dans le modèle TAPM. Les sources industrielles fixes retenues ont été choisies selon leur hauteur de cheminée qui est supérieure à 60 m et qui sont susceptibles de dégager des émissions atmosphériques.

Le tableau 05 résume les valeurs des paramètres pour chaque point d'émission ayant servi à la modélisation.

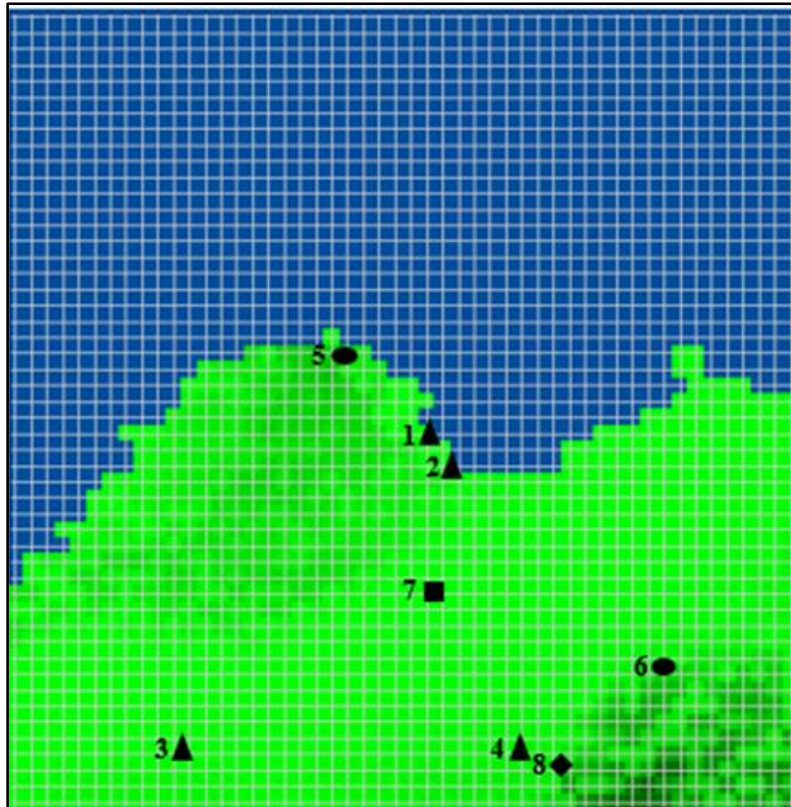


Fig. 12 Positionnement des point de sources: Centrales thermiques (1: Port d'Alger, 2: Hamma, 3: Boufarik, 4: Arbaa), Cimenteries (5: Rais Hamidou, 6: Meftah), Raffinerie (7: Baraki), Usine du verre plat (8 : Cevital).

Tab. 05 Valeurs des paramètres d'émission pour les grandes sources fixes.

Type de source	Non de sources	Production annuelle Pour 2012	Température de sortie du gaz (degrés K)	Vitesse de sortie du gaz (m/s)	Hauteur de cheminée (m)	Diamètre de cheminée à la sortie r(m)
Centrales thermiques	1 Port d'Alger	548 (GWH)	397	9,71	65	1,75
	2 Hamma	1854 (GWH)	439	14,35	83	1,95
	3 Boufarik	340 (GWH)	410	13,42	61	1,55
	4 Arbaa	731 (GWH)	399	11,43	62	1,6
Raffinerie	5 Baraki	3,65 (Mton)	468	16,97	95	2,8
	6 Rais Hamidou	150 (Kton)	382	14,98	62	1,6
Cimenteries	7 Meftah	1060 (Kton)	397	13,81	60	2
	8 Cevital	219 (Kton)	310	9,87	85	2
Usine du verre plat						

Les valeurs caractéristiques sont basées sur des mesures effectuées dans des installations similaires, sur des valeurs fournies par les industriels (mais cela n'est malheureusement pas toujours possible) ou sur des valeurs relevées dans la littérature. Les conditions à l'émission incluront tous les équipements d'épuration des gaz et des particules pour quelques industries.

Les facteurs d'émissions utilisés pour le calcul des émissions sont des facteurs d'émissions liés à la combustion (Annexe 1).

II. 6. 2. Emissions des grandes sources linéaires

On rappelle que les Grandes Sources Linéaires (GSL) sont des sources fixes d'émission de polluants produits par la circulation automobile. Ces sources sont jugées suffisamment importantes pour être individualisées et pouvoir collecter, à leur sujet, toutes sortes d'informations nécessaires. Il s'agit par exemple de tronçons d'autoroute, de tronçons de routes, de tronçons d'avenues, etc...

Une étude effectuée au sein de l'Université de Blida en Algérie, a réalisé l'inventaire des émissions polluantes issues du trafic routier en Algérie de 1962-2025 (LEPA, 2008), pour l'ensemble des types de véhicules à l'aide des mesures de Copert III (Computer Program to calculate Emission from Road Transport) (Ntziachristos and Zissis, 2000). Cet inventaire est basé sur des enquêtes effectuées sur terrain et constitue un outil fondamental pour les études d'impact sur l'environnement et la santé de la population, la gestion du trafic en milieu urbain et ainsi que le développement de stratégies et de politiques de transport routier.

Cette base de données du parc de véhicules routiers algérien est élaborée avec les paramètres de son usage tel que le kilométrage annuel par catégorie de véhicule, les vitesses pratiquées par type de voie, les facteurs d'émission unitaires par catégorie de véhicule et la part de kilométrage par type de voie.

A partir de cette étude nous avons appliqué les émissions issues du trafic routier correspondant à un parc roulant national d'environ 3 millions de véhicules pour l'année 2012 (année d'étude).

En 2012, l'ONS a relevé qu'environ 26% du parc national automobile était concentrée dans la Wilaya d'Alger ce qui représente un 1/4 du nombre de voitures totales circulent dans le pays, largement devant Blida, Oran, Tizi Ouzou (ONS, 2017), par conséquent, environ 26% des émissions globales des PM-10 et de NO₂ sont estimées pour la même région.

Les émissions du trafic routier sont considérées comme grandes sources linéaires (tronçons d'autoroutes et de tronçons de routes) ou bien sources surfaciques (routes secondaires et tertiaires) sur la région d'Alger.

Selon le Ministère des Travaux Publics et du Transport, Algérie (MTPT, 2017), la distribution du flux de véhicules pour les grandes sources linéaires est utilisée comme une clef de répartition des émissions comme indiqué au tableau 06.

Tab. 06 Distribution du flux de véhicules sur les grandes sources linéaires (MTPT, 2017).

Différents types de routes	Taux de flux de véhicules (%)
Autoroute rocade du sud : Dar El Beida-Ben Aknoun-Zéralda	8,5
Autoroute : Boudouaou-Dar El Beida- Blida	6,5
Route moutonnaire : Dar El Beida-Alger centre	5
Bir Khadem-Birtouta	4
Birtouta-Zeralda	2
Routes secondaires et tertiaires	74

Les tronçons d'autoroutes et de tronçons de routes ont été introduits comme des grandes sources linéaires, les longueurs des tronçons et la distribution des émissions correspondantes ont été déterminées à l'aide du Système d'Information Géographique (SIG).

La figure 13 illustre le positionnement des émissions des grandes sources linéaires utilisées comme entrée dans le modèle TAPM.

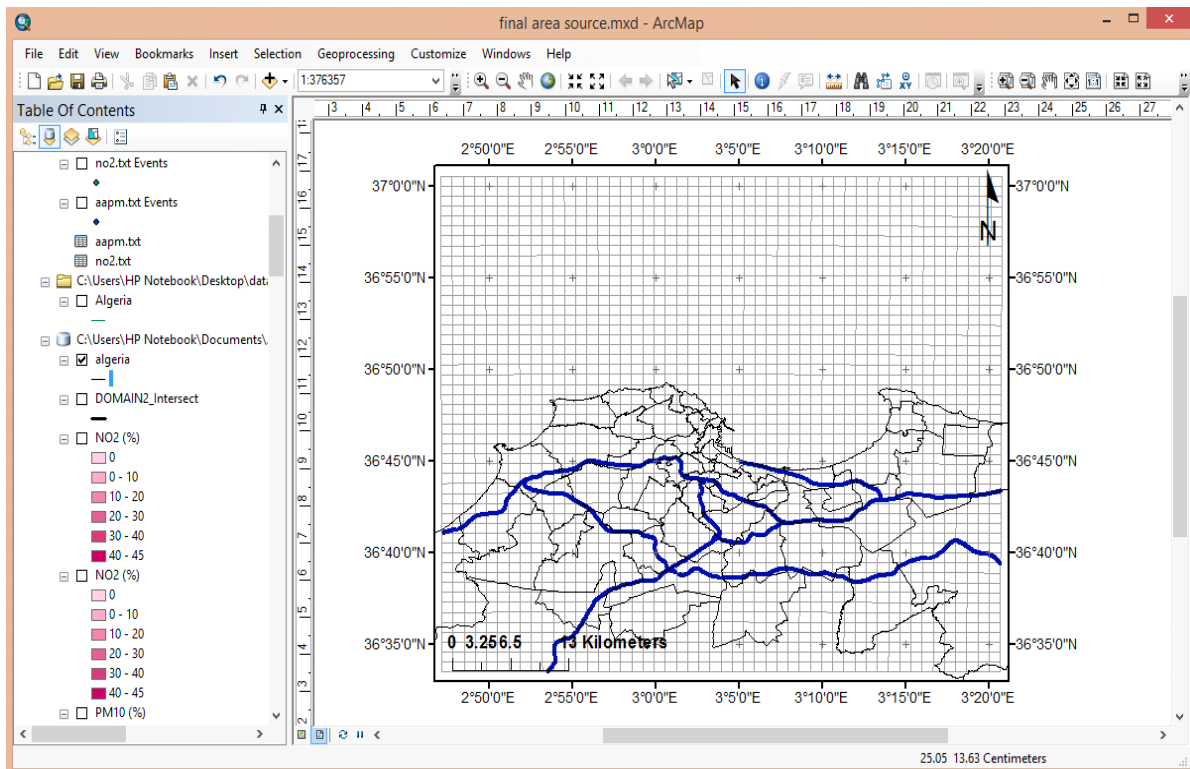


Fig. 13 Positionnement de grandes sources linéaires.

Pour chaque maille on crée des jointures entre la couche route et les tables contenant les valeurs d'émissions pour les PM-10 et le NO₂.

II. 6. 3. Emissions surfaciques

Les sources surfaciques utilisées dans le présent travail regroupent les quatre types d'émissions suivants:

- Emissions du secteur résidentiel;
- Emissions du trafic routier pour les routes secondaires et tertiaires;
- Emissions des zones industrielles;
- Emissions des décharges publiques.

II. 6. 3. 1. Emissions surfacique du secteur résidentiel

Le découpage territorial actuel de la Wilaya d'Alger est devisé en quatre zones, en fonction d'un critère de densité de peuplement (L'hyper centre-ville, le centre-ville, les 1ere et 2eme couronnes), à partir des données du recensement de 1998 actualisées par l'ONS pour l'année 2004. Ce découpage permet de tenir compte de l'évolution des dynamiques urbaines, en particulier du phénomène d'extension des zones périphériques situées à l'est de l'agglomération, le long de la côte orientale de la baie qui a connu un boom immobilier entre 1990 et 2004, à l'instar de l'axe « Centre-ville - Les Eucalyptus », principal réceptacle de l'urbanisation non réglementaire ([Safar Zitoun and Tabti-Talamali, 2009](#)).

La population urbaine Algéroise représentait 97,04% de la population totale de la Wilaya. L'hyper centre-ville supporte une densité de 33695 hab./km², le centre-ville a une densité de 15924 hab./km² alors que cette densité s'estompe nettement dans les 1ere et 2eme couronnes à 7235 et 2587 hab./km² respectivement ([Safar Zitoun and Tabti-Talamali, 2009](#)).

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, ainsi que l'utilisation d'équipements électriques. 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.

L'inventaire EMEP (European Monitoring and Emission Program) qui regroupe les émissions anthropiques et biogéniques pour l'ensemble de l'Europe ([Vestreng, 2003](#)), 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. La figure 14, présente la grille des émissions du cadastre EMEP.



Fig. 14 Grille des émissions du cadastre EMEP (Mailles 50 km x 50 km) (EMEP, 2017).

On ne dispose d'aucune donnée sur les émissions du secteur résidentiel en Algérie et à Alger particulièrement, On propose donc d'utiliser les données d'émission provenant de l'EMEP dont le domaine inclut la région d'Alger (EMEP, 2017).

II. 6. 3. 2. Emissions surfaciques du trafic routier

Les émissions surfaciques du trafic routier sont produites par la circulation dans le réseau secondaire et tertiaire de routes et de rues. Ces émissions sont la différence entre les émissions globales du trafic routier et les émissions par les grandes sources linéaires.

Les émissions surfaciques dues au trafic représentent environ 74% des émissions totales du trafic routier (tableau 06). Ces émissions sont par la suite réparties en utilisant la population comme une clef de répartition. La distribution des flux, pour les voies de type urbain est basée sur la densité du réseau routier qui correspond en grande partie à la densité de la population.

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.

Les routes urbaines situées dans le centre et l'hyper-centre connaissent un flux de véhicules différents par rapport aux routes urbaines situées dans la première et la 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.

La distribution des flux, pour les voies de type urbain est basée sur la densité du réseau routier qui correspond en grande partie à la densité de la population.

II. 6. 3. 3. Emissions surfaciques du secteur industriel

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'activités (APPL, 2003).

Dans la présente étude, on s'intéresse uniquement aux émissions des zones industrielles. La surface de ces zones nous permet de déduire des clés de la répartition spatiale des émissions liées aux activités industrielles.

Tab. 07 Clés de répartition des émissions des zones industrielles à Alger en fonction de la surface de chaque zone.

Zones industrielles	Surface (Ha)	Taux
El Harrach	78,00	4,73
Oued Smar +Extension	400,00	24,27
Rouiba-Reghaia	1000,00	60,68

Les émissions de NO₂ dues au secteur industriel, sont tirées de la référence Sahnoune et al. (2016) pour l'année 2012.

Tab. 08 Emissions du NO_x (10⁺³ ton) en Algérie (Sahnoune et al., 2016).

Zones industrielles	2008	2012
Processus industriel	1,942	1,676

Comme pour les émissions du secteur résidentiel, et en l'absence de données nationales, les émissions des PM-10 provenant du secteur industriel sont tirées de l'EMEP (European Monitoring and Emission Programm) (EMEP, 2017).

II. 6. 3. 4. Emissions surfaciques des déchets domestiques

En Algérie, le devenir des déchets domestiques est double: d'une part la mise en décharge contrôlée et d'autre part le dépôt plus ou moins sauvage appelé décharge sauvage. Dans ces décharges sauvages, une part importante des déchets est brûlée sans contrôle ; l'autre partie subit une dégradation anaérobie plus ou moins poussée. Le brûlage produit des polluants (SO₂, NO_x, COVNM, CO et poussières). Le dépôt contrôlé ou sauvage produit du méthane.

L'élimination des déchets en Algérie comprend les opérations suivantes: le déversement en décharges (46%), l'enfouissement (36%), le recyclage (10%), autres (7%) et le compostage (1%) ([SWEEP-Net.GIZ, 2014](#)).

La région d'Alger dispose de plusieurs décharges publiques, où se produit la combustion des déchets. En 2012, le centre d'enfouissement technique d'Ouled Fayet (40 ha), accueillait 70% de la capacité totale des déchets domestiques de la wilaya d'Alger. Il reçoit les déchets de plus de 34 communes des wilayas d'Alger et de Tipaza. La quantité de déchets enfouis est de 800 tonnes/jour en 2012, contre 72 tonnes/jour lors de son ouverture en 2001. Cette quantité a augmenté ces dernières années en raison de plusieurs facteurs notamment: l'augmentation de la population, la fermeture de la décharge d'Oued Smar et d'autres décharges au niveau communal ([Djemaci and Ahmez Zaid-Chertouk, 2011](#); [SWEEP-Net.GIZ, 2014](#)).

Les facteurs d'émission de polluants dans le cas de la mise en décharge et le brûlage sauvage des déchets sont tirés de la référence ([EEA, 2016](#)) voir (Annexe 1).

La répartition spatiale des sources d'émissions surfacique est illustrée en figure 15.

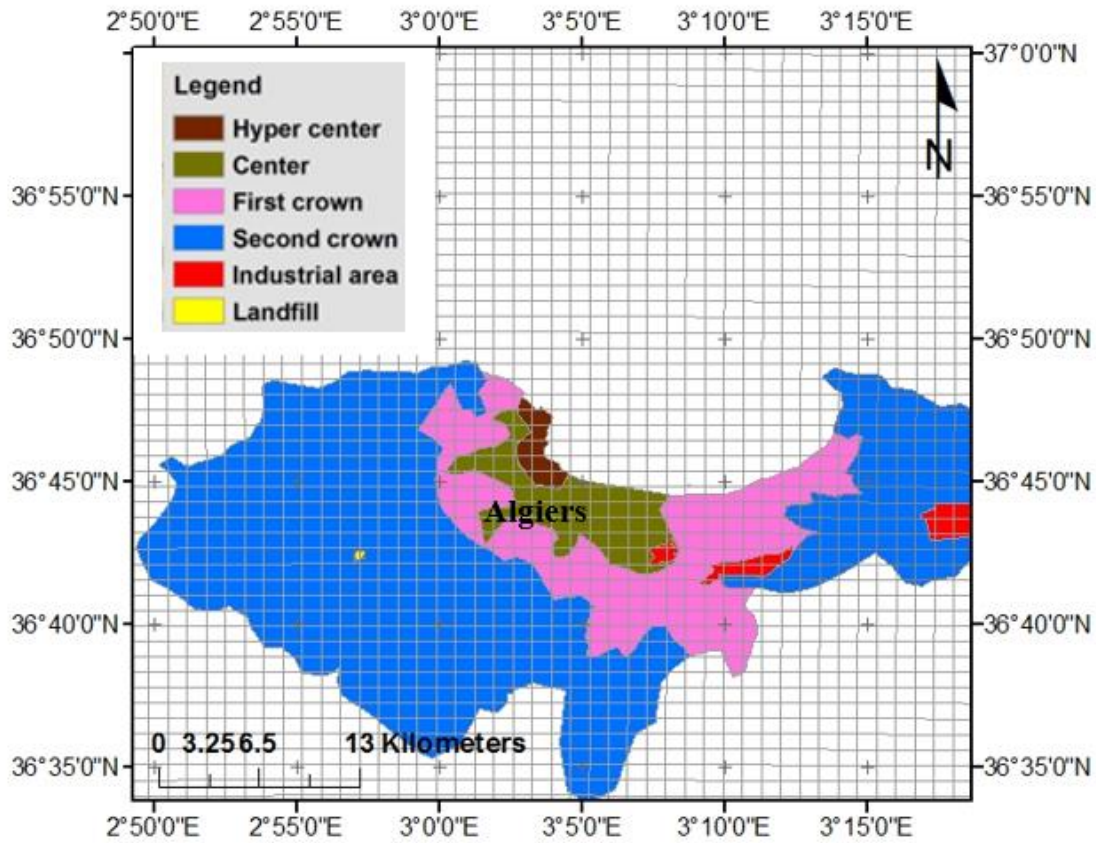


Fig. 15 Répartition spatiale des sources d'émissions surfacique.

Les émissions totales des sources surfaciques sont présentées graphiquement à l'aide d'une application SIG sous Arc GIS sur des mailles 1 km x 1 km, afin d'extraire le fichier final des émissions surfaciques qui sont utilisées comme entrée dans le modèle de la qualité de l'air.

II. 6. 4. Emissions totales

Les émissions relatives des PM-10 et de NO₂ des différentes sources considérées sont résumées en figure 16.

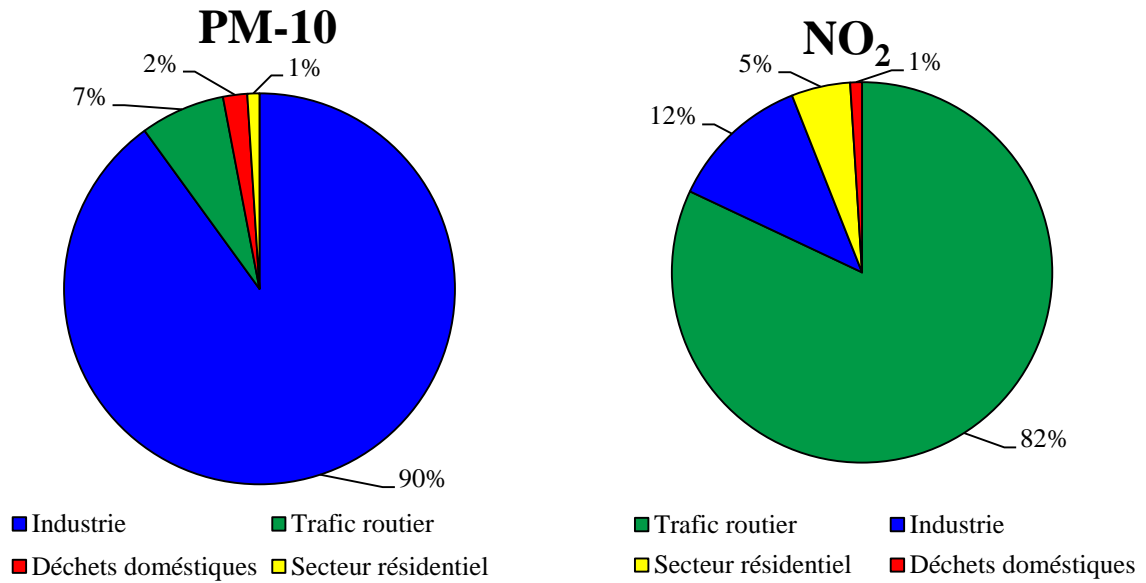


Fig. 16 Emissions relatives des PM-10 et de NO₂ de différentes sources.

Comme montre la figure 16, le trafic routier est la première source d'émission de NO₂, suivi par les secteurs industriel, résidentiel et les déchets domestiques. Près de 82% des émissions totales de NO₂ proviennent du trafic routier et 12% de l'industrie.

Environ 90% des émissions des PM-10 sont dus aux émissions du secteur industriel. Ces taux sont similaires à ceux estimés en 1995 par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE). Dans cette ancienne estimation du MATE, le secteur du trafic routier se distinguait par une forte contribution aux émissions de NO₂ (69%), le secteur industriel était responsable de 29% des émissions de NO₂ et 98% des émissions des PM-10 (MATE, 2001).

CHAPITRE III.

Modélisation de la qualité de l'air dans la région d'Alger

CHAPITRE III. Modélisation de la qualité de l'air dans la région d'Alger

III. 1. Modélisation de la météorologie et de la pollution dans la région d'Alger

La dispersion des polluants dans l'atmosphère ainsi que leur niveau de concentrations dans l'air dépendent fortement des conditions météorologiques (Cécé, 2014). Dans cette partie, nous présentons les résultats de la modélisation de la météorologie et de la pollution à Alger pour l'année 2012 en utilisant le modèle TAPM qui peut simuler l'évolution des paramètres météorologiques qui sont utilisés comme données d'entrées dans le domaine d'application du modèle de la qualité de l'air tel qu'illustré en figure 17.

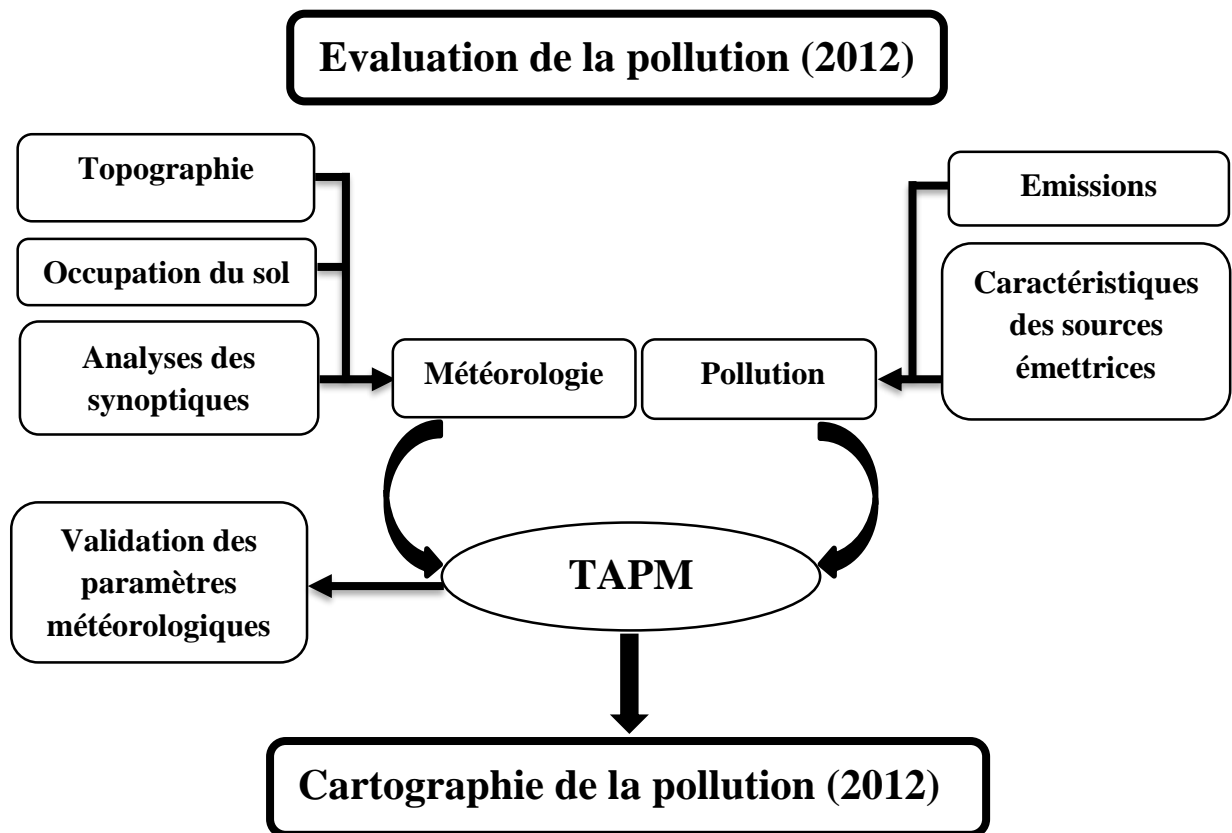


Fig. 17 Présentation de la modélisation de la météorologie et de la pollution dans la région d'Alger.

Le modèle TAPM est utilisé pour simuler la météorologie pour les trois domaines imbriqués (D01 (500 x 500 km), D02 (150 x 150 km) et D03 (50 x 50 km)), de résolutions respectives: 10, 3, 1 km, tandis que le dernier domaine de plus basse résolution, D03 (50 x 50 km) est utilisé pour simuler la pollution dans la zone d'étude.

III. 1. 2. Modélisation de la météorologie

Les données météorologiques nécessaires au fonctionnement du modèle de chimie-transport déterministe Eulérien TAPM sont les composantes horizontales du vent (U et V), les températures, la densité de l'air, l'humidité spécifique, les hauteurs des couches et les précipitations.

Ces variables sont issues des fichiers météorologiques TAPM.

III. 1. 2. 1. Estimateurs d'erreur utilisés pour l'évaluation statistique des simulations

Les outils d'évaluation statistique les plus utilisés dans les études de modélisation météorologiques, ont été développés par Willmott (1981); Willmott and Matsuura (2005). Les erreurs individuelles de prédiction du modèle sont définies comme :

Erreur (E_i) : La différence (E_i) entre la simulation et l'observation est calculée pour chaque site et chaque fois par :

$$E_i = P_i - O_i \quad (2)$$

Avec ($i = 1, 2, \dots, n$), où P_i et O_i sont, respectivement, les prédictions du modèle et les observations in situ. Cette erreur devrait être 0,0 pour une prévision idéale.

Valeur moyenne : La valeur moyenne des mesures O et les résultats du modèle P est calculée comme indiqué dans les équations suivantes.

$$\bar{O} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i \quad (3)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (4)$$

Les deux moyennes devraient être les mêmes pour une prévision idéale.

Écart type : Les écarts type des mesures et des résultats du modèle sont calculés comme suit.

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \quad (6)$$

Les deux écarts-types devraient être les mêmes pour une prévision idéale.

BIAS : La différence moyenne (BIAS) de tous les E_i pour chaque période de prévision est calculée comme suit :

$$\text{BIAS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i = \bar{P} - \bar{O} \quad (7)$$

BIAS devrait être nul pour une prévision idéale.

Écart type d'erreur (STDE) : L'écart type d'erreur (STDE) évalue la partie non systématique de l'erreur. Il est constitué une mesure de la prévisibilité du modèle.

$$\text{STDE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(P_i - \bar{P}) - (O_i - \bar{O})]^2} \quad (8)$$

Le STDE devrait être nul pour une prévision idéale, il augmente généralement avec la durée prévue.

Lorsque STDE a la même ampleur tout au long de la simulation du modèle, il peut être interprété comme si l'erreur est saturée au départ en raison des déficiences du modèle.

Variance des compétences (SKVAR) : La variance de compétence (SKVAR) évalue la capacité du modèle à reproduire la variance des données observées. Elle est également parfois appelé l'écart type normalisé.

$$\text{SKVAR} = \frac{\sigma_p}{\sigma_o} \quad (9)$$

La SKVAR devrait être 1 pour une prévision idéale.

Erreur quadratique moyenne (RMSE) : L'erreur quadratique moyenne est basée sur la somme du carré des erreurs.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i^2} = \sqrt{\text{BIAS}^2 + \text{STDE}^2} \quad (10)$$

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est simplement une combinaison de BIAS et de STDE, elle exprime l'erreur totale de modèle. La RMSE devrait être nulle pour une prévision idéale.

Coefficient de corrélation (r) : Le coefficient de corrélation (r) est très similaire au STDE. Cependant, r est sans dimension tandis que le STDE a la dimension du paramètre mesuré.

$$r = \left[\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sigma_o \sigma_p} \right] \quad (11)$$

Le coefficient de corrélation r devrait être 1 pour une prévision idéale.

Indice de performance (IOA) : Willmott (1981) a défini un indice de performance des (IOA) des modèles comme étant :

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (12)$$

Cet indice prend une valeur comprise entre 0 et 1, les valeurs supérieures à 0,5 sont considérées comme bonnes.

La RMSE et l'IOA sont les outils les plus utilisés dans la littérature pour exprimer les différences entre les prévisions et les données observées. Cependant, comme mentionnés par Willmott and Matsuura (2005), du fait qu'ils sont caractérisés par la somme du carré des erreurs, les grandes erreurs ont relativement plus d'influence sur l'erreur totale, que les plus faibles. Nous résumons au tableau 09 les estimateurs d'erreurs utilisés.

Tab. 09 Estimateurs d'erreur utilisés pour l'évaluation statistique des simulations.

Estimateurs d'erreur	Valeur acceptable	Valeur ideale
Coefficient de Corrélation (r)	(0, 1)	1,0
Différence moyenne (BIAS)	(-2, 2)	0,0
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	n.d	0,0
Écart type d'erreur (STDE)	n.d	0,0
Variance des compétences (SKAVR)	(0, 1)	1,0
Indice de performance (IOA)	(0, 1)	1,0

III. 1. 2. 2. Résultats de simulation météorologique et discussion

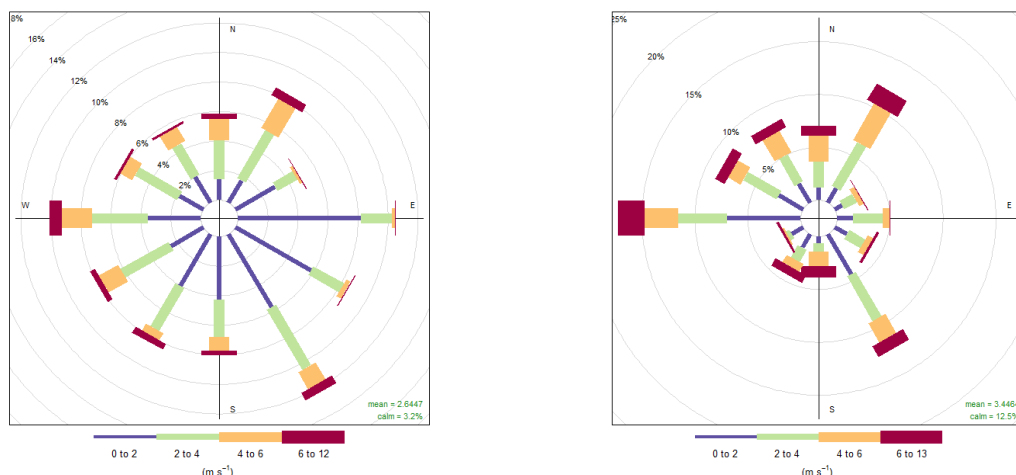
Dans cette partie, nous présentons les résultats des simulations numériques méso-échelles de la météorologie durant l'année 2012 dans la région d'Alger.

Pour appréhender la validité des simulations des paramètres météorologiques, nous avons comparé les résultats simulés avec ceux mesurés à la station météorologique d'Ain Bessam (Wilaya de Bouira).

La station de la surveillance météorologique Ain-Bessam (coordonnées géographiques 36°47'24''N, 3°01'04''E) est l'une des 79 stations de l'Office National de Météorologie, est située à environ 76 km d'Alger, vers le sud-est de la région (ONM, 2017). Le choix de cette station est dû à la disponibilité des données mesurées qui sont utiles à la validation de la simulation de la météorologie.

Les variables de surface simulées (la température, la vitesse et la direction du vent à 10 mètres au-dessus du sol) sont extraites au point de la plus proche grille de la station météorologique, sur la grille intérieure de la résolution de 3 km et elles sont évaluées à l'aide des données de mesure de la même station.

Les paramètres météorologiques simulés sont comparés à ceux mesurés. Les résultats obtenus sont présentés en figures 18 à 22 qui illustrent, respectivement, la comparaison entre les valeurs simulés et celles mesurés de la rose du vent, la température, la vitesse et la direction du vent ainsi que les corrélations entre les différents paramètres.



Fréquence des comptes par direction du vent (%)
Rose du vent simulée

Fréquence des comptes par direction du vent (%)
Rose du vent mesurée

Fig. 18 Comparaison entre la rose du vent simulée par TAPM et celle mesurée par la station météorologique d'Ain Bessam durant l'année 2012.

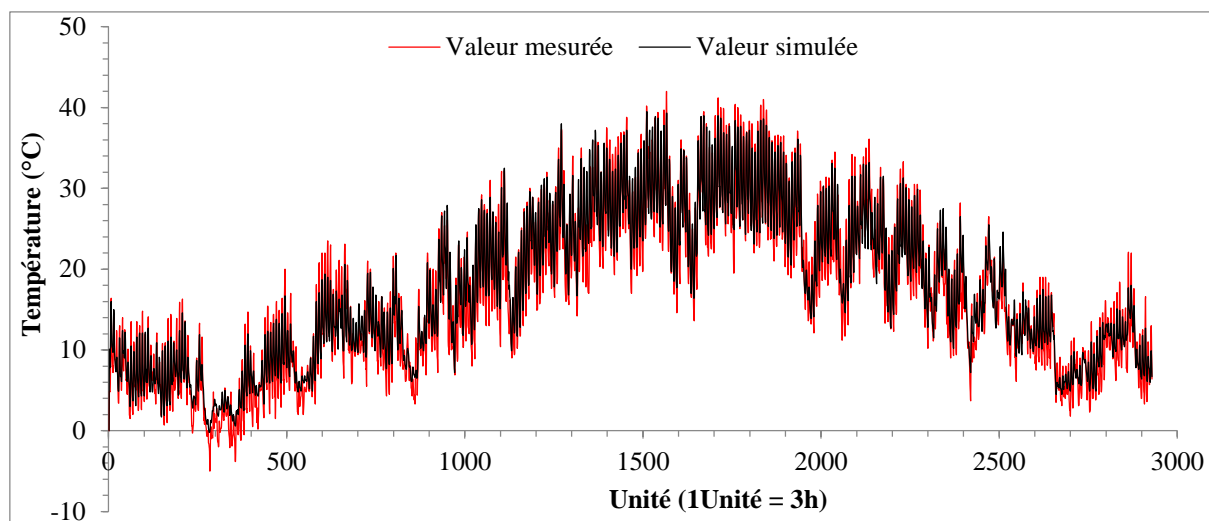


Fig. 19 Comparaison entre la température simulée par TAPM et celle mesurée par la station météorologique d'Ain Bessam durant l'année 2012.

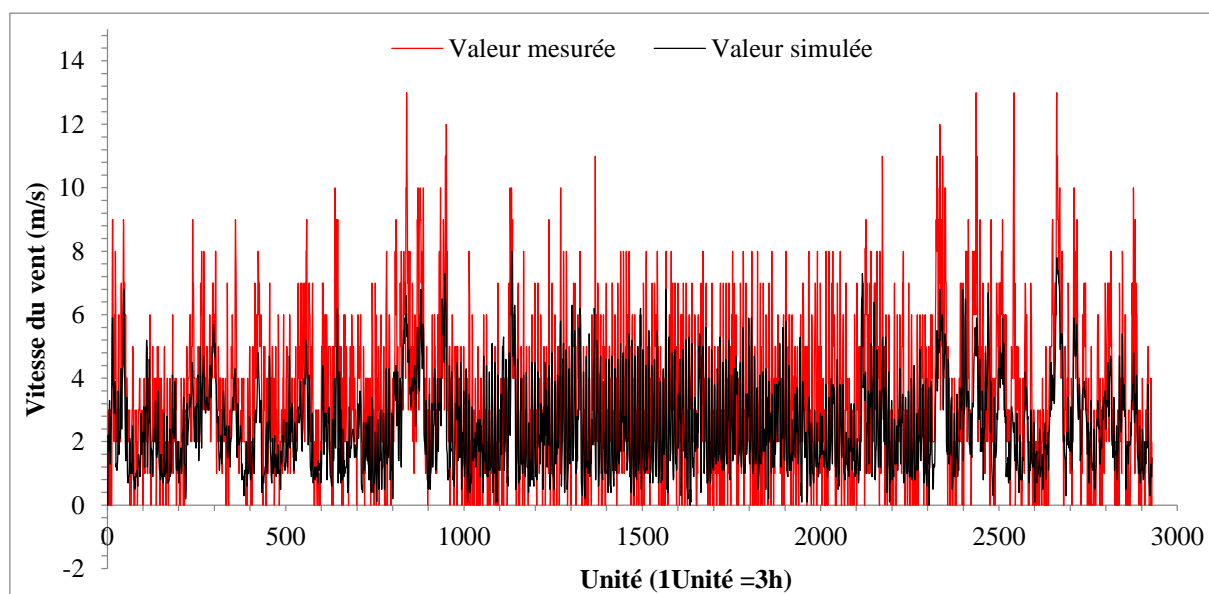


Fig. 20 Comparaison entre la vitesse du vent simulée par TAPM et celle mesurée par la station météorologique d'Ain Bessam durant l'année 2012.

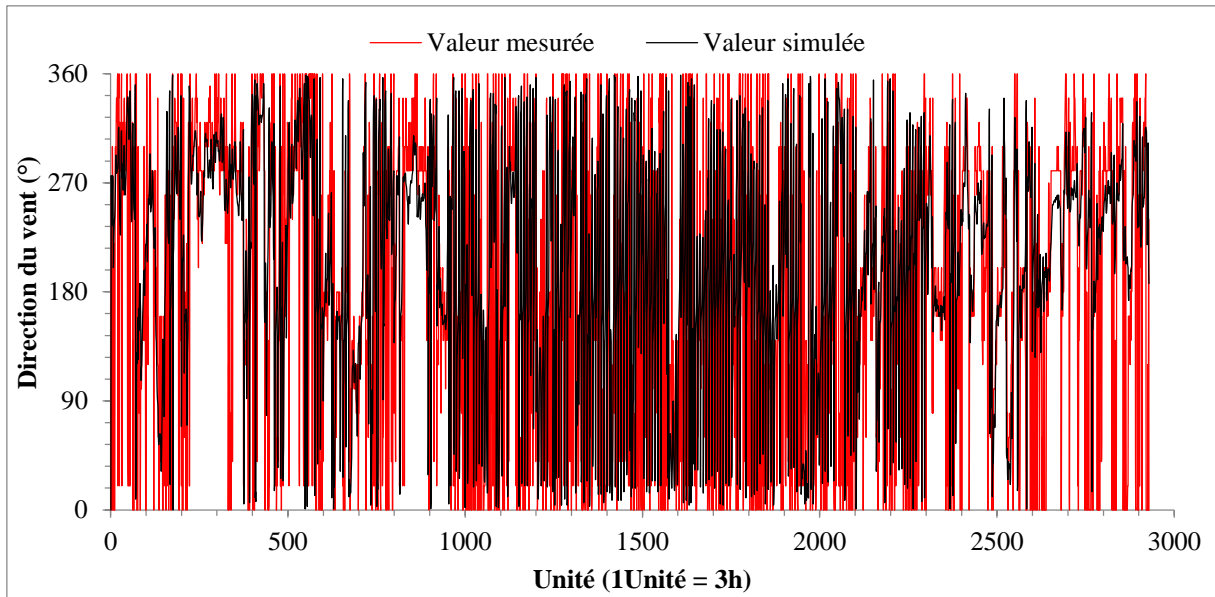


Fig. 21 Comparaison entre la direction du vent simulée par TAPM et celle mesurée par la station météorologique d'Ain Bessam durant l'année 2012.

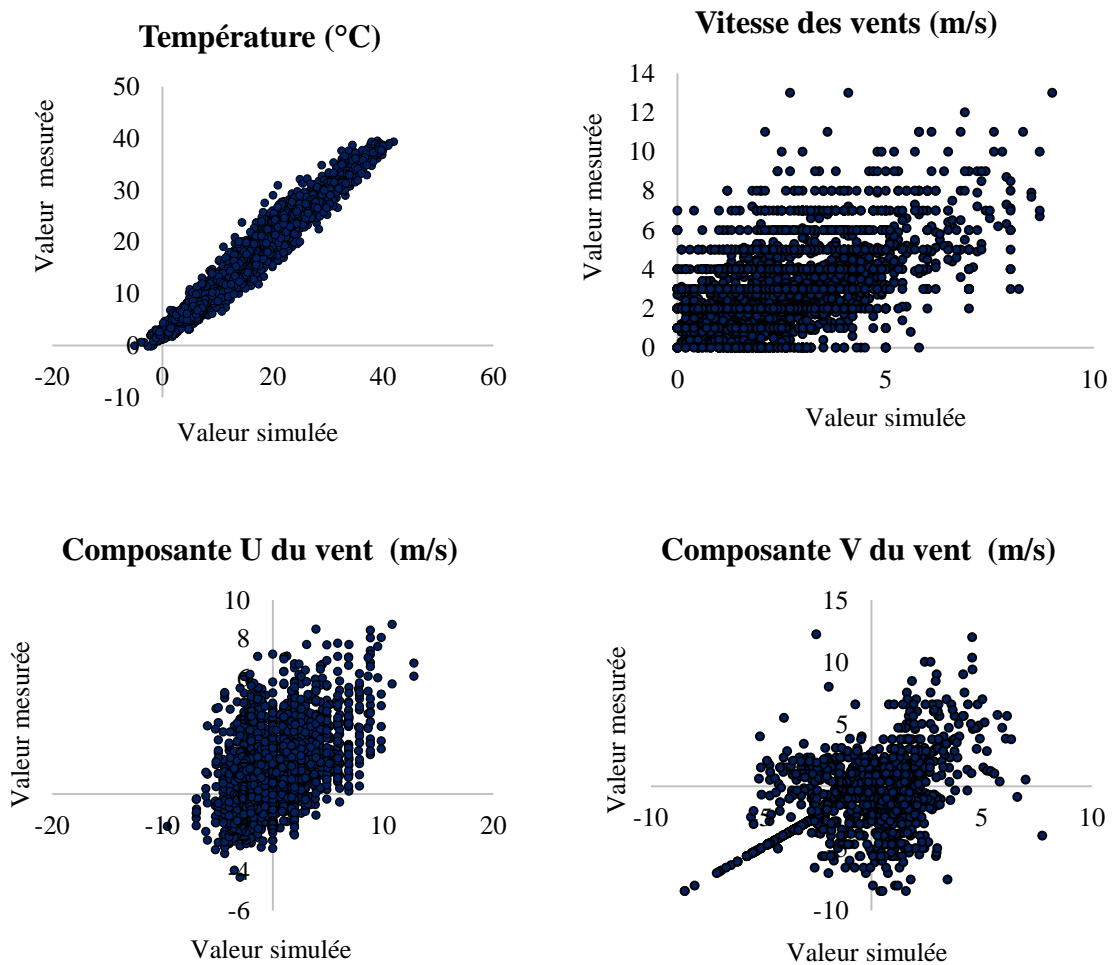


Fig. 22 Corrélation entre les paramètres météorologiques simulés par TAPM et ceux mesurés par la station météorologique d'Ain Bessam durant l'année 2012.

Globalement, les paramètres météorologiques issus de simulation sont en bonne adéquation avec les données de mesure, bien que pour quelques périodes il y a quelques différences.

Les vents dominants mesurés par la station d'Ain Bessam sont de directions Nord-est, Sud-est, et Ouest, avec une vitesse moyenne annuelle est de 3,4 m/s. Les vents dominants simulés présentent globalement les mêmes directions que celles mesurées avec toutefois une contribution assez importante des vents d'Est et de Sud-ouest. La vitesse moyenne annuelle simulée qui s'élève à 2,9 m/s est légèrement plus faible que la vitesse mesurée.

Les températures mesurées et simulées sont pratiquement identiques, la température moyenne annuelle mesurée est 16,7°C, tandis que celle simulée est 17,6°C. Les températures maximales sont enregistrées en été, particulièrement durant la période du mois de juillet et d'août.

Afin d'évaluer les performances du modèle TAPM, nous avons comparé, à l'aide des estimateurs statistiques, les champs de surfaces simulés et mesurés des paramètres météorologiques étudiés. L'évaluation statistique des variables météorologiques est résumée en tableau 10.

Tab. 10 Evaluation statistique des variables météorologiques, vitesse du vent \bar{U} en m/s, composantes ouest-est (U) et sud nord (V) du vent en m/s et température T en °C.

Variable	Vitesse du vent		Composante ouest-est du vent		Composante sud-nord du vent		Température	
	\bar{U}_m	\bar{U}_s	U_m	U_s	V_m	V_s	T_m	T_s
Valeur moyenne	3,40	2,90	0,40	0,74	0,49	0,33	16,70	17,60
r	0,68		0,71		0,75		0,98	
BIAS	-0,45		0,35		-0,16		-0,80	
RMSE	2,06		2,07		2,25		2,14	
STDE	1,92		2,04		2,25		1,99	
SKVAR	0,80		0,79		0,84		0,97	
IOA	0,68		0,73		0,79		0,99	

Avec :

\bar{U}_m , U_m , V_m et T_m sont, respectivement, les valeurs mesurées de la vitesse du vent, les composantes Ouest-est et Sud-nord du vent et la température.

\bar{U}_s , U_s , V_s et T_s sont, respectivement, les valeurs simulées de la vitesse du vent, les composantes Ouest-est et Sud-nord du vent et la température.

Comme indiqué dans le tableau 10, les statistiques montrent quelques différences entre les valeurs simulées et celles mesurées de la vitesse du vent et ses composantes.

La vitesse du vent simulée présente un coefficient de corrélation $r = 0,68$. Cette valeur de r , qui est comparable aux valeurs trouvées dans d'autres études (Zhong and Fast, 2003; Yu et al., 2008), indique une bonne performance du modèle.

L'indice de performance de Willmott IOA pour la vitesse du vent et ses composantes est supérieur à 0,65. De nombreuses autres études de modélisation (Hurley et al., 2001), considèrent qu'une valeur d'IOA supérieure à 0,5 est bonne et qu'elle indique une bonne performance du modèle pour la météorologie.

Dans le cas de la température, les statistiques présentent de très bons résultats. Le coefficient de corrélation r est supérieur à 0,98. L'IOA de 0,99 pour la température est très bon et même meilleur que celui trouvé par certains auteurs dans des études portant sur la modélisation d'une zone urbaine (Hurley et al., 2003) et pour une zone côtière en Australie (Luhar and Hurley, 2004).

Le RMSE (Root Mean Square Error) ou l'erreur quadratique qui représente une combinaison de BIAS et de STDE (erreur totale de modèle) s'élève à 2,14, il est du même ordre de grandeur que celui trouvé dans d'autres travaux (Wiegand et al., 2011).

Les BIAS et SKVAR, pour tous les variables, sont dans la gamme des valeurs acceptables (voir tableau 08).

De manière générale, les estimateurs d'erreurs indiquent que les valeurs mesurées et simulées des paramètres météorologiques sont en bonne adéquation.

Selon les résultats de l'étude de Luhar et Hurley (2004), le modèle TAPM peut même être appliqué avec un bon niveau de confiance pour les prévisions de pollution de l'air et les évaluations de l'impact environnemental sans utiliser les données météorologiques mesurées.

III. 1. 3. Modélisation de la qualité de l'air

La simulation des PM-10 et de NO₂ pour le domaine D03, permet d'identifier, dans l'espace et le temps, les pics de pollution.

Ainsi, dans cette thèse, nous modélisons la pollution urbaine avec un modèle de chimie-transport de méso-échelle (TAPM) comme détaillé dans le chapitre 2, qui permet d'estimer les concentrations et la distribution de polluants atmosphériques.

Nos simulations concernent les polluants issus du trafic routier, l'industrie, le résidentiel et les déchets domestiques, notamment les PM-10 et le NO₂.

III. 1. 3. 1. Résultats de simulation de la pollution et discussion

Il est important d'estimer la qualité des résultats obtenus, en comparant les mesures observées avec les données de la modélisation. Dans notre cas, cette comparaison directe n'est malheureusement pas possible, car il n'existe pas de données mesurées en 2012, le réseau de surveillance de Samasafia étant à l'arrêt.

Devant cette situation problématique, et pour appréhender la validité des résultats sur la zone d'étude, nous avons comparé les concentrations moyennes annuelles simulées des PM-10 et de NO₂ en 2012, avec celles mesurées par l'Observatoire National de l'Environnement dans les années précédentes.

Des mesures ont été faites par le réseau de la surveillance de la qualité de l'air à Alger dans les années 2004, 2005 et 2006 pour les PM-10 au niveau de quatre sites : Ben Aknoun, Bab El Oued, 1er Mai et Hamma, et de 2003 à 2007 pour le NO₂ au niveau de deux sites Ben Aknoun et Bab El Oued.

Les valeurs mesurées des PM-10 et de NO₂ de Samasafia sont données en moyenne annuelle, de même pour les données simulées qui sont extraites pour les mêmes sites, alors la comparaison est faite à titre indicatif comme l'indiqué les figures 23 et 24.

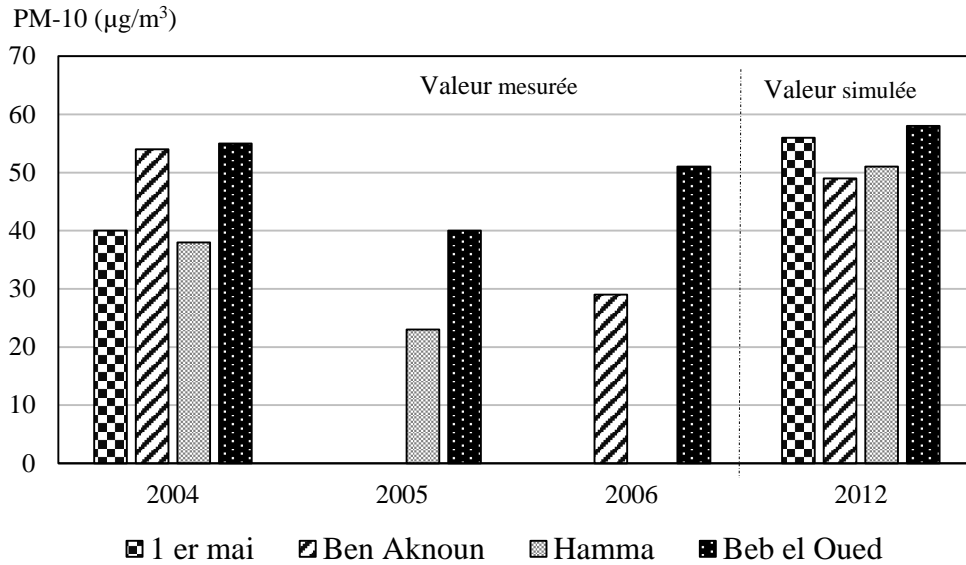


Fig. 23 Comparaison entre la concentration moyenne annuelle de PM-10 mesurée par la station Samasafia de 2003 à 2007 et la valeur simulée durant l'année 2012 en différents sites à Alger.

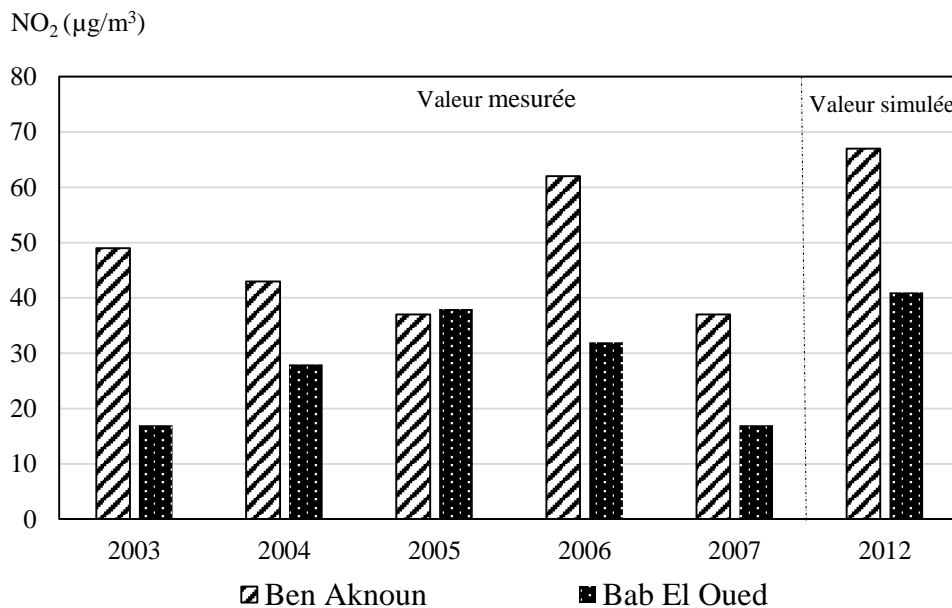


Fig. 24 Comparaison entre la concentration moyenne annuelle de NO₂ mesurée par la station Samasafia de 2003 à 2007 et la valeur simulée durant l'année 2012 pour différents sites à Alger.

Entre 2004 et 2006 les teneurs atmosphériques en PM-10 mesurées aux sites urbains de Ben Aknoun, Bab El Oued, 1er Mai et Hamma oscillaient entre 23 et 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et le modèle TAPM simule des teneurs comprises entre 59 et 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les mêmes sites.

D'autres études réalisées par le laboratoire des sciences et techniques de l'environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique peuvent également renforcer la bonne performance du modèle.

C'est ainsi qu'en 2006, une étude annuelle de suivi des PM-10 par HVS (High Volume Sampler) au site du 1^{er} Mai aboutit à une teneur moyenne des PM-10 de 64,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Berkouki, 2008). Pour ce site le modèle donne 54,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dans une étude similaire réalisée en 2015 au campus de l'ENP (Alger-est) (Talbi et al., 2017), la teneur annuelle moyenne en PM-10 s'élevait à 58,64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour ce site la simulation donne une teneur de 51,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En ce qui concerne le NO₂, Samasafia mesurait de 2003 à 2007 en stations de proximité du trafic routier implantées à Ben Aknoun et Bab El Oued des teneurs variant entre 18 et 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et TAPM simule des teneurs comprises entre 40 et 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les mêmes sites. Les teneurs élevées de la simulation pour l'année 2012 sont certainement dues à l'augmentation très sensible du nombre de véhicules circulant dans la wilaya ou en transit et l'accentuation de l'impact des secteurs industriels, de l'urbanisation et de la croissance démographique sur la qualité de l'air de la ville d'Alger.

En 2013, au cours de mesures ponctuelles effectuées sur une durée de 2 mois, on releva en divers sites de proximité à Alger une teneur moyenne en NO₂ de l'ordre de 59,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Benrabah, 2013). En 2014, on mesura également en plusieurs sites d'Alger (Louni, 2014) des teneurs comprise entre 16,92 et 60,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ qui sont très proches des teneurs simulées.

Ainsi, ces comparaisons entre les teneurs des PM-10 et NO₂ simulés et celles mesurés sur site, et malgré le fait qu'elles ne coïncident pas sur la même période d'étude, indiquent que le modèle reproduit plus ou moins correctement les observations réelles et indique que la simulation est plus qu'acceptable. Elle est suffisamment bonne pour réaliser une cartographie ou distribution spatiale de la pollution et des scénarios de futures évolutions. Il est clair qu'en certains sites, des données non identifiées sur les émissions peuvent aussi conduire à des différences avec la réalité pouvant être significatives. La simulation de la distribution spatiale des moyennes annuelles des teneurs en PM-10 et NO₂ que nous avons réalisée pour l'année 2012 dans la zone d'étude du grand Alger est illustrée en figures 25 et 26.

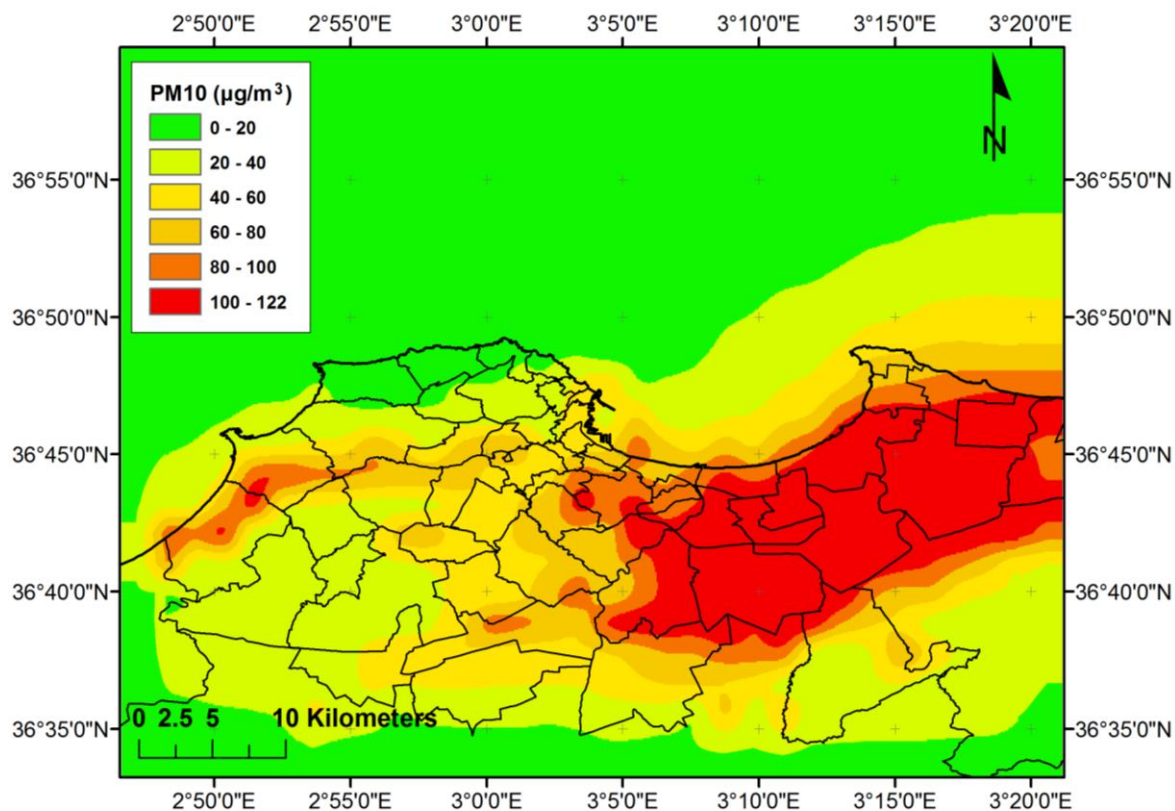


Fig. 25 Distribution spatiale des PM-10 dans la zone d'étude pour l'année 2012.

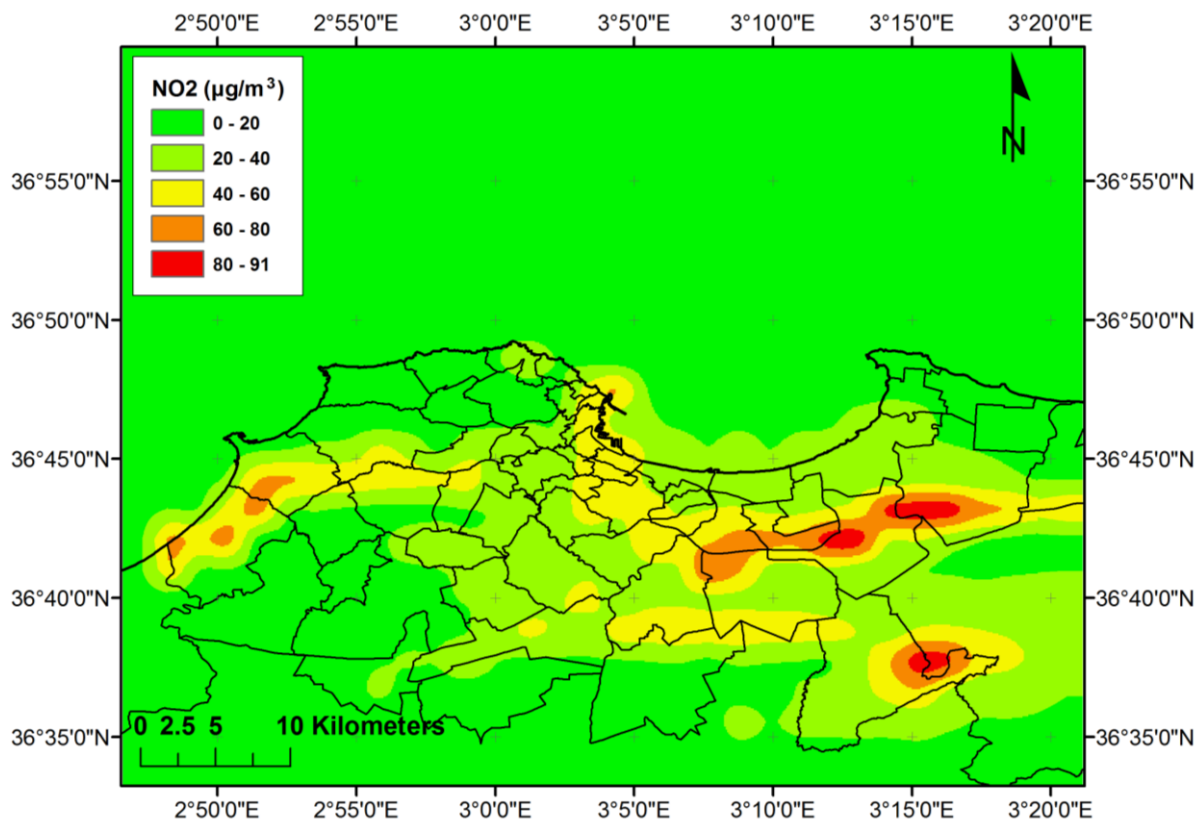


Fig. 26 Distribution spatiale du NO₂ dans la zone d'étude pour l'année 2012.

La distribution spatiale des moyennes annuelles des teneurs en PM-10 et NO₂ varie d'un site à un autre sur la zone d'étude. Cette variation est due certainement aux différences spatiales dans l'intensité des émissions issues des activités humaines (trafic routier, industrie et autres sources émettrices).

Comme illustré en figure 25, les niveaux de pollution par les PM-10 sont très élevés sur la vaste zone du sud-est d'Alger. Il s'agit de la région des zones industrielles d'Oued-Smar et Rouiba/Reghaia, de la raffinerie de Baraki ainsi qu'un important réseau routier supportant un dense trafic automobile. Les niveaux les plus élevés de pollution par le NO₂ (figure 26), apparaissent aussi dans cette zone mais aussi près du centre et l'hyper centre d'Alger, où se concentrent une forte densité de population et un important trafic routier.

La modélisation de cette distribution spatiale montre que la norme algérienne de 80 µg/m³ pour les PM-10 (JORADP, 2006) est dépassée en plusieurs zones, en particulier au sud-est de la ville d'Alger. De même en ce qui concerne les recommandations de l'OMS (20 et 40 µg/m³ pour les PM-10 et NO₂, respectivement) (OMS, 2006) et les valeurs-limites de l'Union Européenne (40 µg/m³ pour les deux polluants) (AEE, 2011).

Dans le cas des PM-10, les normes de l'UE et de l'OMS sont dépassées dans pratiquement toute la zone étudiée. Le seuil limite algérien de 80 µg/m³ est largement au-dessus du seuil toléré par les données scientifiques en termes d'impact sur la santé et devrait être revu à la baisse. Dans les autres régions de la zone étudiée, la pollution par les PM-10 et le NO₂ est moindre. Dans ces zones de périphérie du type semi-urbain, voire même rural, les teneurs sont faibles et demeurent inférieures aux valeurs guide fixées par l'OMS ainsi qu'aux normes algériennes même. L'absence de grandes activités industrielles et les faibles densités de population qui caractérisent ces milieux de type rural et semi-rural se reflètent sur la qualité de l'air.

Dans cette étude, l'impact du secteur industriel sur les teneurs en PM-10 est apparu clairement, les teneurs observées en situation de proximité aux grandes zones industrielles sont très élevées comparativement aux sites éloignés. En revanche, l'impact du trafic automobile sur les teneurs en dioxyde d'azote est très net, c'est à proximité des grands axes routiers que les teneurs calculées sont les plus élevées. Ceci est dû, en partie, au fait qu'en Algérie, la plupart des véhicules qui circulent ne sont pas équipés de catalyseurs qui réduisent considérablement les émissions polluantes, spécialement le NO₂. De plus, le parc automobile demeure âgé et mal entretenu, malgré le nombre restreint de véhicules utilisant le gasoil.

CHAPITRE III. Modélisation de la qualité de l'air dans la région d'Alger

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 femmes enceintes, leurs fœtus et les enfants. On peut dire que si on contrôle les émissions issues du trafic routier on peut réduire la pollution dans la ville d'Alger. Globalement on a retrouvé qu'à Alger la pollution de l'air est préoccupante de part l'importance des teneurs des polluants enregistrées.

L'étude de l'OMS sur la qualité de l'air publiée début mai 2014 a porté sur 1600 villes de 91 pays entre 2008 et 2013 (OMS, 2014). Elle a mesuré les particules PM-10 durant cette période. Selon l'OMS, seul 12% de la population urbaine mondiale respire un air affichant une concentration de particules fines en-deçà des seuils conseillés par l'OMS. Pour les PM-10, ce seuil limite de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'air a largement été dépassé dans de nombreuses métropoles, et dans des proportions bien plus importantes que lors des alertes à la pollution enregistrées à Genève, Suisse, ou Paris, France, en mars 2014.

Les villes les plus fortement polluées se trouvaient dans les pays d'Asie du Sud et du Sud-est, ainsi que ceux du Golfe. Parmi celles affichant la plus haute concentration annuelle de PM-10, on trouve ainsi Peshawar, Pakistan, 549 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, New Delhi Inde, 286 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Dakar, Sénégal, 179 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ou encore Oulan Bator, Mongolie, 148 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En comparant Alger avec ces villes, le taux PM-10 reste acceptable (Terniche, 2016).

CHAPITRE IV.

Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

IV. 1. Prévision de la pollution

La pollution atmosphérique en milieu urbain a été identifiée comme une cause importante d'impacts sanitaires, y compris de décès prématurés. Ceci concerne, en particulier, les concentrations ambiantes de polluants règlementés tels que les PM-10 et le NO₂. Cette situation implique que des stratégies de réductions d'émissions doivent être mises en place pour réduire les risques et se conformer à la réglementation et atteindre les objectifs de qualité correspondants.

Pour avoir une idée sur l'état future de la pollution de l'air à Alger, nous avons établis des scénarios prévisionnels à l'horizon 2030. Ces scénarios ont pour objet d'évaluer l'impact de la consommation énergétique par les différents secteurs sur la qualité de l'air.

Le choix de l'horizon d'étude (2030) tient compte principalement de la disponibilité d'études sectorielles réalisées au niveau national, particulièrement des données sur le programme d'efficacité énergétique à l'horizon 2030.

Il faut toutefois mentionner l'insuffisance actuelle des données fournies pour évaluer les scénarios pour quelques secteurs en Algérie, spécialement si on veut travailler sur une région limitée comme Alger.

IV. 2. Différents scénarios prévisionnels

Dans la cadre de cette partie dédiée à l'évaluation de la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030, nous avons élaboré trois scénarios prévisionnels.

Le premier scénario est celui de Maintien du Statu Quo (MSQ) qui consiste à continuer sur les tendances de l'année 2012 en matière de démographie, trafic routier, production/consommation énergétique et industrialisation. C'est le scénario communément appelé BaU (Business as Usual) qui correspond à la situation où aucune politique de changement ne sera mise en œuvre ([Börjeson et al, 2006](#)).

Le deuxième scénario prévoit la mise en œuvre du programme gouvernemental des énergies renouvelables et l'efficacité énergétiques d'ici 2030 ([ME, 2017](#)).

Le troisième scénario s'appuie sur le deuxième scénario du gouvernement avec une addition de quelques mesures pour l'atténuation de la pollution dans la zone d'étude. La méthodologie suivie pour l'élaboration des scénarios prévisionnels est illustrée en figure 27.

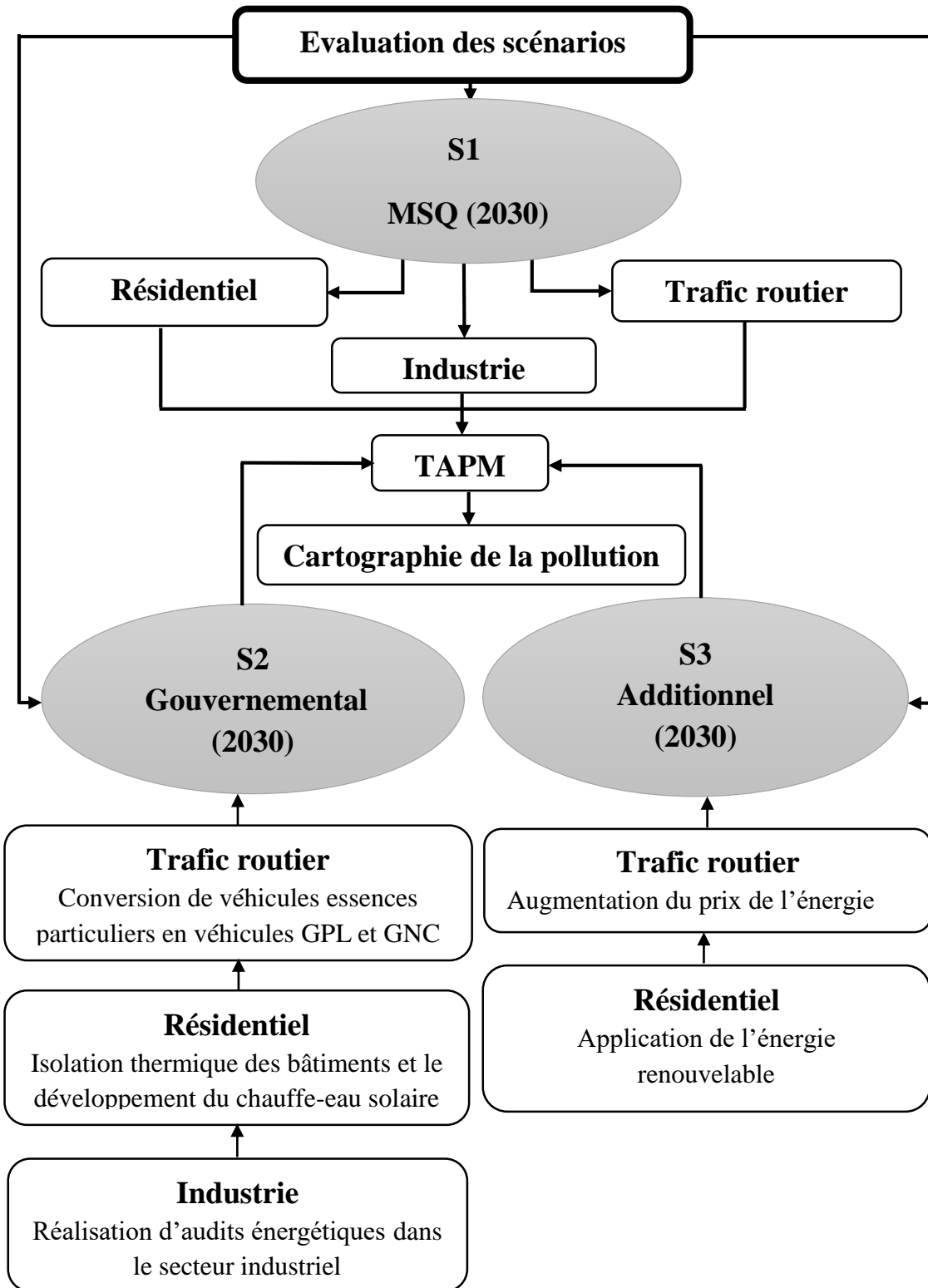


Fig. 27 Organigramme des scénarios prévisionnels.

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

Les principaux secteurs devant être inclus dans les différents scénarios étudiés resteront les secteurs figurant dans l'année de référence 2012, pour réaliser une estimation de leurs émissions en 2030. Ils s'engageront ensuite à atteindre un objectif de réduction des émissions calculé à partir de leurs projections d'émissions pour 2030, sur la base du scénario MSQ.

L'estimation du taux de mortalité causé par les concentrations des polluants simulés sur l'exposition humaine pour les différents scénarios étudiés, permet la meilleure connaissance des associations entre la concentration ambiante des polluants atmosphériques et l'impact sur la santé.

IV. 2. 1. Scénario de maintien du statu quo (MSQ) à l'horizon 2030

Le scénario MSQ analyse l'évolution des niveaux d'émission d'ici 2030, en se fondant sur l'hypothèse d'une poursuite des tendances de l'année 2012 en matière de démographie, trafic routier et industrie. Le calcul des émissions pour le scénario MSQ est réalisé sur la base de l'année de référence 2012 en utilisant les taux de croissance annuels propres à chaque secteur.

Le MSQ prévoit qu'aucune mesure de réduction des émissions, n'est prise en considération pour déterminer les futures tendances en matière d'émissions des polluants atmosphériques étudiés (Börjeson et al., 2006).

IV. 2. 1. 1. Calcul des émissions pour le scénario de maintien du statu quo (MSQ) à l'horizon 2030

Comme mentionné auparavant, le calcul des émissions pour 2030 en se basant sur le taux d'augmentation annuels des secteurs concernés.

IV. 2. 1. 1. 1. Secteur routier

Le parc automobile dans la ville d'Alger a connu ces dernières années une croissance effrénée (Plus de 20% entre 2010 et 2013) (ONS, 2016), ceci est dû à la multiplication des concessionnaires avec la libération du marché et les possibilités d'achat à crédits.

Nous présentons sur la figure 28, l'évolution du parc depuis une vingtaine d'années. Il est à remarquer que d'autres statistiques avancent le chiffre de 6,5 millions de véhicules.

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

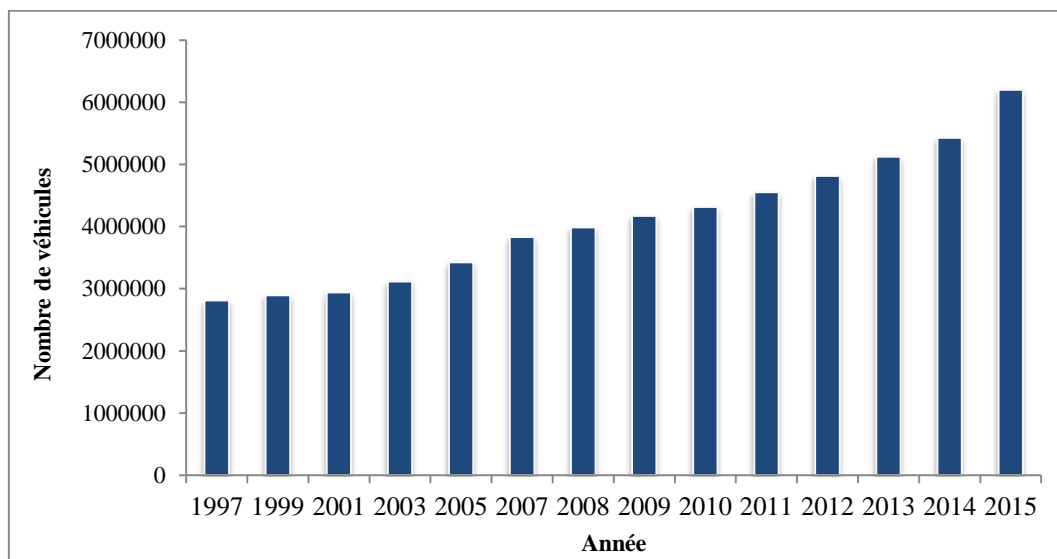


Fig. 28 Evolution du parc automobile de 1997 à 2015 (ONS, 2016).

L'évolution de parc de véhicule algérien à l'horizon de 2030 est illustrée en tableau 11.

Tab. 11 Evolution du parc de véhicule algérien à l'horizon de 2030 (10^4) (Kakachi et al., 2018).

Années	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Nombre de véhicules	648	677	708	740	773	808	844	882	922	963	1007	1052	1100

Le parc national automobile a atteint en 2013 plus de 5 millions de véhicules avec un taux de croissance annuel de 4,5% entre 2000 et 2013.

Avec le taux de croissance actuel du parc automobile, l'Algérie s'attend à plus de 11 millions de véhicules à l'horizon 2030 (Kakachi et al., 2018).

Les émissions des polluants issus du trafic routier en 2030 sont estimées sur la base des émissions calculées en 2012, en utilisant le 1/4 du parc automobile algérien destiné pour la zone d'étude.

IV. 2. 1. 1. 2. Secteur résidentiel

La population algérienne est passée de 29,3 millions à 36,7 millions entre 1998 et 2011 et le taux d'accroissement naturel, est passé de 1,6 à 2 %, respectivement, au cours de la même période (ONS, 2012).

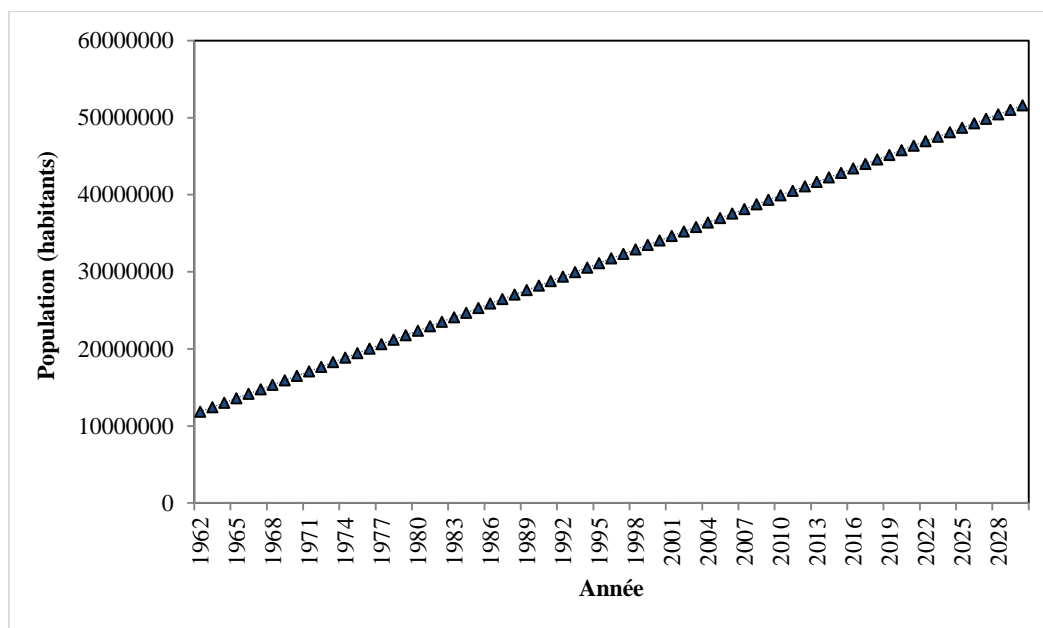


Fig. 29 Evolution de la population algérienne (ONS, 2012).

On applique ce taux de 2% pour estimer la population algérienne en 2030, en se basant sur la population pour l'année de référence 2012.

Ce scénario est un prolongement des tendances actuelles soit 650 000 habitants par an, et donc 55 millions en 2030.

On estime les émissions du secteur résidentiel en 2030, connaissant le taux d'augmentation de la population et les émissions estimées précédemment par le même secteur pour l'année de référence 2012.

IV. 2. 1. 1. 3. Secteur industriel

Les tendances en matière d'émissions du secteur industriel jusqu'en 2030 ont été calculées à partir de l'année de référence 2012.

Concernant les grandes sources fixes, on estime les émissions en fonction de l'augmentation de production pour chaque industrie.

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

Par exemple, pour les centrales électriques et les cimenteries, il n'y a à notre connaissance aucune prévision sur d'éventuelles augmentations de la production des anciennes industries et l'installation de nouvelles entités dans la zone d'étude d'ici 2030. On suppose ainsi que les émissions restent au même niveau que celles de l'année 2012.

Selon le Ministère de l'Energie d'Algérie (ME, 2017), la raffinerie de Beraki va augmenter la production à 35% en passant de 2,7 millions de tonnes en 2012 à 3,65 millions de tonnes, de plus l'usine de verre plat Cevital vise le renforcement de sa production après son extension en la portant à 400 000 tonnes par an contre 146 000 tonnes par an en 2012 (MFG, 2017), ce qui représente 36% d'augmentation de sa production. Dans ce cas, on utilise la formule 1 comme mentionné dans le chapitre précédent (Chapitre II) et les facteurs d'émission (Annexe 1) pour le calcul des émissions des grandes sources fixes.

Aucune nouvelle industrie ou zone industrielle ne sont prévues dans la zone d'étude selon le rapport publié par le Ministère de l'Industrie et des Mines (MIM, 2017) sur les projets d'installation des nouvelles industries en Algérie. De plus, et par manque d'information sur l'extension des zones industrielles existantes, on supposera que les émissions des zones industrielles utilisées dans l'évaluation de la pollution atmosphérique en 2012 à Alger restent les mêmes.

IV. 2. 1. 1. 4. Secteur des déchets domestiques

Dans le cadre du programme national de gestion des déchets et de l'amélioration du cadre de vie du citoyen, les déchets ménagers de la wilaya d'Alger et des communes voisines sont, après la fermeture définitive de la décharge d'Oued Fayet en 2013, acheminés depuis 2014 vers le CET de Hamici qui est implanté dans la commune de Mahelma à l'ouest d'Alger sur une surface de 95 hectares. Ce CET qui répond aux normes en vigueur en matière de gestion des déchets a une durée de vie de 15 ans (AND, 2017).

Bien que le volume de production des déchets ménagers augmente annuellement d'environ 3 %, ce CET est considéré comme étant suffisant pour absorber les déchets ménagers produit à l'horizon 2030.

On considère donc que les futures émissions issues des déchets domestiques à Alger et ses environs seront négligeables.

IV. 2. 2. Scénario gouvernemental à l'horizon 2030

C'est surtout dans le domaine énergétique que le programme gouvernemental souhaite axer le plus d'effort. L'efficacité énergétique et les énergies renouvelables sont appelées à jouer un rôle important dans le contexte énergétique national, caractérisé par une forte croissance de la consommation tirée, notamment, par le secteur domestique avec la construction de nouveaux logements, la réalisation d'infrastructures d'utilité publique et la relance de l'industrie. C'est ainsi que dès 2015 le pays a adopté un programme de promotion de l'efficacité énergétique et un ambitieux programme de développement des énergies renouvelables.

IV. 2. 2. 1 Programme de promotion de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030

La consommation nationale d'énergie a connu une croissance accrue due principalement à l'amélioration du niveau de vie des citoyens, qui s'est traduite par l'augmentation du taux d'équipement. De même que la réalisation de plusieurs projets d'infrastructures d'utilité publique a contribué à cette croissance. L'efficacité énergétique s'impose comme une réponse appropriée à cette problématique. A cet effet, l'évaluation du potentiel d'économie d'énergie s'avère nécessaire pour cerner la marge de manœuvre possible en vue de dégager les actions et les mesures à mettre en œuvre sur le terrain afin d'agir sur la consommation d'énergie fossile et réduire les émissions de polluants atmosphériques.

La réalisation de ce programme d'efficacité énergétique par une diversité d'actions et de projets, devrait favoriser l'émergence, à terme, d'un marché durable de l'efficacité énergétique en Algérie.

Selon l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Energie (APRUE) le programme d'efficacité énergétique à l'horizon 2030 s'intéresse à l'ensemble des secteurs de consommation qui ont un impact significatif sur la demande d'énergie : il s'agit du transport, du bâtiment et de l'industrie. Il vise globalement la réduction de la consommation de 9% à travers la substitution inter énergétique et l'introduction des équipements et des technologies performantes (APRUE, 2017).

IV. 2. 2. 1. 1 Secteur routier

Le secteur de transport en Algérie est considéré comme l'un des secteurs les plus énergivores avec 41% de la consommation d'énergie finale du pays.

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

Face à cette situation, le programme d'efficacité énergétique d'ici 2030 vise à promouvoir les carburants les plus disponibles et les moins polluants, en l'occurrence, le gaz de pétrole liquéfié (GPL) et le gaz naturel comprimé (GNC).

L'objectif étant d'enrichir la structure de l'offre des carburants et de contribuer à atténuer les effets des carburants classiques sur la santé et l'environnement.

Ce programme prévoit, à terme, la généralisation de l'utilisation des carburants propres dans les transports individuels et collectifs, notamment, dans les grands centres urbains par :

- a) La conversion de 1,3 millions de véhicules essences particuliers ;
- b) L'acquisition de 11 000 bus GPL et la conversion de 11 000 d'autres au GNC.

Ceci se traduirait par une économie, de plus de 15 millions de tonnes équivalent de pétrole (TEP) d'ici 2030 ([APRUE, 2017](#)).

IV .2. 2. 1. 2 Secteur résidentiel

L'impact de la consommation de l'énergie par le secteur du bâtiment, sur le volume global consommé, est considérable, soit 42% du volume final, induisant, par conséquent, une dépense énergétique très lourde.

a) Isolation thermique des bâtiments

Le volet bâtiment du programme consiste en l'introduction et la diffusion des pratiques et des technologies innovantes autour de l'isolation thermique des constructions existantes et nouvelles. Ceci en développant les filières industrielles de fabrication des isolants thermiques de l'enveloppe (murs et toitures) en utilisant les matériaux locaux (laine de roche, laine de verre...) et le double vitrage.

L'objectif de ce programme à l'horizon 2030 est d'atteindre un gain cumulé d'énergie de 7,6 millions de TEP avec l'isolation thermique de 100 000 logements/an ([APRUE, 2017](#)).

b) Développement du chauffe-eau solaire

Ce programme vise l'introduction des chauffe-eau solaires (CES) dans le résidentiel pour les besoins de chauffage de l'eau.

L'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'eau chaude constitue une solution éco-énergétique par excellence. Cette ressource est disponible abondamment en Algérie. Il s'agit d'utiliser la chaleur émanant du rayonnement solaire pour chauffer l'eau nécessaire à la consommation des occupants, grâce à un capteur solaire thermique installé à l'extérieur.

Concernant l'usage (individuel et collectif) de l'eau chaude sanitaire, la priorité accordée par les pouvoirs publics, par ce programme, est la substitution du chauffage de l'eau par les moyens classiques par le chauffage solaire. A ce titre, des efforts considérables seront fournis, en vue de favoriser la pénétration massive des chauffe-eau solaires par la diffusion de 100 000 CES/an, et atteindre un gain d'énergie à plus de 2 millions de TEP, avec une attention particulière pour leur fabrication locale à l'horizon 2030 (ME, 2017).

IV. 2. 2. 1. 3 Secteur industriel

L'activité industrielle continue de contribuer à la dégradation de la qualité de l'air dans le voisinage des localités où se trouvent implantées certaines grandes industries tels que les cimenteries, les centrales électriques, les complexes chimiques, pétrochimiques et métallurgiques etc. L'énergie n'étant pas cher, les industriels ne prêtent en général aucune attention à la réduction de la consommation.

Le programme vise à amener les industriels à plus de sobriété et de pondération dans leur consommation énergétique. En effet, l'industrie représente un enjeu pour la maîtrise de l'énergie du fait que sa consommation énergétique est appelée à croître à la faveur de la relance de ce secteur. et ce dans un contexte où les ressources énergétiques du pays se raréfient de plus en plus et la part exportable est en nette diminution.

L'objectif attendu en matière d'économie d'énergie par la promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel est évalué à plus de 34 millions de TEP. Ce taux est à atteindre par la réalisation d'audits énergétiques à raison de 50 à 100 audits par an et d'un programme d'investissement de 200 à 300 projets par an pour promouvoir la cogénération, l'amélioration et modernisation des procédés thermiques et l'amélioration de l'usage électrique. Pour plus d'efficacité énergétique, il est prévu :

- a) La généralisation des audits énergétiques et du contrôle des procédés industriels qui permettront d'identifier les gisements d'économie d'énergie substantiels et de préconiser des plans d'actions correctifs ;

- b) L'encouragement des opérations de réduction de la surconsommation des procédés industriels, à travers un soutien de l'Etat au financement de ces opérations.

Globalement, ce programme de promotion de l'efficacité énergétique ne connaît un bon taux d'avancement que dans la conversion des véhicules essences au GPL-c et un peu moins dans la consommation industriel. Il n'y a que très peu de réalisations dans le secteur du bâtiment.

IV. 2. 2. 2 Programme de développement des énergies renouvelables à l'horizon 2030

L'Algérie a adopté dès 2012 un ambitieux programme de développement des énergies renouvelables, programme qui a été revu en 2015 à la faveur de la baisse des prix du photovoltaïque. Ce nouveau programme a pour objectif d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Le programme des énergies renouvelables actualisé, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 (37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité, seront d'origine renouvelable) pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent. A travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique. Les sites retenus pour les installations se situent dans les Hauts Plateaux et dans le Sud du pays.

Malheureusement et pour des raisons diverses, ce programme connaît un grand retard dans sa concrétisation. A ce jour, et presque cinq ans après son adoption, seuls quelques 400 MW ont été installés (petites unités dans le grand Sud). A ce rythme, il est quasi impossible d'atteindre ne serait ce que la moitié de l'objectif fixé pour 2030.

En ce qui concerne notre zone d'étude, aucune installation n'est prévue. On ne connaît pas non plus quelle est la part de l'électricité renouvelable qui sera injecté dans le réseau Nord (réseau interconnecté national) qui est susceptible de desservir la zone étudié. Il y a également le fait qu'une bonne partie de l'énergie renouvelable produite dans le Sud du pays sera injecté dans le réseau isolé du Sud (C'est pratiquement le cas de toute la part d'énergie éolienne qui est

concentrée au Sud). Pour toutes ces raisons, nous n'avons pas pris en considération dans notre scénario gouvernemental l'impact du programme sur la réduction des PM-10 et du NO₂. Nous avons préféré intégrer l'impact des énergies renouvelables dans le scénario additionnel.

IV. 2. 2. 3. Calcul des émissions pour le scénario gouvernemental à l'horizon 2030

Le calcul des émissions s'effectuerait par rapport aux mesures prises par le gouvernement algérien pour chaque secteur, dans le cadre du programme d'efficacité énergétique à l'horizon 2030.

IV. 2. 2. 3. 1. Secteur routier

Les carburants utilisés par les véhicules en Algérie sont principalement les essences (65,62%), le gasoil (34,38%) et une faible part pour le GPL qui peine à se généraliser malgré une politique gouvernementale incitative depuis les années 1980.

Nous présentons en figure 30 la répartition du parc automobile par genre.

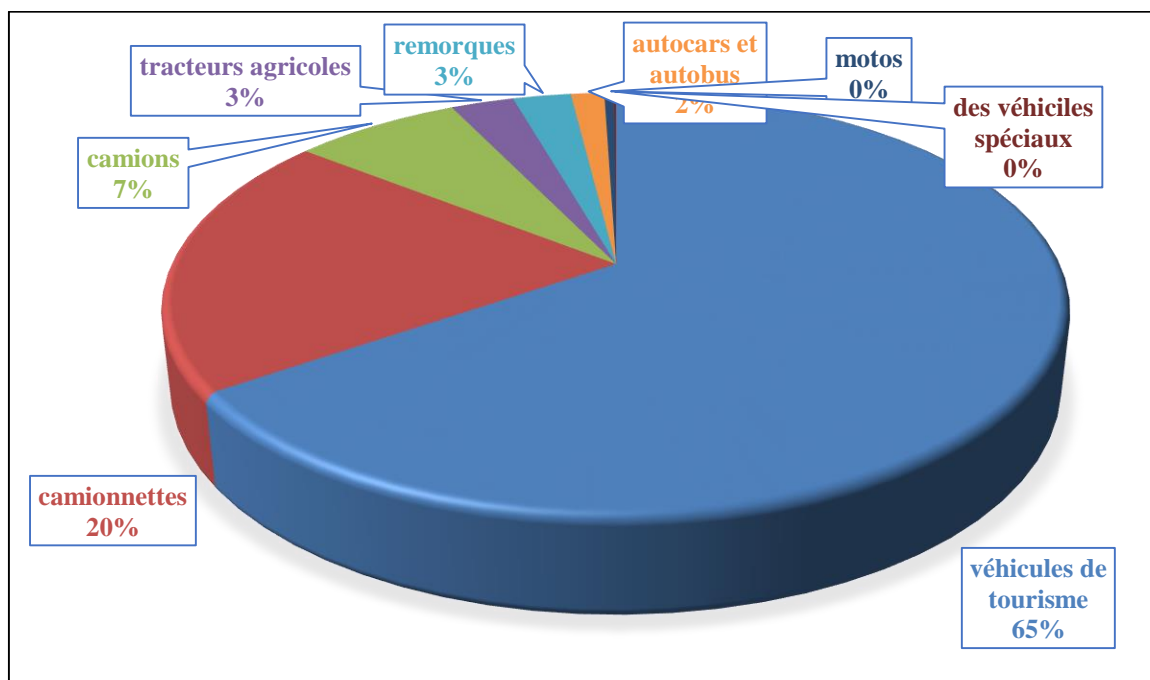


Fig. 30 Répartition du parc automobile par type de véhicules 2013 (ONS, 2012).

La composition du parc de véhicules algérien en 2012 selon l'ONS (ONS, 2012) est dominée par les véhicules particuliers (VP) à 65% suivi des véhicules utilitaires légers avec 20%, le poids lourds 13% et les autocars-autobus à 2%.

La catégorie des (VP) est dominée par la carburation essence à 80,62%, tandis que la catégorie des autocars-autobus présente une carburation essence de 2,72%.

Selon l'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME), les émissions issues des véhicules GPL sont de même ordre pour les particules et de 44 à 84% inférieures pour les NO_x, par rapport à ceux issues des véhicules essence, tandis que les émissions des particules issues des véhicules GNC sont négligeables et inférieures de 35% à celles issues des moteurs à essence pour les NO_x. En général, les filières gaz (GPL et GNC) sont les moins émettrices de particules et de NO_x (ADEME, 2017).

Vu qu'environ 26% du parc national automobile est concentré dans la Wilaya d'Alger, on suppose que sa part dans la conversion de 1,3 millions de véhicules particuliers et l'acquisition de 11 000 bus GNC et la conversion de 11 000 bus au GNC au niveau national est aussi 26%.

- a) Les émissions du trafic routier dues à la conversion de véhicules essences particuliers en véhicules GPL, sont estimées sur la base des émissions des véhicules particuliers à essence calculées en 2012 et le taux de réduction des émissions du GPL par rapport à l'essence.
- b) Les émissions du trafic routier dues à l'acquisition de bus GNC et la conversion de véhicules au GNC, sont estimées sur la base des émissions des véhicules particuliers à essence calculées en 2012 et le taux de réduction des émissions du GNC par rapport à l'essence.

IV. 2. 2. 3. 2. Secteur résidentiel

a) Isolation thermique des bâtiments

L'utilisation de polystyrène dans l'isolation des murs et du toit permet d'économiser environ 65% de la consommation d'énergie dans un bâtiment (Benoudjafer et Mokhtari, 2012). De même, les résultats de la simulation thermique (Derradji et al., 2017) ont montré que l'inertie associée à une bonne isolation thermique joue un rôle important dans l'amélioration du confort thermique et peut atteindre jusqu'à 70% d'économie d'énergie dans les logements.

La consommation d'une maison conventionnelle en Algérie et les économies d'énergie comparativement à une maison pilote efficace sont présentées en tableau 12.

Tab. 12 Besoin énergétique pour un projet de maison traditionnelle et un projet de maison pilote (AFRA, 2010).

	Maison conventionnelle (kWh)	Projet de maison pilote (kWh)	Economie d'énergie (kWh)
Chauffage	10309	4710	5599
Climatisation	2364	1645	719
Total	12673	6355	6318

L'économie d'énergie due au chauffage par le gaz naturel représente 89% de l'économie d'énergie totale, ce qui représente 6,7 millions de TEP du gaz naturel.

Vu que la population algéroise est 10% de la population totale du pays, On suppose que la part d'Alger dans l'isolation thermique représente 10% du nombre total des maisons isolées sur le territoire national (100 000 logements/an) de 2016 à 2030, dans ce cas le gain énergétique est de 0,67 millions de TEP du gaz naturel par rapport au gain total (7,6 millions de TEP).

b) Développement du chauffe-eau solaire

La valeur moyenne de la production solaire annuelle de chauffe-eau solaire peut être estimée à partir des résultats de trois régions (Adrar, Biskra et Alger). D'après le programme d'efficacité énergétique, environ 100 000 chauffe-eau solaires seront installés chaque année.

La production moyenne d'un CES est estimée à 2973,33 kWh par 4 m² (743,33 kWh/m²) (Haddad et al., 2017).

La figure 31 présente une analyse comparative de la charge annuelle de chauffage de l'eau dans un bâtiment typique en Algérie et de la production annuelle (kWh) d'un capteur solaire thermique de 4 m² pour ces régions.

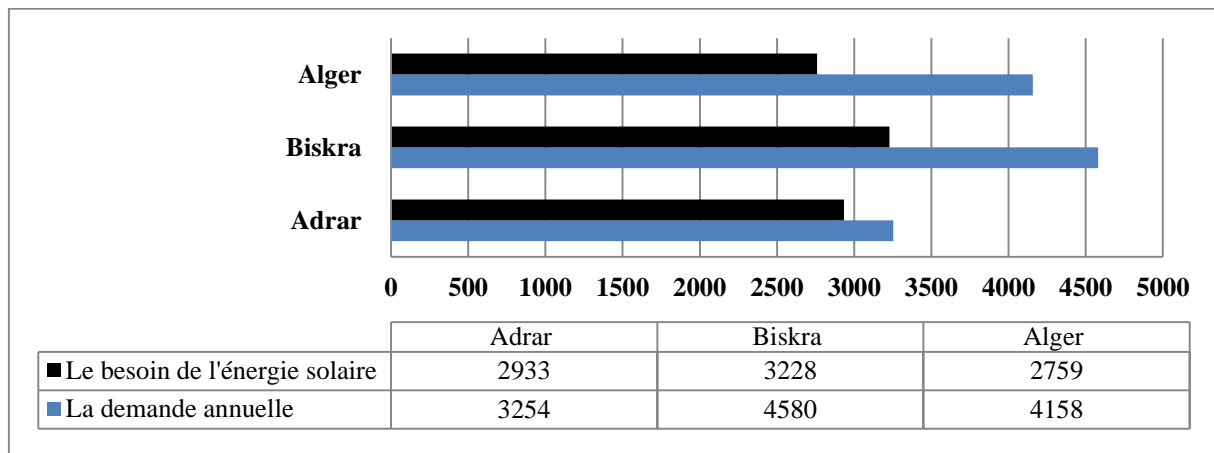


Fig. 31 Charge annuelle et gain solaire en kWh par an (Haddad et al., 2017).

Comme pour l'isolation thermique des bâtiments, On suppose que la part d'Alger dans la diffusion des CES représente 10% du nombre total (100 000 CES/an) de 2016 à 2030, dans ce cas le gain énergétique est de 0,2 millions de TEP du gaz naturel par rapport au gain total de 2 millions de TEP.

c) Emissions totales

La somme du gain énergétique de 0,67 millions de TEP du gaz naturel de l'isolation thermiques et le gain énergétique de 0,2 millions de TEP du gaz naturel de chauffe-eau solaires, représente les émissions à éviter du secteur résidentiel dans la zone d'étude en 2030.

La soustraction de l'émission de cette somme à l'émission totale du secteur résidentiel estimée auparavant par le scénario du MSQ, représente les émissions du secteur résidentiel pour le scénario gouvernemental en 2030.

IV. 2. 2. 3. 3. Secteur industriel

Les nouvelles technologies propres appliquées pour les procédés de combustion industrielle sont considérées comme des sources importantes de réduction des d'émissions de PM-10. La réduction des émissions associée à cette mesure est calculée en supposant qu'il est possible de réduire de 10% les émissions de PM-10 (Duque et al., 2016).

Ainsi, à l'horizon 2030, les émissions des PM-10 issues du secteur industriel pour le scénario gouvernemental sont estimées en appliquant une réduction de 10% sur les émissions des PM-10 estimées pour le scénario MSQ pour le secteur industriel.

IV. 2. 3. Scénario additionnel à l'horizon 2030

Ce scénario est basé sur le scénario gouvernemental dans lequel on ajoute des mesures additionnelles pour diminuer la consommation énergétique et par conséquent les émissions atmosphériques dans l'air.

Comme mentionné auparavant, la consommation actuelle d'énergie se divise comme suit : 40% de transport, 40% de résidentiel, 10% dans l'industrie et 10% dans l'agriculture. Le gros de la consommation nationale de l'énergie se situe donc dans le transport et le résidentiel (ME, 2017).

IV. 2. 3. 1. Secteur routier

Pour ce secteur, la demande énergétique va devenir importante dans les prochaines années du fait de l'augmentation du parc automobile. Pour cela, des mesures devraient inciter par les autorités pour réduire la consommation des carburants fossiles au vue des conséquences sur l'économie, l'environnement et le climat.

D'après le Ministère de l'Energie et avec sa politique de subvention, l'Algérie figurait parmi les pays où l'énergie est la moins chère.

A titre d'exemple, le tableau 13, illustre une comparaison entre les prix en Algérie avec ceux en Europe des carburants les plus utilisés par le secteur du transport en Algérie.

Tab. 13 Comparaison entre les prix des carburants en Algérie avec ceux en Europe (Bahloul et al., 2018).

Carburant	Prix en Algérie	Prix moyen en Europe
Essence	42 da/litre	1,45 euro/litre (195,75 da/litre)
Diesel	23 da/litre	1,3 euro /litre (175,5 da/lite)

La politique de subvention par l'Etat des carburants n'est pas une solution durable. Elle génère un certain gaspillage et même une fuite vers les pays limitrophes. Pour faire face à cette situation, l'Etat algérien est appelé à aller vers une meilleure maîtrise des coûts et permettant de réduire graduellement la consommation d'énergies fossiles pour un développement durable, en respectant l'environnement et en allant vers une sobriété énergétique.

IV. 2. 3. 2. Secteur résidentiel

Selon les perspectives et comme signalé auparavant, la population algérienne atteindra 55 millions d'habitants d'ici 2030. Avec une consommation de 1,95 TEP/habitant, la consommation de l'Algérie sera de 107,25 millions de TEP d'ici 2030. Une politique audacieuse de promotion des énergies renouvelables, par exemple un objectif de 50% de cette consommation serait d'origine renouvelable, permettra d'avoir 54 millions de TEP de renouvelable à répartir sur les différents secteurs comme suit : 10% agriculture, 10% industrie, 40% transport, 40% résidentiel (ME, 2017).

Pour cela, une étude préliminaire faite à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, montre que l'on peut mettre en place un modèle énergétique qui aboutira en 2030 à une consommation d'énergie renouvelable à 50%, en réduisant la part de l'énergie fossile et par conséquent en réduisant les émissions atmosphériques (Bahloul et al., 2018). Dans ce cas, la production énergétique, soit 50% renouvelable se répartie en 80% énergie solaire et 20% énergie éolienne.

Avec l'électricité renouvelable produite, il est ainsi tout à fait possible d'aller graduellement vers une consommation domestique basée sur la cuisson électrique (plaques chauffantes...), l'eau chaude sanitaire (en partie électrique et en partie provenant du chauffe-eau solaire), le chauffage des habitations, qui se fait actuellement avec le gaz naturel.

Les tendances tracées dans cette étude montrent l'effort à faire pour ajouter une capacité additionnelle de près de 25 000 MWh en renouvelable ce qui permettrait rien que pour l'année 2030, une économie de près de 40 milliards de m³ de gaz naturel, soit au total sur la douzaine d'années près de 300 milliards de m³ de gaz épargné qui profiteront aux générations futures (Amouz et al., 2018).

IV.2.3.3. Calcul des émissions pour le scénario additionnel à l'horizon 2030

Le calcul se fait en tenant compte de mesures additionnelles relatives au secteur du transport et au secteur résidentiel par rapport au scénario gouvernemental.

IV.2.3.3.1. Secteur routier

Selon l'Agence de Régulation des Hydrocarbures (ARH) (2017), la consommation nationale de l'essence est passée de 4,43 millions de tonnes en 2015 à 4,27 millions de tonnes en 2016, pour atteindre 4,15 millions de tonnes en 2017, soit une baisse de 6,3% entre 2015 et 2017.

Pour le gas-oil, la consommation est passée de 10,8 millions de tonnes en 2015 à 10,3 millions de tonnes en 2016, pour atteindre 10,08 millions de tonnes en 2017, en recul de 6,6% entre 2015 et 2017 comme montre le tableau suivant.

Tab. 14 Evolution de la consommation nationale des carburants terre 2014-2018[unité : million de tonnes] (ARH, 2017).

Carburant	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Gas-oil	8,221	8,810	9,440	9,784	9,978	10,616	10,323	10,080
Essence	2,697	3,028	3,415	3,826	4,124	4,428	4,269	4,170

Cette baisse est due, entre autre, à l'ajustement annuel des prix des carburants (augmentation de pas moins de 40% des prix à la pompe des essences et du gas-oil) à partir du 1er janvier 2016. Il y a donc diminution bien que le parc automobile continue à croître (ARH, 2017).

Sur la base de ces données et compte tenu du fait que l'état va certainement continuer à revoir à la hausse les prix des carburants, nous avons retenu pour notre scénario, une réduction minimale de 10% de consommation des carburants, ce qui induira en moyenne une diminution de l'ordre de 10% du kilométrage parcouru. Cette action contribuera nécessairement à la diminution de l'impact des émissions du trafic routier sur la qualité de l'air. Dans ce cas les émissions des PM-10 et de NO₂ seront diminuées de 10% par rapport au scénario gouvernemental.

IV. 2. 3. 3. 2. Secteur résidentiel

Par application de 50% des énergies renouvelables dans le secteur résidentiel, les émissions en 2030 pour le scénario additionnel sont calculées en appliquant 50% de réduction dans les émissions de NO₂ par rapport aux émissions dans le scénario MSQ en 2030.

IV.3. Variation des émissions par les PM-10 et le NO₂ pour les scénarios prévisionnels en 2030

Le tableau 15 résume les mesures citées pour les scénarios étudiés.

Tab. 15 Mesures choisies avec leurs codes pour les scénarios prévus.

Scénarios (2030)	Code	Mesures
MSQ	M1	Application de taux d'augmentation annuelle pour le trafic routier ;
	M2	Application de taux d'augmentation annuelle pour le résidentiel;
	M3	Application de taux d'augmentation annuelle pour l'industrie.
Scénario gouvernemental	M4	Conversion de véhicules essences particuliers en véhicules GPL et GNC;
	M5	Isolation thermique des bâtiments et le développement du chauffe-eau solaire ;
	M6	Réalisation d'audits énergétiques dans le secteur industriel
Scénario additionnel	M7	Augmentation du prix de l'énergie (-10 du kilométrage parcouru) ;
	M8	Application de 50 % de l'énergie renouvelables dans le résidentiel.

Les mesures appliquées pour le secteur du trafic routier sont M1, M4 et M7;

Les mesures appliquées pour le secteur résidentiel sont M2, M5 et M8;

Les mesures appliquées pour le secteur industriel sont M3 et M6.

Chaque source d'émissions est classée selon la nomenclature SNAP développée par l'Union Européenne dans le cadre du projet CORINAIR (EEA, 2001). Cette nomenclature comporte 11 niveaux, chacun étant lui-même divisé en sous-niveaux (Annexe 2).

Les variations des émissions des PM-10 et de NO₂ pour 2030 pour tous les scénarios prévisionnels prévus par rapport aux émissions du scénario de base (2012) sont présentées en tableau 16.

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

Tab. 16 Impact des scénarios prévisionnels prévus (2030) sur la variation des émissions des PM-10 et de NO₂ par SNAP dans la région d'Alger (le scénario MSQ est comparé à l'année de référence 2012, le scénario gouvernemental est comparé au scénario MSQ et le scénario additionnel est comparé au scénario gouvernemental).

SNAP	Code de mesures	% de la variation de l'émission des PM-10			% de la variation de l'émission des NO ₂		
		Scénario MSQ	Scénario gouvernemental	Scénario additionnel	Scénario MSQ	Scénario gouvernemental	Scénario additionnel
SNAP7	M1	+42	/	/	+42	/	/
	M4	/	-30,5	/	/	-10,5	/
	M7	/	/	-10	/	/	-10
SNAP2	M2	+45	/	/	+45	/	/
	M5	/	/	/	/	-11,5	/
	M8	/	/	/	/	/	-59,5
SNAP(1+3+4)	M3	+0,05	/	/	+7,5	/	/
	M6	/	-10	/	/	-10	/

L'impact de ces mesures d'émission pour tous les scénarios sur la qualité de l'air sera estimé dans la section suivante, en utilisant le model TAPM.

IV. 4. Modélisation de la qualité de l'air pour les trois scénarios prévisionnels

La simulation des PM-10 et de NO₂ dans la région d'Alger (domaine D03), pour les différents scénarios prévisionnels établis pour l'année 2030, permet d'identifier, dans l'espace et le temps, les pics de pollution. Comme entrée de la simulation de la pollution, le même fichier météorologique de l'année 2012 est utilisé.

IV. 4. 1 Résultats de simulation de la pollution et discussion

Les résultats obtenus des deux polluants simulés PM-10 et NO₂ avec l'application du modèle TAPM pour les trois scénarios prévisionnels en 2030 sont présentés sous forme de cartes de distribution, en utilisant la même échelle de couleurs.

Les Figures 32 à 35, illustrent la distribution des concentrations moyennes annuelles des PM-10 et de NO₂ en (µg/m³) simulées avec TAPM pour l'année de référence (2012), les scénarios MSQ, gouvernemental et additionnel, respectivement, en 2030.

Année de référence (2012)

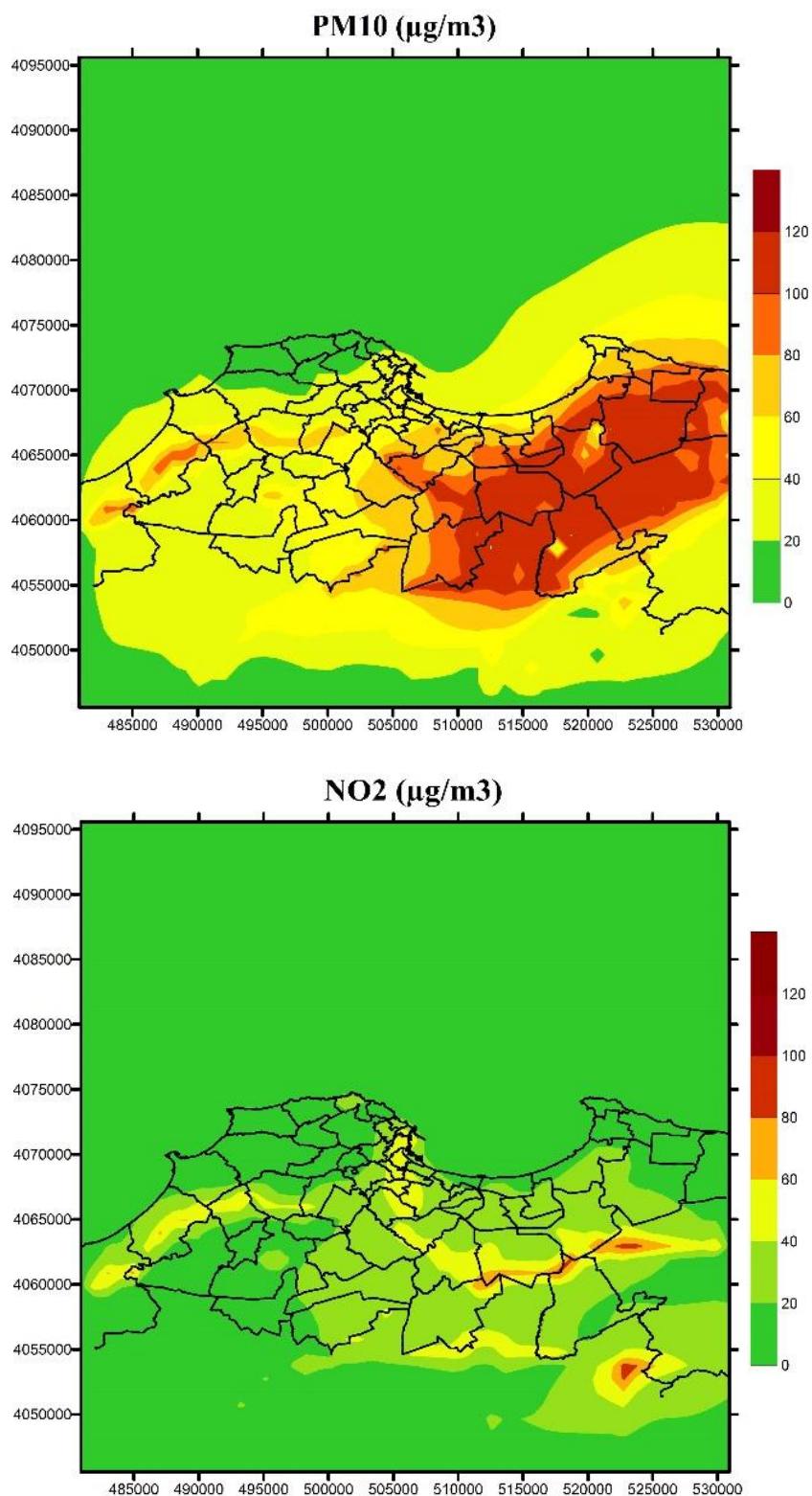


Fig. 32 Concentrations moyennes annuelles des PM-10 et de NO₂ en (µg/m³) simulées avec TAPM pour l'année de référence (2012) dans la zone d'étude. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres).

Scénario1 : Scénario MSQ (BaU) pour l'année 2030.

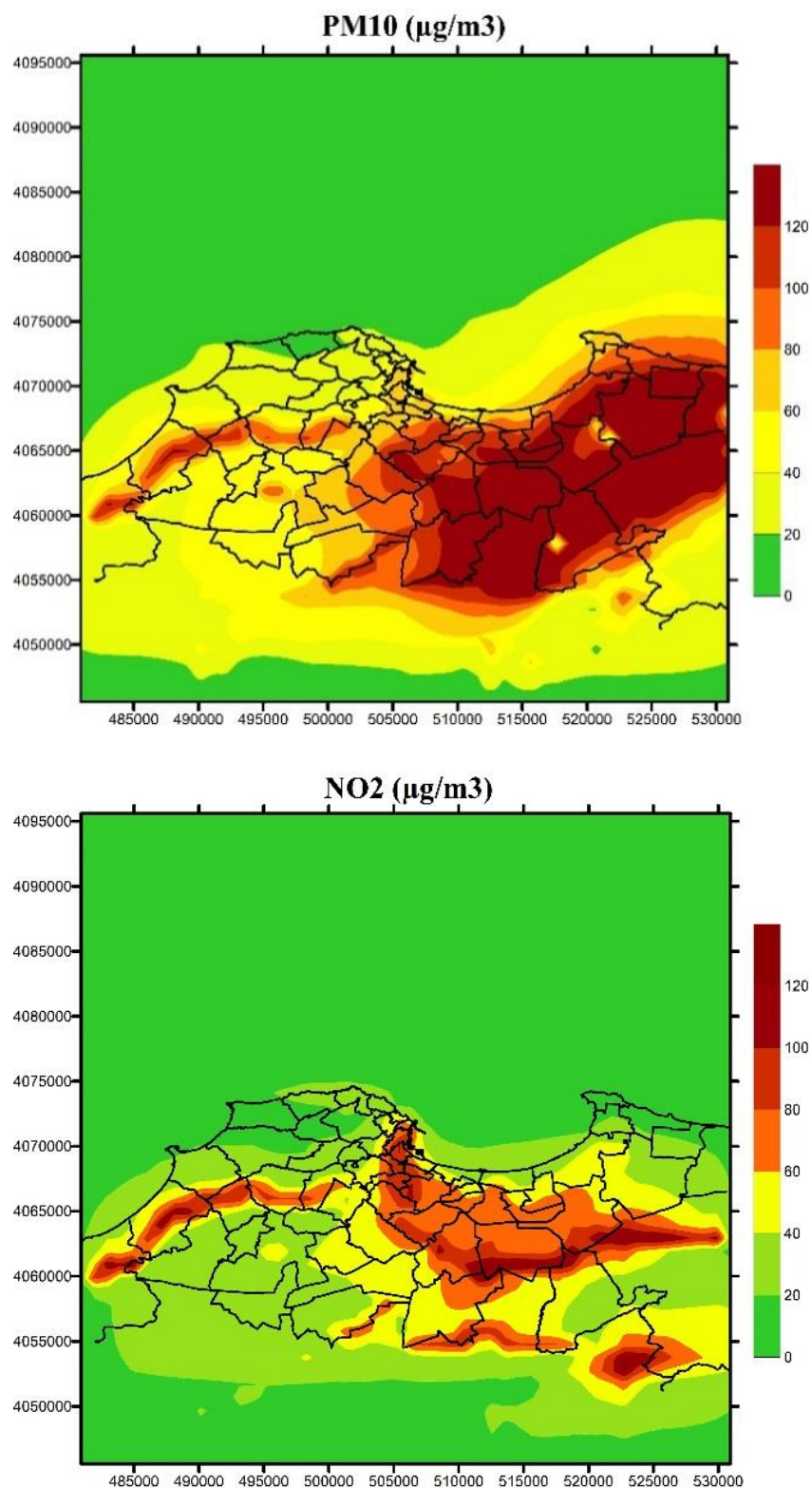


Fig. 33 Concentrations moyennes annuelles des PM-10 et de NO₂ en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) simulées avec TAPM pour le scénario MSQ (2030) dans la zone d'étude. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres).

Scénario 2 : Scénario gouvernemental pour l'année 2030.

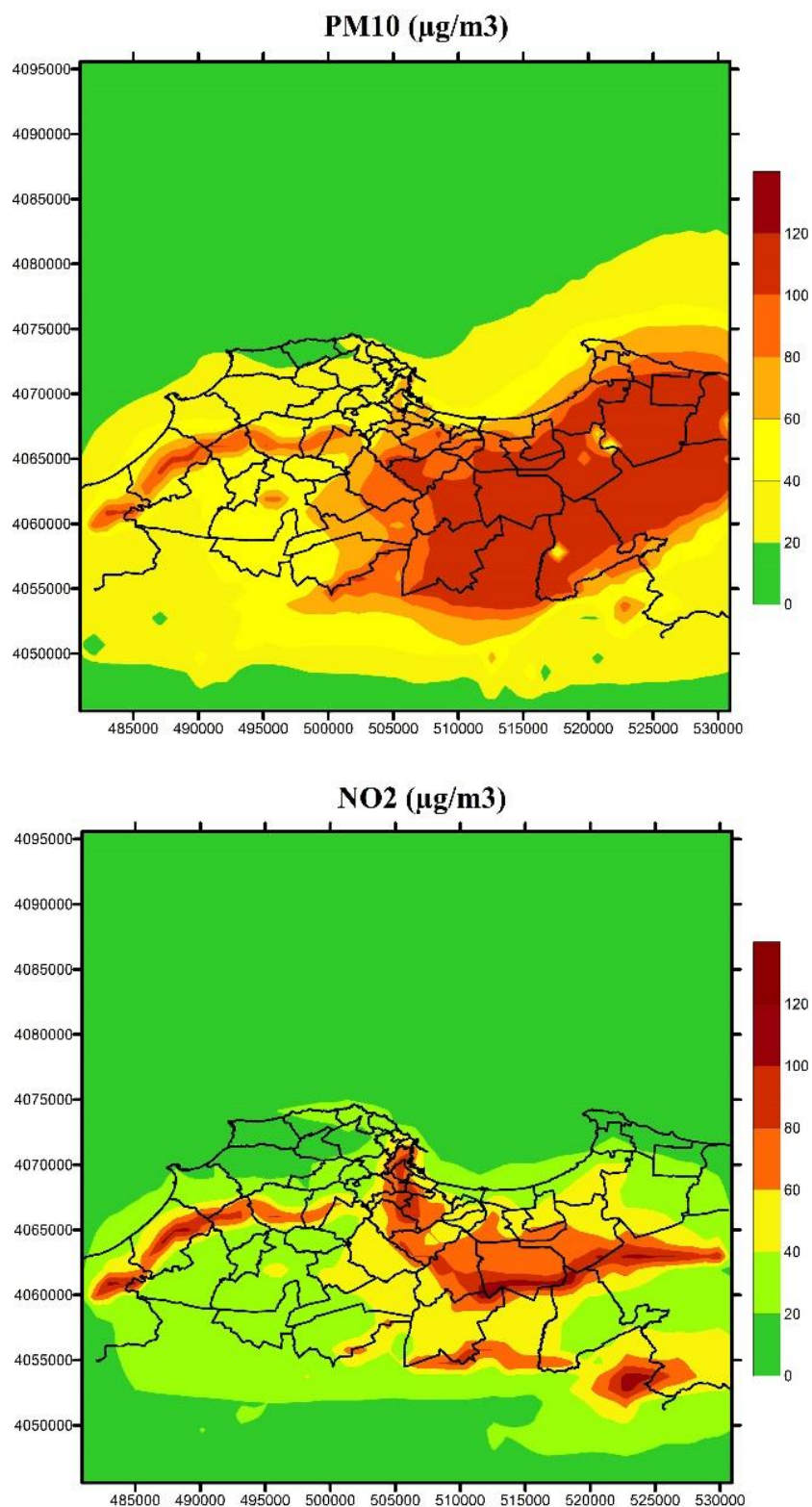


Fig. 34 Concentrations moyennes annuelles des PM-10 et de NO₂ en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) simulées avec TAPM pour le scénario gouvernemental (2030) dans la zone d'étude. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres).

Scénario 3 : Scénario additionnel pour l'année 2030.

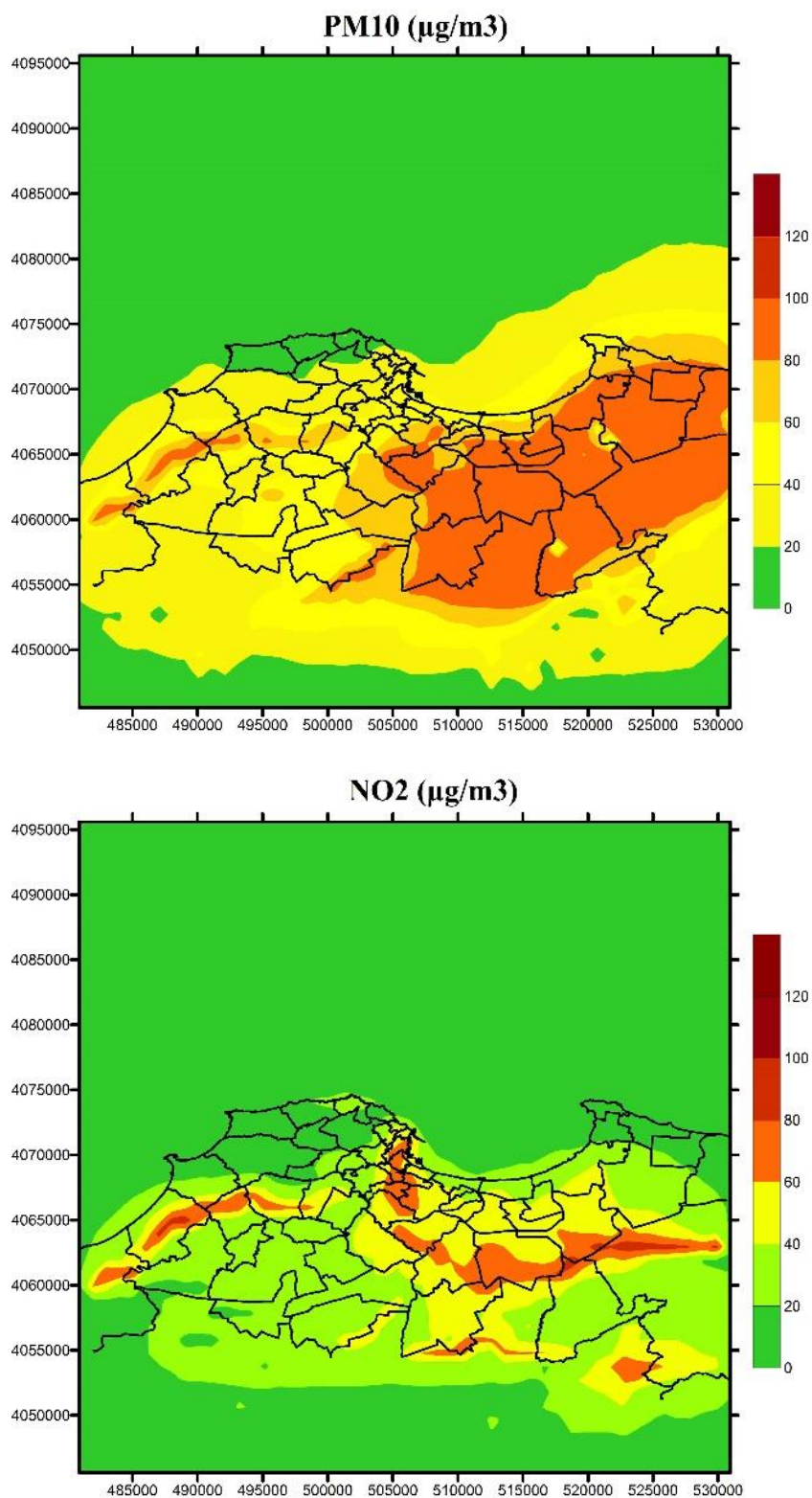


Fig. 35 Concentrations moyennes annuelles des PM-10 et de NO₂ en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) simulées avec TAPM pour le scénario additionnel (2030) dans la zone d'étude. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres).

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

Les résultats de la modélisation de scénario MSQ montrent des moyennes annuelles largement plus élevées des deux polluants ($PM_{10} > 129 \mu g/m^3$ et $NO_2 > 124 \mu g/m^3$) que celles de l'année de référence 2012, et ce principalement dans les régions autour des grands axes du trafic routier et des zones industrielles. Les dépassements des normes sont alors plus importants. Globalement, cette prévision où des mesures de réduction des émissions ne sont pas mises en œuvre, présente un niveau élevé de pollution.

Dans le cas des deux scénarios gouvernemental et additionnel, on enregistre des moyennes annuelles moins élevées (PM_{10} et $NO_2 < 110 \mu g/m^3$ pour le scénario gouvernemental et PM_{10} et $NO_2 < 95 \mu g/m^3$ pour le scénario additionnel). La distribution spatiale de la pollution ne change pratiquement: les teneurs les plus faibles sont enregistrées dans les zones suburbaines à l'ouest d'Alger.

Les figures 36 et 37, illustrent la distribution de la réduction (en pourcentage et concentration) des moyennes annuelles des PM_{10} et de NO_2 pour le scénario gouvernemental en comparaison avec le scénario MSQ.

Scénario 2 : Scénario gouvernemental pour l'année 2030.

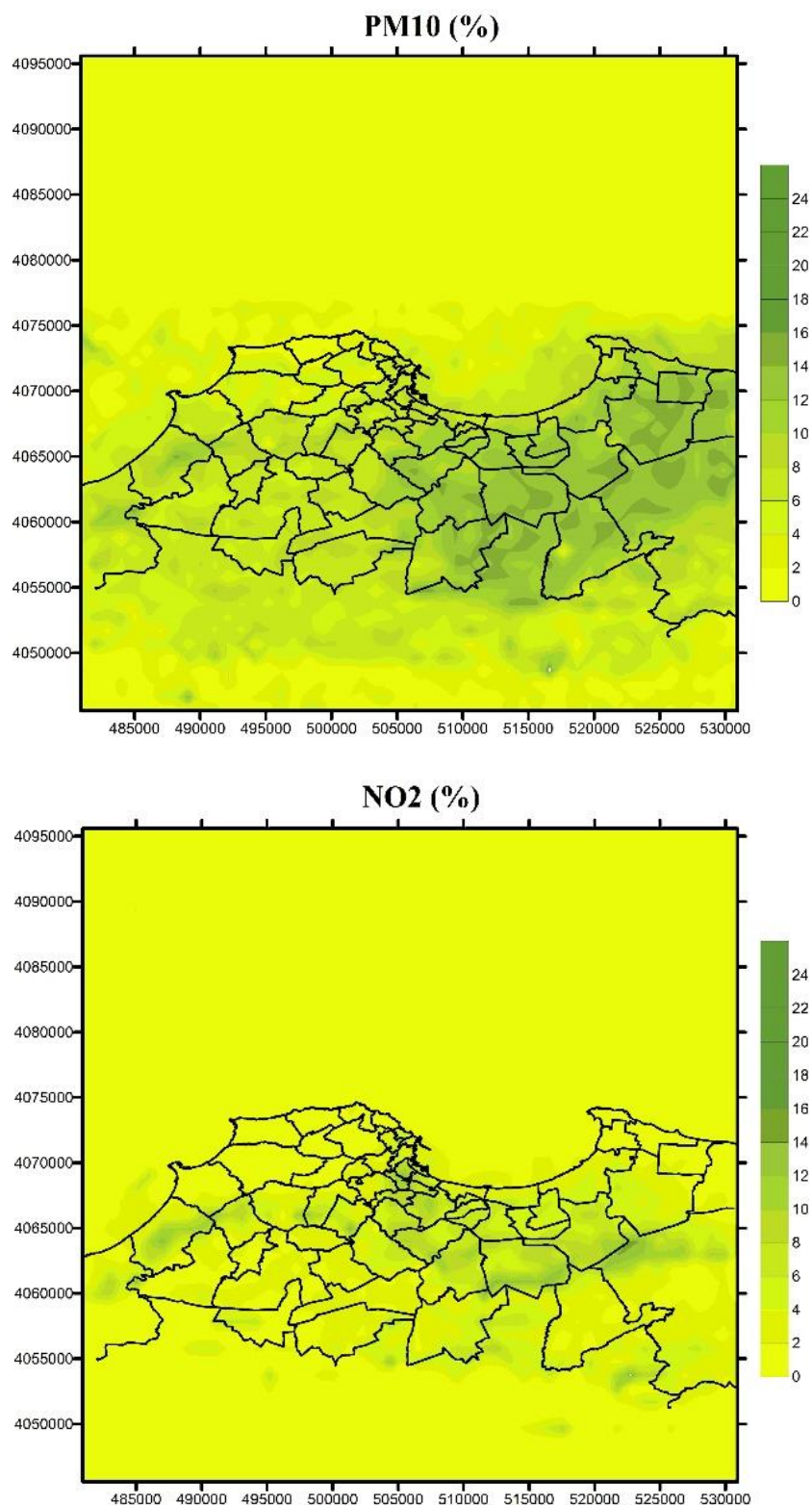


Fig. 36 Réduction (en pourcentage) des moyennes annuelles des PM-10 et de NO₂ pour le scénario 2 (scénario gouvernemental) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres).

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

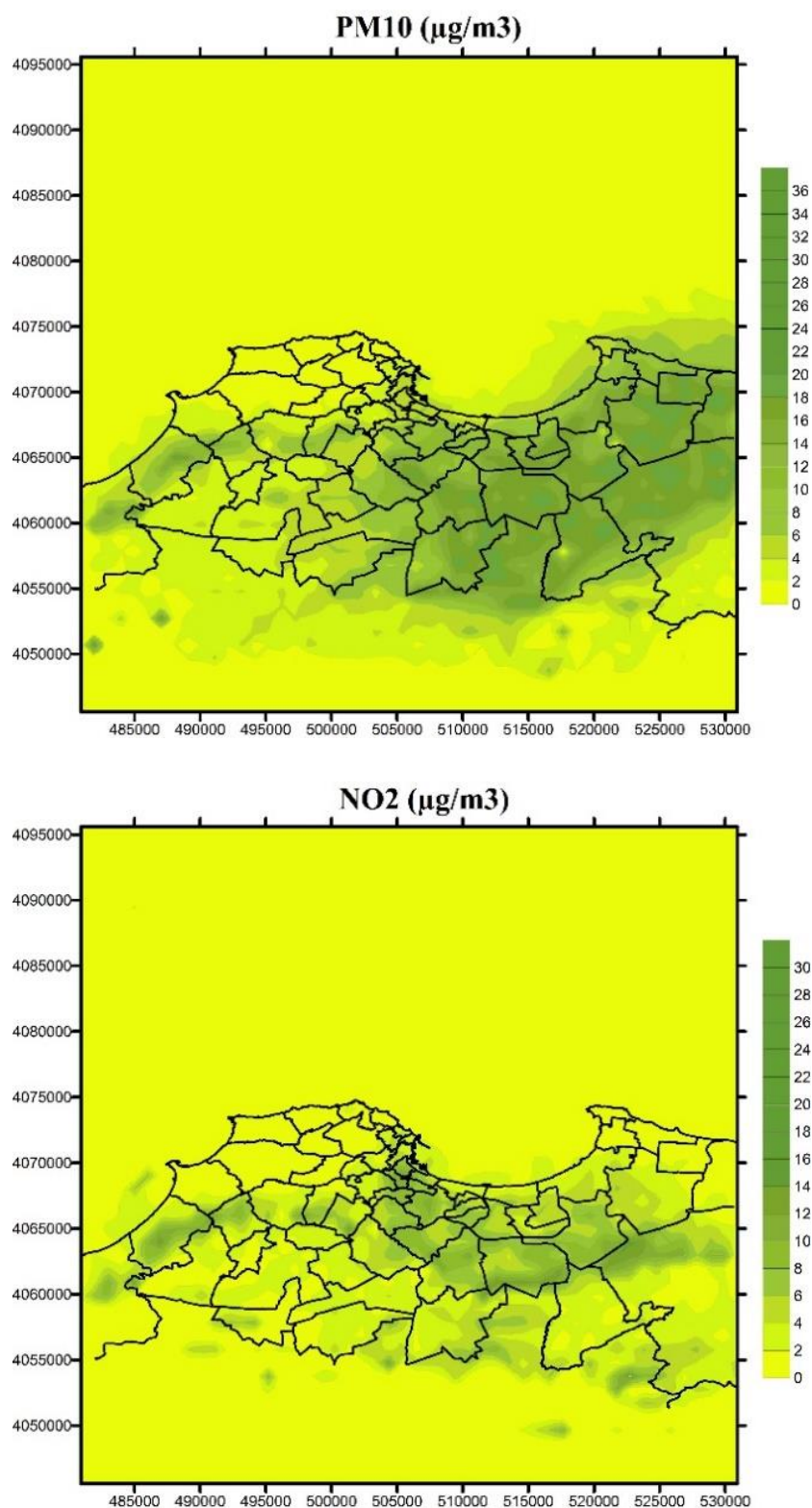


Fig. 37 Réduction (en concentration) des moyennes annuelles des PM-10 et de NO₂ pour le scénario 2 (scénario gouvernemental) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres).

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

Il en résulte que le scénario gouvernemental engendre des réductions qui sont de l'ordre de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-10, et de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le NO_2 .

Les mesures portant sur la conversion des véhicules au GPL et l'introduction de l'isolation thermique et des équipements solaires dans le résidentiel entraînent sur toute la zone du grand Alger une réduction de 16% des niveaux des PM-10 et de réduction de 15% de NO_2 .

Développer le GPL en tant que carburant pour les véhicules, permettra d'une part, de réduire les émissions des polluants, car le GPL est plus propre et d'autre part, d'augmenter l'exportation des produits provenant du raffinage du pétrole.

Les Figures 38 et 39, présentent une comparaison de la distribution de la réduction (en pourcentage et concentration) des teneurs moyennes annuelles des PM-10 et de NO_2 pour le scénario additionnel avec le scénario MSQ.

Scénario 3 : Scénario additionnel pour l'année 2030.

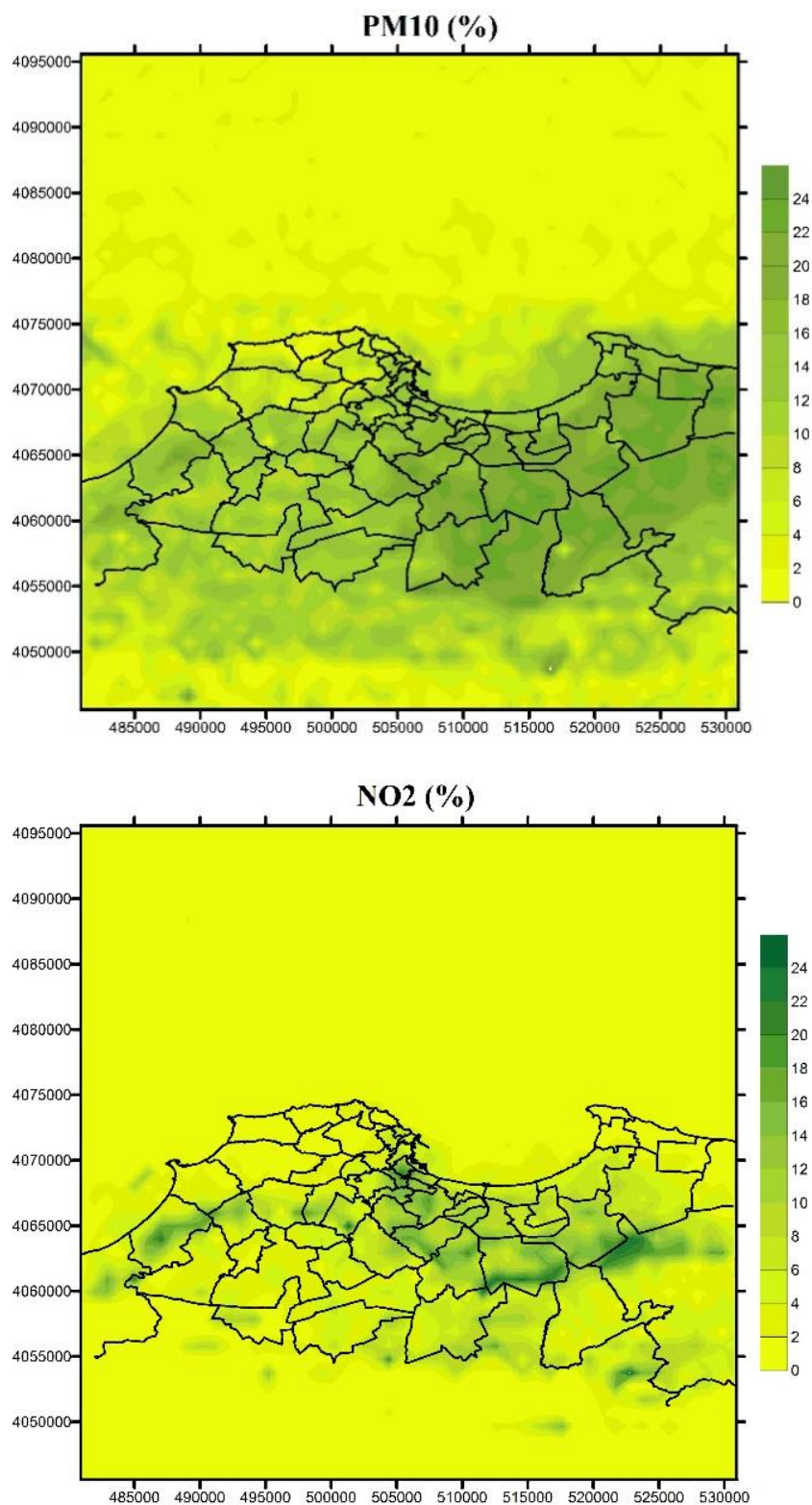


Fig. 38 Réduction (en pourcentage) des moyennes annuelles des PM-10 et de NO₂ pour le scénario 3 (scénario additionnel) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres).

Scénario 3 : Scénario additionnel pour l'année 2030.

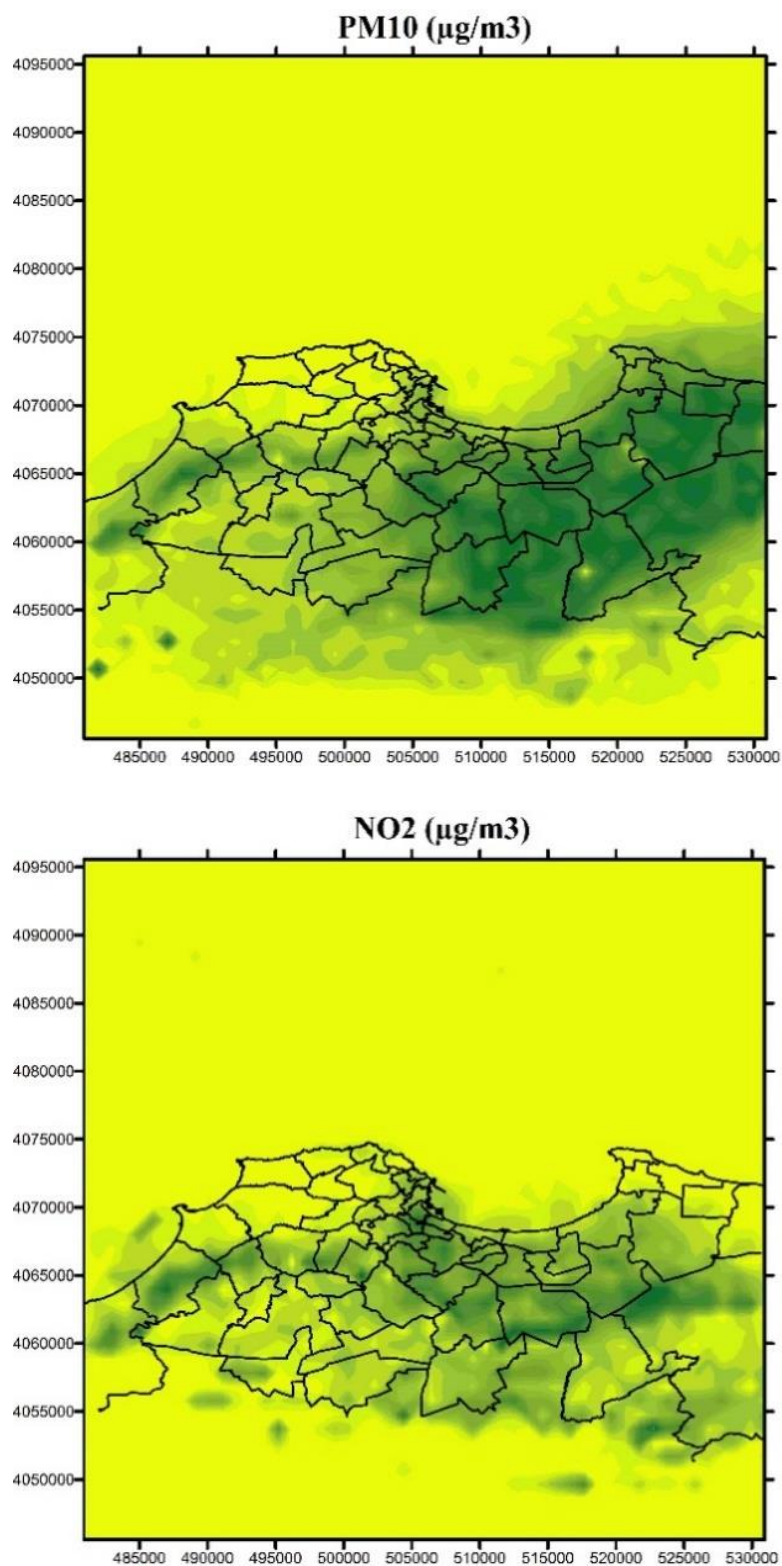


Fig. 39 Réduction (en concentration) des concentrations moyennes annuelles des PM-10 et de NO₂ pour le scénario 3 (scénario additionnel) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées géographiques (échelle) sont UTM (mètres).

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

Les figures 38 et 39 montrent la réduction simulée lorsque toutes les mesures sélectionnées par le scénario additionnel sont appliquées simultanément afin d'évaluer l'atténuation maximale atteinte avec les mesures identifiées.

Cette comparaison montre que des réductions plus importantes sont obtenues avec l'application simultanée des mesures du scénario additionnel (scénario 3), en termes de magnitude et de couverture spatiale, ces mesures d'atténuation de la pollution issue du résidentiel et du trafic routier permettent d'atteindre des réductions allant jusqu'à 25% pour les PM-10 et 24% pour le NO₂. Cela correspond à des réductions des teneurs annuelles de l'ordre de 35 et 30 µg/m³ pour les PM-10 et le NO₂, respectivement, l'atténuation est observée sur toute la zone d'étude.

Cette étude sur les scénarios à horizon 2030 montre que dans le cas où la politique environnementale du pays ne connaît pas de grands changements, la pollution va s'accroître et la qualité de l'air ne sera pas assurée. Dans le scénario 2, la mise en œuvre de la stratégie de l'efficacité énergétique du programme gouvernemental 2015-2030 se traduit par une réduction sensible de la pollution de l'air dans le grand-Alger. Ce n'est cependant que dans le cas du scénario 3 qui se caractérise par des mesures volontaristes de protection de l'environnement dans le cadre du développement durable qu'on peut atteindre une réduction significative de la pollution de l'air.

Ces résultats de modélisation, ainsi que la méthodologie correspondante constituent sans aucun doute des données particulièrement importantes pour les décideurs dans la définition d'une stratégie d'amélioration de la qualité de l'air à moyen terme et de sortir de la situation actuelle de non-conformité à la législation sur la qualité de l'air.

IV.5. Impacts de l'exposition aux PM-10 et NO₂ sur la santé humaine

Selon OMS (2006), la mortalité est l'indicateur le plus employé pour évaluer les effets sanitaires de la pollution atmosphériques, Cet indicateur agrège toutes les causes possibles et est, surtout, celui qui est le mieux documenté dans le temps.

En Algérie, on ne dispose pas encore d'études épidémiologiques spécifiques sur les relations entre les niveaux de pollution mesurés et des indicateurs de santé notamment cardio-respiratoires.

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

Des études expérimentales, généralement toxicologiques permettent de mettre en évidence les liens de cause à effets entre les polluants de l'air et les effets sanitaires. Aujourd'hui, des études d'impacts sanitaires, qui s'appuient sur des études épidémiologiques, permettent de quantifier ces impacts à partir de fonctions « concentration - réponse » (Meurisse, 2013 ; Hamra et al., 2015 ; Wing et al., 2018).

L'évolution démographique est sans aucun doute un facteur déterminant à l'origine de l'état sanitaire de la population à côté de la situation de développement économique (Terniche, 2016).

Dans cette partie d'étude, on calcule le taux de mortalité totale par les deux polluants PM-10 et NO₂ dans la zone d'étude.

A cet effet, on réalise d'abord des cartes de distribution de la population pour l'année de référence 2012 et l'année de prévision 2030 par Arc Gis. les données de distribution sont utilisées pour calculer la mortalité correspondante. Les figures 40 et 41, présentent la distribution spatiale de la densité de population sur Alger pour 2012 et 2030.

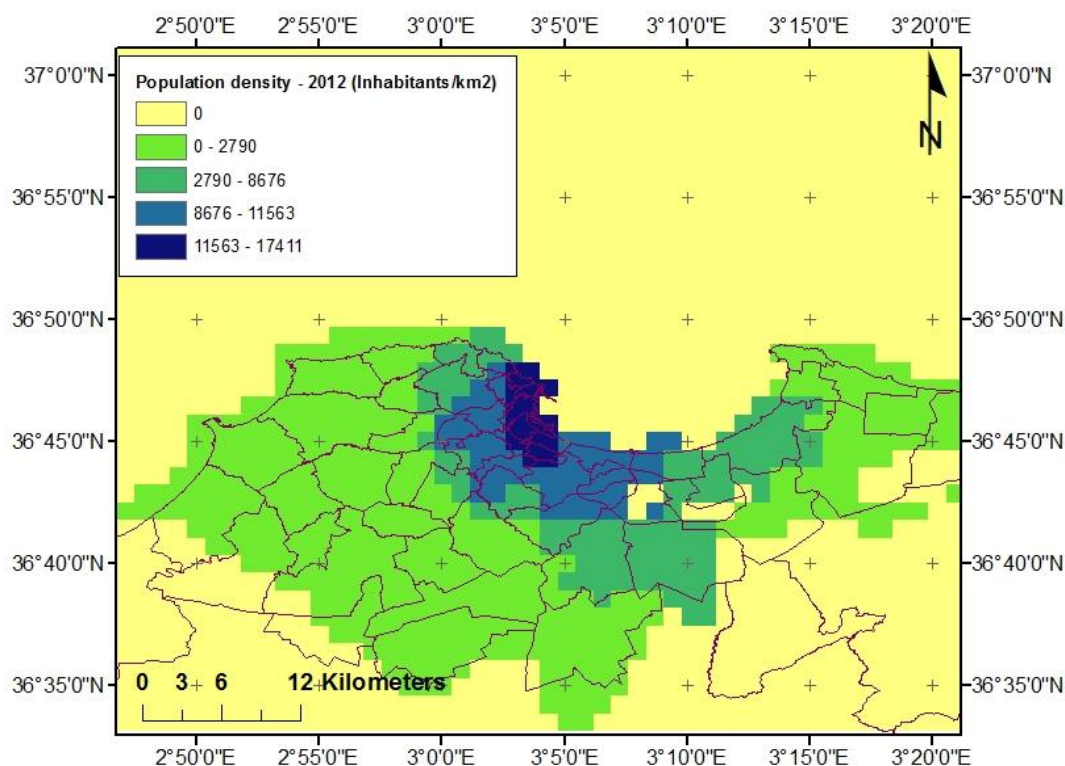


Fig. 40 Distribution de la densité de population algéroise en 2012. Les coordonnées (échelle) sont UTM (degrés).

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

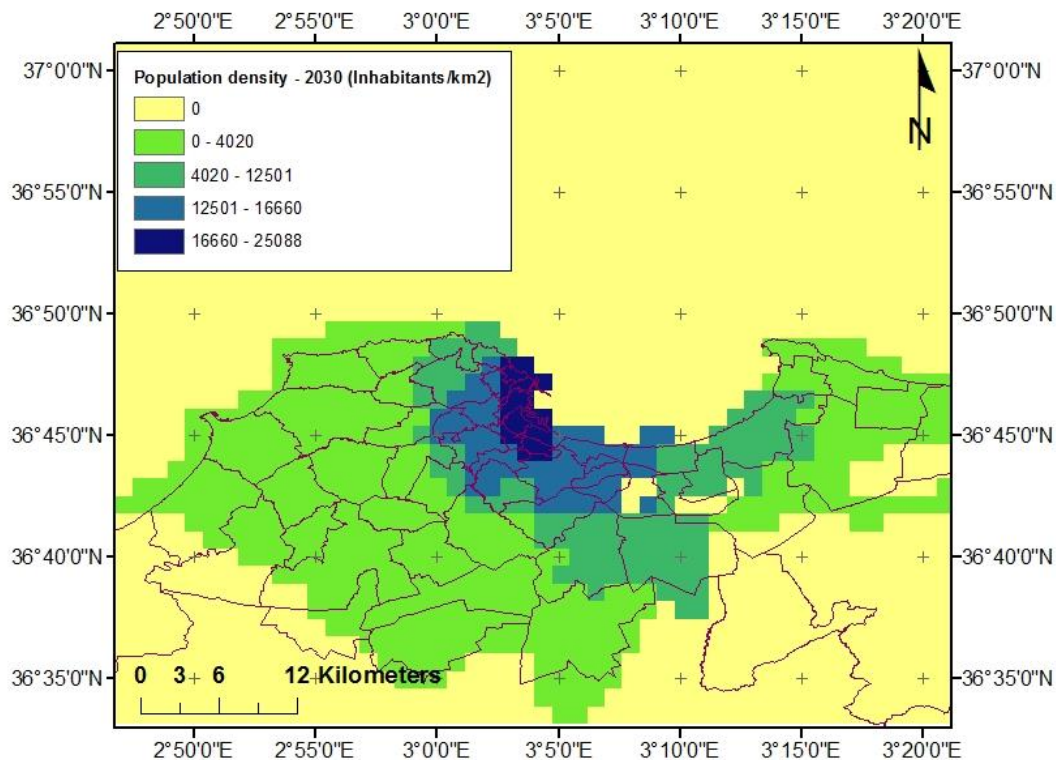


Fig. 41 Distribution de la densité de population algéroise en 2030. Les coordonnées (échelle) sont UTM (degrés).

La distribution géographique de la population algéroise en 2012 et 2030, telles que présentée sur les cartes Arc Gis en figures 40 et 41, montrent que l'hyper centre d'Alger présente la densité de la population la plus élevée suivi du centre, première et deuxième couronnes, avec une augmentation significative enregistrée en 2030.

IV. 5. 1. Effets de la pollution atmosphérique en termes de mortalité

Le taux de mortalité est défini par le rapport entre le nombre de décès de l'année et la population totale moyenne de l'année (OMS, 2016). Une relation significative a été mise en évidence entre l'exposition à la pollution atmosphérique et la mortalité toutes causes confondues.

L'estimation du taux de mortalité engendré par l'exposition humaine aux niveaux des polluants simulés pour l'année de référence (2012) ainsi que les différents scénarios étudiés, permet une meilleure connaissance des associations entre la concentration ambiante des polluants atmosphériques et l'impact sur la santé.

Ces études mettent plus particulièrement en évidence une association significative entre l'exposition chronique à la pollution atmosphérique et la mortalité cardiorespiratoire.

IV. 5. 2. Estimation de l'exposition

L'objectif de cette étape est de quantifier l'exposition de la population de la zone d'étude à la pollution atmosphérique par les deux polluants PM-10 et NO₂. Un indicateur d'exposition est calculé pour chaque polluant selon la moyenne annuelle des concentrations simulées et le taux de mortalité.

En ce qui concerne les effets sur la santé de la pollution de l'air, les aspects suivants sont pris en compte dans les études épidémiologiques : (i) les polluants impliqués et leurs niveaux de concentration dans l'air ; (ii) les indicateurs de santé analysés en termes de morbidité et de mortalité ; (iii) les groupes d'âge touchés ; et (iv) le temps d'exposition.

La méthode mise en œuvre permet d'estimer à l'échelle d'une agglomération l'impact sanitaire attendu d'une baisse de la pollution atmosphérique (EC, 2005):

$$\Delta Ri = I_{ref} \times CRF_{i,p} \times \Delta C_p \times pop \quad (13)$$

Où :

ΔRi : Réponse en fonction du nombre d'implications défavorables (cas, jours ou épisodes) sur tous les indicateurs de santé ($i = 1, \dots, n$);

I_{ref} : Taux annuel de morbidité / mortalité de référence (%);

$CRF_{i,p}$: Coefficient de corrélation entre la variation de la concentration du polluant p et la probabilité de connaître ou d'éviter un indicateur de santé spécifique i (% , Risque relatif (RR) associé à un changement de concentration de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$);

ΔC_p : Modification de la concentration du polluant p ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) après l'adoption de mesures de réduction (scénarios d'émission);

pop : Unités de population par groupe d'âge exposé au polluant p.

Les risques relatifs (RR) associés aux PM-10 et NO₂ sont 0,6 et 0,55 respectivement (OMS, 2013).

Les données de mortalité ont été obtenues auprès de l'ONS. Les données sont sélectionnées à partir de la cause principale de décès et correspondent au nombre de décès toutes causes confondues hors mort violente et/ou accidentel des personnes résidant dans la zone d'étude, tous âges confondus.

Le taux brut de mortalité pour l'année 2012 est de 4,44‰ (ONS, 2012), tandis que le taux moyen annuel de mortalité dans 10 ans est de 4‰, ce taux est maintenu pour calculer la mortalité totale à l'horizon 2030.

IV. 5. 3. Résultats de l'estimation de l'exposition de la population de la zone d'étude à la pollution atmosphérique par les PM-10 et le NO₂ pour l'année de référence (2012) ainsi que les trois scénarios prévisionnels à l'horizon 2030

Dans cette partie, on présente les résultats de l'estimation de l'exposition de la population à la pollution atmosphérique par les deux polluants considérés.

La Figure 42 présente le nombre de décès par an pour l'année de référence 2012 et les trois scénarios prévisionnels en 2030 dans la zone d'étude, en appliquant l'équation (13).

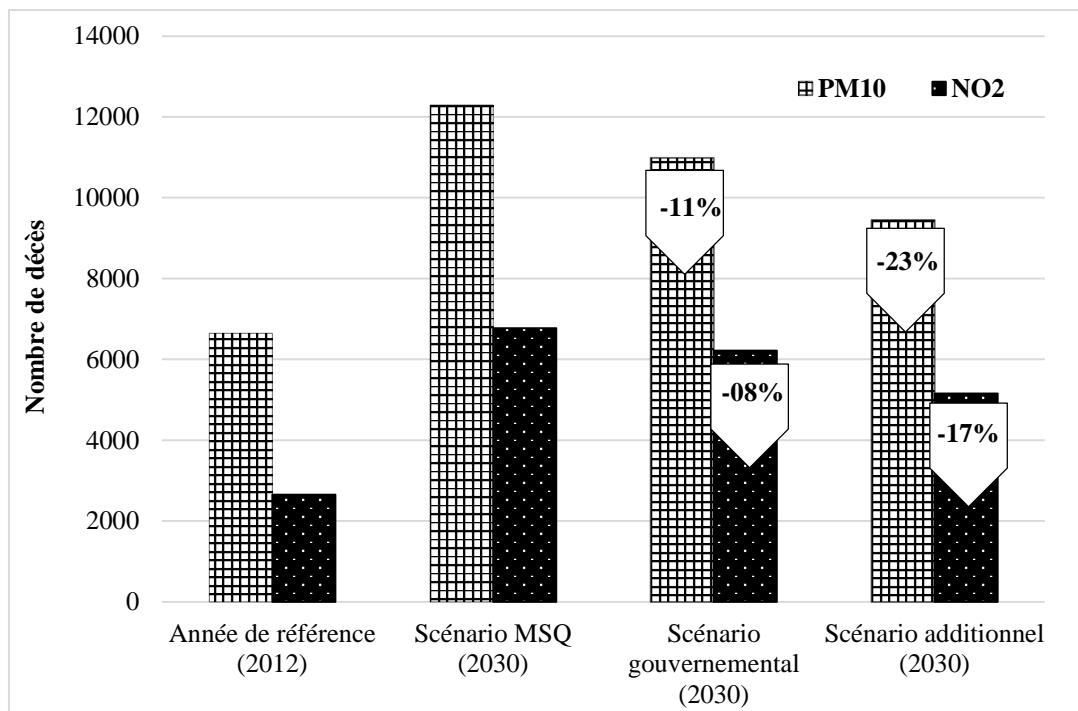


Fig. 42 Nombre de décès par an pour l'année de référence 2012 et les trois scénarios prévisionnels en 2030 dans la zone d'étude.

Au vu de ces résultats, il apparaît que le nombre de décès engendrés par les deux polluants sont de l'ordre de 9000 pour l'année 2012 est 19000 pour le scénario du MSQ en 2030, cette augmentation est due à la croissance démographique et l'augmentation du taux de pollution. En revanche, pour le scénario gouvernemental le nombre de décès estimé est d'environ 10900 causés par les PM-10 et 6200 décès liés à l'exposition au NO₂. Dans ce scénario, plus de 1800

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

décès seraient évités par les deux polluants, soit près de 11% et 8% pour les PM-10 et le NO₂, respectivement, par rapport au scénario du MSQ. Les gains de mortalité seraient également plus importants pour le scénario additionnel, ils s'élèvent à environ 23% et 17% pour les PM-10 et le NO₂, respectivement, par rapport au scénario MSQ. Ainsi, il en ressort clairement que les scénarios 2 et 3 ont un impact sanitaire important avec une réduction significative de la mortalité due à l'exposition de la population à ces deux polluants nocifs.

Les figures 43 et 44 illustrent les variations géographiques des pourcentages de réduction de la mortalité par les PM-10 et le NO₂ pour le scénario 2 (scénario gouvernemental) en comparaison avec le scénario MSQ.

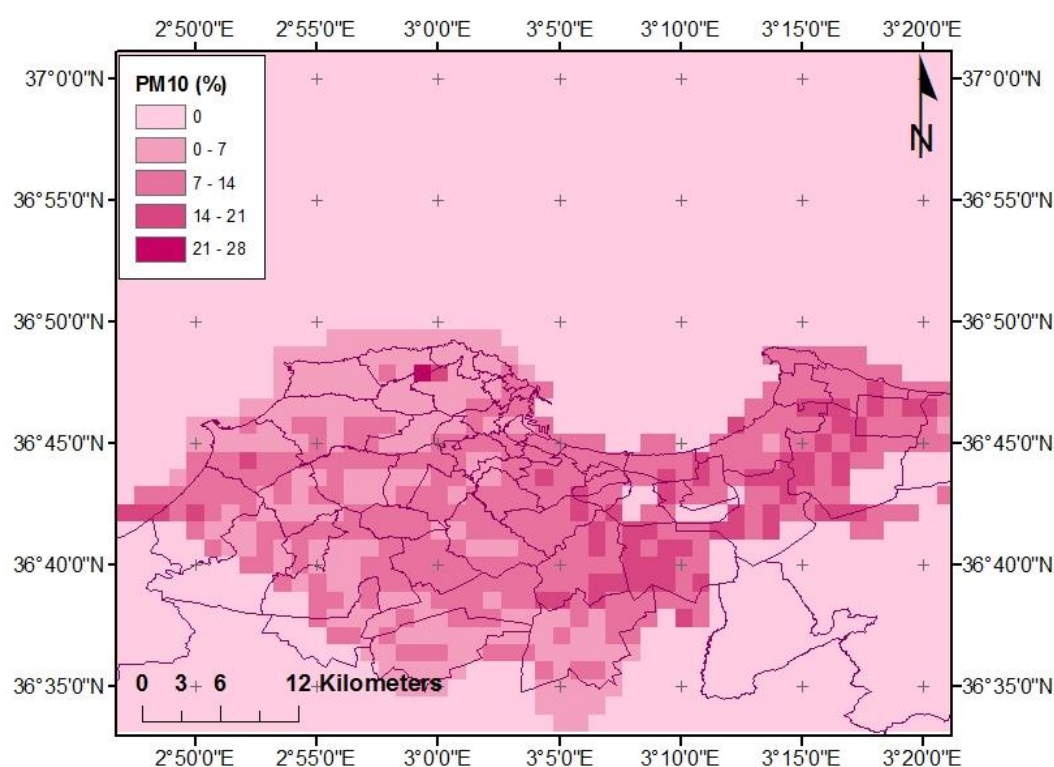


Fig. 43 Pourcentage de réduction de la mortalité par les PM-10 pour le scénario 2 (scénario gouvernemental) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées (échelle) sont UTM (degrés).

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

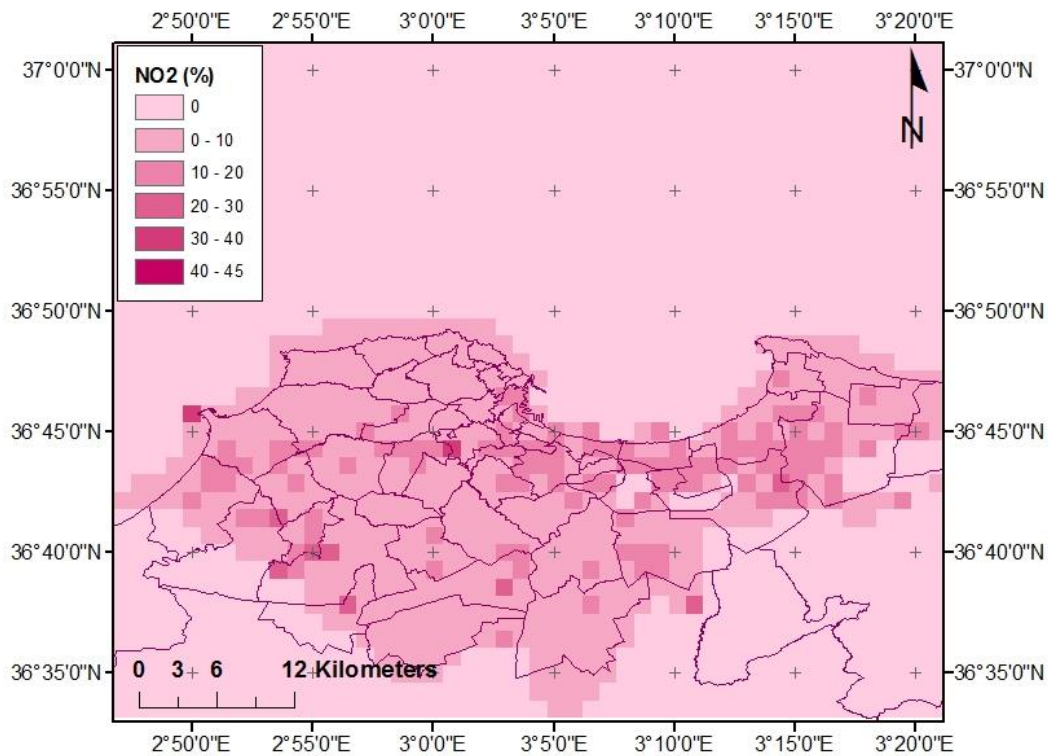


Fig. 44 Pourcentage de réduction de la mortalité par le NO₂ pour le scénario 2 (scénario gouvernemental) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées (échelle) sont UTM (degrés).

Pour quelques sites d'Alger en particulier les régions de l'est, les réductions de la mortalité sont plus élevées par les PM-10, elles peuvent atteindre 21%, ces régions étaient en fait sous l'influence industrielle, et connaissent des concentrations importantes en PM-10. En revanche, les réductions par le NO₂ peuvent atteindre 40% et sont réparties dans des régions diverses à Alger selon la distribution des concentrations qui suivent les émissions du trafic routier.

Il faut noter que quelques régions comme l'ouest d'Alger et sur l'axe de littoral, les réductions de la mortalité sont moins importantes pour les deux polluants.

Les variations géographiques des pourcentages de réduction de la mortalité par les PM-10 et le NO₂ pour le scénario 3 (scénario additionnel) en comparaison avec le scénario MSQ sont illustrées en figures 45 et 46.

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

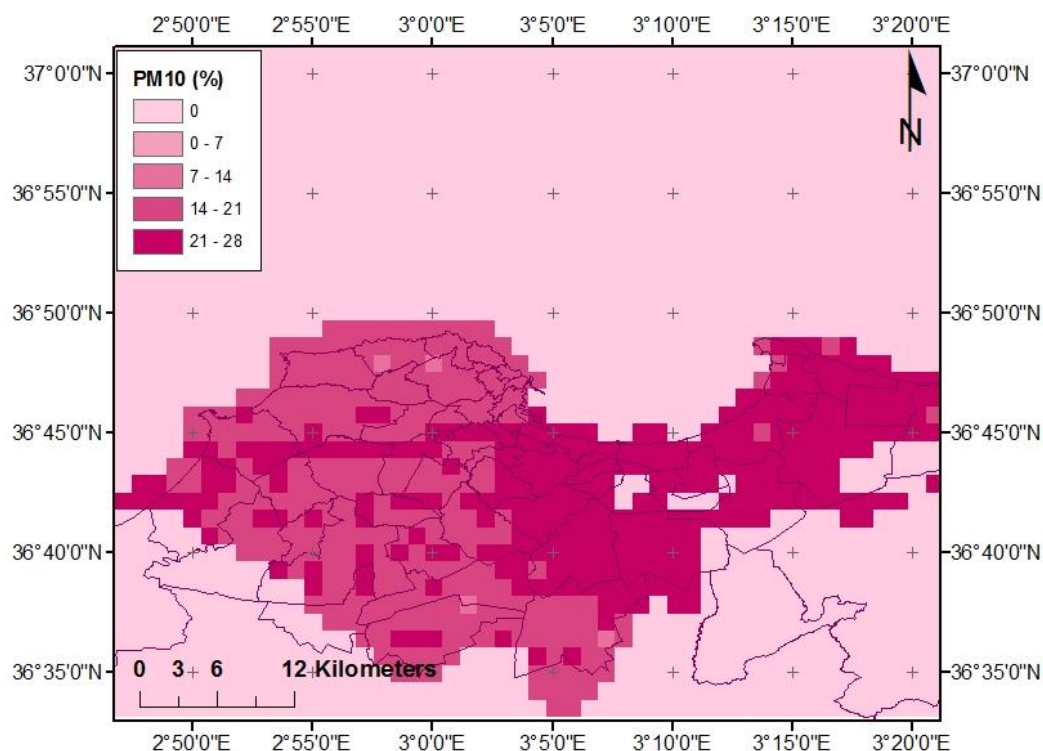


Fig. 45 Pourcentage de réduction de la mortalité par les PM-10 pour le scénario 3 (scénario additionnel) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées (échelle) sont UTM (degrés).

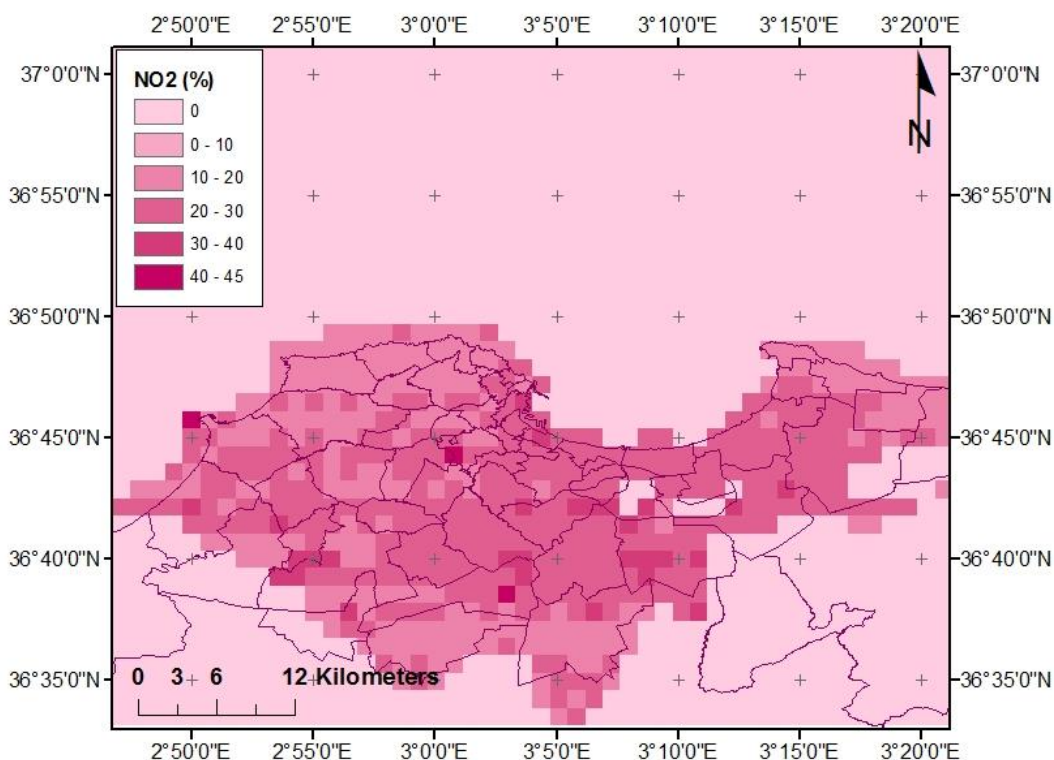


Fig. 46 Pourcentage de réduction de la mortalité par le NO₂ pour le scénario 3 (scénario additionnel) en comparaison avec le scénario MSQ. Les coordonnées (échelle) sont UTM (degrés).

CHAPITRE IV. Modélisation des scénarios prévisionnels pour la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030

En ce qui concerne les pourcentages de réduction de la mortalité attendus par le scénario 3 (scénario additionnel) en comparaison avec le scénario MSQ, les réductions de la mortalité par les deux polluants peuvent atteindre d'autres régions, avec un taux maximum de réduction de l'ordre de 28 et 45% pour les PM-10 et le NO₂, respectivement.

Cette augmentation de taux de la réduction de la mortalité, montre clairement l'efficacité des mesures de scénario 3 (scénario additionnel) par rapport au scénario 2 (scénario gouvernemental) en comparaison avec le scénario de référence MSQ.

Conclusion générale

En vingt ans, l'agglomération d'Alger a connu des évolutions majeures : augmentation de la motorisation des ménages, urbanisation en périphérie et évolution des modes de vie. Les effets conjugués de ces évolutions ont eu des impacts notables sur l'environnement et plus spécialement sur la qualité de l'air urbain.

La prévention dans le domaine de la pollution atmosphérique nécessite une connaissance parfaite des principales sources de polluants atmosphériques dans les principales zones d'étude, via l'élaboration d'inventaire d'émissions, matière nécessaire pour la modélisation.

Dans ce contexte, les travaux que nous avons réalisés portent sur la modélisation de la pollution de l'air dans la région du grand-Alger (surface 50 Km x 50 Km) à travers la simulation de la météorologie et de la pollution par les PM-10 et le NO₂ en utilisant le modèle « The Air Pollution Model » (TAPM). L'objectif étant d'identifier les zones à forte pollution qui doivent faire l'objet d'une surveillance accrue, ces deux polluants sont actuellement considérés comme étant les deux principaux indicateurs de la qualité de l'air. Ils sont émis en grandes quantités par les activités humaines et exercent des effets nocifs bien connus sur l'homme et l'environnement.

La comparaison des résultats météorologiques simulés avec ceux observés en station de mesure a permis de mettre en lumière des performances du modèle TAPM, l'IOA pour la vitesse du vent est de 0,65 et pour la température de 0,99.

Malgré le manque de données mesurées sur la qualité de l'air pour la période étudiée (année 2012), la comparaison des teneurs annuelles simulées des PM-10 et de NO₂ avec celles mesurées sur certains sites en d'autres périodes, indique que les résultats prédits sont du même ordre de grandeur avec ceux observés et que le modèle arrive à reproduire correctement les teneurs réelles et leur distribution spatiale.

En tenant compte des principales sources d'émission, nous avons pu étudier la distribution spatiale des PM-10 et de NO₂ dans la zone étudiée. Les niveaux des concentrations par les PM-10 et le NO₂ atteignent des maxima qui sont supérieurs à 120 et 90 µg/m³ respectivement. Les niveaux les plus élevés se concentrent à proximité des zones industrielles et des grands axes routiers. Il convient de noter qu'il y a dépassement des normes nationale et internationale dans certaines zones et communes où les niveaux de pollution sont élevés.

Conclusion générale

Dans le cadre de sa stratégie internationale pour réduire les émissions de gaz dans l'atmosphère, le gouvernement algérien a prévu de réduire de 16% sa consommation nationale de l'énergie dès 2020. Les mesures pour tenter d'atteindre cet objectif s'articulent autour de trois secteurs importants : il s'agit du transport, du bâtiment et de l'industrie.

Pour évaluer la qualité de l'air à Alger à l'horizon 2030, nous avons élaboré trois scénarios prévisionnels possibles (MSQ, gouvernemental et additionnel), Les résultats de la modélisation montrent que dans le cas du scénario MSQ, les deux polluants atteignent des moyennes annuelles très élevées ($PM_{10} > 129 \mu g/m^3$ et $NO_2 > 124 \mu g/m^3$) comparativement à l'année de référence 2012. L'étude de l'évolution de la pollution dans le cas des deux scénarios gouvernemental et additionnel, montre que les moyennes annuelles des deux polluants sont moins élevées (PM_{10} et $NO_2 < 110 \mu g/m^3$ pour le scénario gouvernemental et PM_{10} et $NO_2 < 95 \mu g/m^3$ pour le scénario additionnel). L'étude de la distribution spatiale montre que c'est toujours dans la région des zones industrielles et à proximité des axes routiers qu'on enregistre les plus hautes concentrations. Dans les zones suburbaines, la pollution accuse des niveaux modérés et peu inquiétants.

Dans le scénario additionnel, les mesures d'atténuation de la pollution pour le résidentiel et le trafic routier permettent des réductions allant jusqu'à 25% pour les PM_{10} et 24% pour le NO_2 . Cela correspond à des réductions des concentrations annuelles de l'ordre de 35 et 30 $\mu g/m^3$ pour les PM_{10} et le NO_2 respectivement, particulièrement dans les régions autour des zones de forte pollution.

Les gains de mortalité seraient également plus importants pour le scénario additionnel, ils sont près de 23% et 17% pour les PM_{10} et NO_2 , respectivement, par rapport au scénario du MSQ. Ainsi, ces premiers résultats de dispersion de la pollution pourraient aider à l'élaboration de plans de prévention de la pollution atmosphérique.

Nous avons pu confronter l'approche de la modélisation totale à des observations et évaluer l'intérêt, la pertinence et l'opérabilité de la modélisation pour la qualité de l'air en milieu urbain. Cette approche nous a permis (1) de maîtriser et comprendre les processus de modèle et tester ses performances à travers la validation de la météorologie, (2) d'avoir une idée sur la qualité de l'air dans un milieu urbain ainsi que les zones les plus affectées par la pollution, (3) d'évaluer les prévisions futures sur l'état de pollution par l'élaboration de divers scénarios.

Conclusion générale

Finalement, au travers de cette thèse nous avons pu mettre en place et utiliser la simulation depuis les données d'entrée de modèle (météorologie et émissions) aux simulations des résultats (concentrations et distribution). Cette approche est novatrice car elle a réuni une modélisation de l'ensemble des émissions des différents secteurs qui interviennent dans la pollution de l'air en milieu urbain. Cependant, il est important de valider les résultats de pollution par des données de mesures.

Ce travail montre qu'il est indispensable de redynamiser, relancer et élargir le réseau de surveillance d'Alger pour suivre en continu la qualité de l'air. A travers nos résultats, il est facile de choisir les sites les plus représentatifs d'installation des stations de mesure de ce réseau. Il sera alors possible de comparer et évaluer de manière précise (dans une zone géographique représentative) les résultats de modèle utilisé. Il serait aussi intéressant d'appliquer le modèle à l'échelle locale (industrie, routes, rues etc...) pour étudier l'impact de chaque source d'émission séparément, et pouvoir prendre les mesures nécessaires d'atténuation des émissions. Naturellement, une bonne modélisation nécessite des données fiables et représentatives. Dans notre cas, il est certain que nous n'avons pas identifié toutes les sources émettrices, notamment des petites sources qui ne sont enregistrées nulle part et qui ne sont connues par aucune statistique. Dans le cas de certaines sources identifiées les exploitants n'ont aucune idée sur leurs émissions. A tout cela, il faut ajouter la difficulté d'accès à l'information et sa rétention en Algérie. L'absence de planification à moyen et long terme dans tous les secteurs fait qu'il est difficile d'élaborer des scénarios futurs aussi fiables que possible.

En raison du prix bas de l'énergie et d'un faible niveau de conscience, les moyens de baisser de manière significative la consommation énergétique ne sont pas encore exploités. Il faut donc sensibiliser les différents acteurs pour espérer obtenir un comportement intelligent dans l'utilisation des énergies pour limiter les émissions des polluants dans l'atmosphère.

Entre temps, il faut aller vers la révolution urbaine, et suivre les nouvelles technologies mises en œuvre dans ce domaine et créer des maisons autonomes ou des maisons vertes. Ainsi l'industrie, doit avoir sa part dans ce changement, et cela en changeant les méthodes d'usage des énergies pour la production et converger vers les sources d'énergies renouvelables. Le troisième secteur stratégique et celui des transports, le changement ne peut avoir lieu qu'après la mise en œuvre d'une politique nationale des transports.

Conclusion générale

Rationaliser et maîtriser l'utilisation de l'énergie dans les différents secteurs pour réaliser une réduction de la consommation des combustibles fossiles et limiter les émissions des polluants atmosphériques, une mesure importante que doit prendre l'Algérie pour un développement durable.

Bibliographie

- Abderrahim, H, Chellali, M.R. Hamou, A. (2016). Forecasting PM10 in Algiers: efficacy of multilayer perceptron networks. *Environ Sci Pollut Res* 23:1634–1641.
- ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie) (2017). *Consommations conventionnelles de carburant et émissions de CO₂*, édition ADEME, 2017.
- AEE (Agence Européenne pour l'Environnement) (2011). *Air quality in Europe – 2011 report*. EEA Technical Report No 12/2011.
- AEE (Agence Européenne pour l'Environnement) (2016). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016*.
- AEE (Agence Européenne pour l'Environnement) (2001). *Copenhagen. Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook, third edition*.
- AFRA, H. (2010). *Reglementation thermique et performance energetique du batiment* Ministere de l'Habitat et de l'Urbanisme-CNERIB.
- ARH (Agence de Régulation des Hydrocarbures) (2017). <http://www.arh.gov.dz>.
- Amouz, L. Boutchebak, S. Mohellebi, F. Chitour, C.E. (2018). *La révolution de l'électricité dans le tertiaire. 22ème journée de l'énergie et le Développement Humain Durable, 14 Avril 2018, Département de Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger*.
- AND (Agence Nationale des Déchets), (2017). *Rapport de gestion des DMA dans la wilaya d'Alger, Mai 2017*.
- Aoudia, M.T. (2001). *Les rejets atmosphériques dans le secteur de la production du ciment et leurs impacts sur l'environnement : moyens d'évaluation et de contrôle. Séminaire sur l'environnement, Alger, Algérie*.
- APPL (2003). *Rapport d'étape relative 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).
- APRUE (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie) (2012). *Consommation Energétique Finale de l' Algérie*. Agence Natl pour la Promot la Ration l'Utilisation l'Energie Edition 20:11–12.
- APRUE (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie) (2017). *Programme d'efficacité énergétique*. Alger. [http:// aprue.org.dz](http://aprue.org.dz). (Accédé Mai 2017).
- Bahloul, C. El Merouani, F. O. Faradji, A. Chitour, C.E. (2018). *L'état des lieux de l'énergie en Algérie. 22ème journée de l'énergie et le Développement Humain Durable, 14 Avril 2018, Département de Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger*.
- Belamri, M. Bounemia, L. Azbouche, A. Boukeffoussa, K. Lakhdar Chaouch, C. (2017). *Assessment of air pollution by heavy metals in the urban center of Algiers*. *Aust J Basic Appl Sci* 35–44.

- Belhocine, M. Ait khaled, N. (1991). Prevalence of asthma in a region of Algeria. *Bull Int Union Tuber Lung Dis* 1991; 66:91-93.
- Benoudjafer, I. Mokhtari, F. G. A. (2012). Etude comparative relative à l'efficacité énergétique de deux appartements situés à Béchar, Algérie, *15*, 1–12.
- Benrabah, A. (2013). Contribution à l'étude de la pollution de l'air par le NO₂ dans le grand Alger. Mémoire de fin d'études. Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.
- Berkouki, N. (2008). Caractérisation de la pollution de l'air par les particules fines et des métaux lourds associés, en milieu urbain à Alger centre. Mémoire de magistère. Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.
- Bernhardt-Römermann, M. Kirchner, M. Kudernatsch, T. Jakobi, G. Fischer, A. (2006). Changed vegetation composition in coniferous forests near to motorways in Southern Germany: The effects of traffic-born pollution. *Environ Pollut* 143:572–581.
- Börjeson, L. Höjer, M. Dreborg, K. H. Ekvall, T. and Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723–739.
- Boudehane, A. Lounas, A. Moussaoui, Y. Balducci, C. Cecinato, A. (2016). Levels of organic compounds in interiors (school, home, university and hospital) of Ouargla city, Algeria. *Atmos Environ* 144:266–273.
- Boughedaoui, M. Kerbachi, R. Joumard, R. (2008). On-board emission measurement of high-loaded light-duty vehicles in Algeria. *J Air Waste Manag Assoc* 58:45–54.
- Briant, R. (2012). Modélisation multi échelles de l'impact du trafic routier sur la qualité de l'air. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.
- Cécé, R. (2014). Simulations numériques méso- et micro-échelles des circulations locales générées par des îles tropicales: cas de l'archipel de la Guadeloupe avec une application à la dispersion de polluants (WRF-LES-FLEXPART), Thèse de doctorat, Université des Antilles.
- Cesaroni, G. Forastiere, F. Stafoggia, M. Andersen, Z. J. Badaloni, C. Beelen, R. Peters, A. (2014). Long term exposure to ambient air pollution and incidence of acute coronary events: prospective cohort study and meta-analysis in 11 European cohorts from the ESCAPE project. *BMJ* 348:f7412.
- Chang, J.C. Hanna, S. R. (2004). Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 87. 167-196.
- Chikhi, S. Boughedaoui, M. Kerbachi, R. Joumard, R. (2014). On-board measurement of emissions from liquefied petroleum gas, gasoline and diesel powered passenger cars in Algeria. *J Environ Sci (China)* 26:1651–1659.
- Derradji, L. Imessad, K. Amara, M. Errebai, F. B. (2017). A study on residential energy requirement and the effect of the glazing on the optimum insulation thickness. *Applied Thermal Engineering*, 112, 975–985. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.116>
- Djemaci, B. Ahmez Zaid-Chertouk, M. (2011). La gestion intégrée des déchets solides en Algérie Contraintes et limites de sa mises en oeuvre Working paper CIRIEC N°2011/04.
- Duque, L. Relvas, H. Silveira, C. Ferreira, J. Moneiro, A. Gama, C. Rafael, S. Freitas, S. Borrego, C.

- Miranda, A.I. (2016). Evaluating strategies to reduce urban air pollution. *Atmos Environ* 127:196–204.
- EC (European Commission), (2005). Externe Externalities of Energy-Methodology 2005 Update, Office for Official Publications of the European Communities, Peter Bickel and Rainer Friedrich, EUR 21951 EN.
- Gómez-Mendikute, A. Etxeberria, A. Olabarrieta, I. Cajaraville, M. P. (2002). Oxygen radicals production and actin filament disruption in bivalve haemocytes treated with benzo(a)pyrene. *Mar Environ Res* 54:431–436.
- Haddad, B. Liazid, A. Ferreira, P. (2017). A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system. *Renew Energy* 107:462–472.
- Hamra, G. B. Laden, F. Cohen, A. J. Raaschou-Nielsen, O. Brauer, M. and Loomis, D. (2015). Lung Cancer and exposure to Nitrogen Dioxide and Traffic: A Systematic Review and Meta-Analysis *Environmental health perspectives*, 123, 1107-1112.
- MFG (Mediterranean Float Glass) (2017). <http://www.cevital.com/mfg/>.(Accédé Novembre 2017).
- Hurley, P. Manins, P. Lee, S. Boyle, R. Leung Ng, Y. Dewundege, P. (2003). Year-long, high-resolution, urban airshed modelling: Verification of TAPM predictions of smog and particles in Melbourne, Australia. *Atmos Environ* 37:1899–1910.
- Hurley, P. J. (2008). TAPM V4. Part 1: Technical Description.
- Hurley, P. J. Blockley, A. Rayner, K. (2001). Verification of a prognostic meteorological and air pollution model for year-long predictions in the Kwinana industrial region of Western Australia. *Atmos Environ* 35:1871–1880.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2003). Greenhouse gas inventory workbook, Revision of the Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2.
- JORADP (Journal Officiel de la République Algérienne) (1993). Journal officiel. Décret exécutif n°93-165 du 10 juillet 1993 réglementant les émissions atmosphériques de fumées, gaz, poussières, odeurs et particules solides, des installations fixes J Off 1993 p: 13.
- JORADP (Journal Officiel de la République Algérienne) (2003). Journal officiel. Loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable J Off 2003 p: 06–19.
- JORADP (Journal Officiel de la République Algérienne) (2006). Journal officiel. Décret exécutif n° 06-02 du 07 janvier 2006 définissant les Val limites, les seuils d'alerte les Object Qual l'air en cas Pollut atmosphériques J Off 2006 13–18.
- Kakachi, Z. Rezzik El Merhoun, M. Yahiat, F. Chitour, C. E. (2018). La révolution dans le transport en Algérie. 22ème journée de l'énergie et le Développement Humain Durable, 14 Avril 2018, Département de Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- Kerbachi, R. Boughedaoui, M. Bounoua, L. Keddou, M. (2006). Ambient air pollution by aromatic hydrocarbons in Algiers. *Atmos Environ* 40:3995–4003.

- Kerbachi, R. Boughedaoui, M. Koutai, N. Lakki, T. (1998). La pollution par les oxydes d'azote et l'ozone a Alger. *Pollut Atmos* 89–101.
- Kerbachi, R. Oucher, N. Bitouche, A. Berkouki, N. Demri, B. Boughedaoui, M. and Joumard, R. (2009). Pollution par les particules fines dans l'agglomération d'Alger. Colloque international Environnement et transports dans des contextes différents, Ghardaïa, Algérie, 16-18 fév. 2009. Actes, ENP ed., Alger, p. 36-48.
- Kerchich, Y. and Kerbachi, R. (2012). Measurement of BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene) levels at urban and semirural areas of Algiers City using passive air samplers. *J Air Waste Manag Assoc* 62:1370–1379.
- Khedidji, S. Ladj, R. Yassaa, N. (2013). A wintertime study of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in indoor and outdoor air in a big student residence in Algiers, Algeria. *Environ Sci Pollut Res* 20:4906–4919.
- Korek, M.J. Bellander, T.D. Lind, T. Bottai, M. Eneroth, K.M. Caracciolo, B. de Faire, U.H. Fratiglioni, L. Hilding, A. Leander, K. Magnusson, P.K.E. Pedersen, N.L. Östenson, C.- G. Pershagen, G. Penell, J.C. (2015). Traffic-related air pollution exposure and incidence of stroke in four cohorts from Stockholm. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 25: 517–523.
- Ladj, R. Yassaa, N. Balducci, C. et Cecinato, A. Meklati, B.Y. (2009a). Distribution of the solvent-extractable organic compounds in fine (PM1) and coarse (PM1-10) particles in urban, industrial and forest atmospheres of Northern Algeria. *Sci Total Environ* 408:415–424.
- Ladj, R. Yassaa, N. Balducci, C. Cecinato, A. Mekalti, B.Y. (2009b). Annual variation of particulate organic compounds in PM10 in the urban atmosphere of Algiers. *Atmos Res* 92:258–269.
- Ladj, R. Yassaa, N. Balducci, C. Cecinato, A. (2014). Particle size distribution of n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHS) in urban and industrial aerosol of Algiers, Algeria. *Environ Sci Pollut Res* 21:1819–1832.
- Laïd, Y. Atek, M. Oudjehane, R. Filleul, L. Baough, L. Zidouni, N. Boughedaoui, M. Tessier, J.F. (2006). Impact sanitaire de la pollution de l'air par les PM 10 dans une ville du sud : le cas d'Alger. *10 (12): 1406-1411.*
- Liu, L. Liu, A. Li, Y. Zhang, G. Guan, Y. (2016). Polycyclic aromatic hydrocarbons associated with road deposited solid and their ecological risk: Implications for road stormwater reuse. *Sci Total Environ* 563–564:190–198.
- Louni, M. (2014). Contribution à l'étude de la pollution de l'air par le NO₂ dans le grand Alger. Mémoire de fin d'études. Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.
- LPEA (Laboratoire Energie et Pollution Atmosphérique) (2008). U Blida, Algérie.
- Luhar, A. K. Hurley, P. J. (2004). Application of a prognostic model TAPM to sea-breeze flows, surface concentrations, and fumigating plumes. *Environ Model Softw* 19:591–601.
- Malardel, S. (2009). Fondamentaux de Météorologie. Cépaduès _Editions.
- Maltby, L. Forrow, D.M. Boxall, A. B. A. Calow, P. Betton, C. I. (1995). The effects of motorway runoff on freshwater ecosystems: 1. Field study. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 14.

1079-1092.

MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement) (2000). Rapport National sur l'Etat de l'Environnement, RNE, Alger, Algérie.

MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement) (2012). Instrument européenne de voisinage et de partenariat Vers un système de partage d'informations sur l'environnement « SEIS »: Rapport pays Algérie.

MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement) (2001). Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques : Communication nationale initiale

MEM (Ministère de l'Energie et des Mines) (2013). Bilan énergétique national de l'année 2012, Algerie. Edition 2013.

ME (Ministère de l'Energie) (2017). Energies nouvelles, renouvelables et Maitrise de l'energie .<http://www.me.dz>. (Accédé juin 2017).

Meurisse, B. (2013). Quelles valeurs monétaires pour les impacts sanitaires de la pollution atmosphérique ? Enjeux, limites et perspectives. Collection « Études et documents » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD www.developpement-durable.gouv.fr).

Michelot, N. (2014). L'influence des topoclimats sur la pollution de l'air aux particules dans le Sud-Ouest des Alpes- Maritimes. Thèse de Doctorat, Université de Nice Sophia-Antipolis.

MIM (Ministère de l'Industrie et des Mines) (2017). Intermediation and Land Regulation National Agency, Algeria.

Miranda, A. I. Ferreira, J. Silveira, C. Relvas, H. Duque, L. Roebeling, P. Lopes, M. Costa, S. Monteiro, A. Gama, C. Sa, E. Borrego, C. Teixeira, J.P. (2016). A cost-efficiency and health benefit approach to improve urban air quality. *Sci Total Environ* 569–570:342–351.

Moumeni, A. (1995). Prévalence de l'asthme bronchique et de la rhinite allergique dans deux régions côtières et rurales de l'Est Algérien. *Rev Hop Mil* 1995 ; 72 : 38-42.

MTPT (Ministère des Travaux Publics et du Transport) (2017). Algeria.

Ntziachristos, L. Zissis, S. (2000). COPERT III: Computer programme to calculate emissions from road transport Methodology and emission factors (Version 2.1), Technical report No 49, European Environment Agency.

OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2016). Ambient Air Pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. *World Heal Organ* 1–131.

OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2006). WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005: summary of risk assessment. Geneva *World Heal Organ* 1–22.

OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2013). Recommendations for Concentration–Response Functions for Cost–Benefit Analysis of Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide, Health

- Risks of Air Pollution in Europe – HRAPIE Project, WHO Regional Office for Europe. Copenhagen, Denmark 54 pp.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2009). Global Infobase: Country Profile of Environmental Burden of Disease. Public Health and the Environment, Geneva.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2014). La qualité de l'air se détériore dans de nombreuses villes du monde, communiqué de presse, 7 mai 2014, Genève.
- ONM (Office National de la Météorologie) (2017). Alger. <http://www.meteo.dz>.
- ONS (Office National des Statistiques) (2017). Alger. <http://www.ons.dz>. (Accédé Mai 2017).
- ONS (Office National des Statistiques) (2016). Alger. <http://www.ons.dz>. (Accédé le 1 Juin 2017).
- ONS (Office National des Statistiques) (2012). Alger. <http://www.ons.dz>. (Accédé le 15 Mars 2017).
- Oreskes, N. Shrader-Frechette, K. Belitz, K. (1994). Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science* (80-) 263:641–646.
- Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56:529, 530.
- Oucher, N. Kerbach, R. Ghezloun, A. Merabet, H. (2015). Magnitude of Air Pollution by Heavy Metals Associated with Aerosols Particles in Algiers. *Energy Procedia* 74:51–58.
- Rahal, F. (2015). Modélisation et simulation de la pollution atmosphériques. Le cas de la région d'Alger. Thèse de doctorat n sciences. Université d'Oran.
- Rahal, F. Benharrats, N. Blond, N. Clappier, A. and Ponche, J.L. (2014). Modelling of air pollution in the area of Algiers City, Algeria. *Int J Environ Pollut* 54:32–58.
- Safar Zitoun, M. Tabti-Talamali, A. (2009). La Mobilité Urbaine Dans L'Agglomération d'Alger : Evolutions Et Perspectives.
- Sahnoune, F. Belhamel, M. Zelmat, M. (2016). Algerian energy policy and potential to reducing greenhouse gas emissions. *Energy Sources, Part B Econ Planning, Policy* 11:1118–1127.
- Säumel, I. Kotsyuk, I. Hölscher, M. Lenkerei, C. Weber, F. Kowarik, I. (2012). How healthy is urban horticulture in high traffic areas? Trace metal concentrations in vegetable crops from plantings within inner city neighbourhoods in Berlin, Germany. *Environ Pollut* 165:124–132.
- Seraghi, Ali– Khodja, H. Derradji, A. F. (2009). Air quality and deposition of trace elements in Didouche Mourad. Colloque international Environnement et transports dans des contextes différents, Ghardaïa, Algérie, 16-18 fév. 2009. Actes, ENP ed., Alger, p. 192-200.
- Stull, R. B. (2000). *Meteorology for Scientists and Engineers*. Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers.
- SWEEP-Net.GIZ (2014). Rapport sur la gestion des déchets solides en Algérie.
- Talbi, A. Kerchich, Y. Kerbach, R. Boughedaoui, M. (2017). Assessment of annual air pollution levels with PM1, PM2.5, PM10 and associated heavy metals in Algiers, Algeria. *Environ Pollut*.

- Terfaya, M. Djebar, M. R. Berrabah. (2016). Influence of climatic parameters on the distribution of air pollutants and public health in Annaba (East of Algeria). *Laboratory of Cellular. Int J Med Res Heal Sci* 5:118–124.
- Terniche, M. (2016). Evaluation de l'impact sanitaire des facteurs de risque sur la pathologie. Thèse de doctorat en sciences médicales. Université Benyoucef Benkhedda d'Alger.
- Terrenoire, H. (2009). Application des systèmes MM5-CHIMERE et MM5-CHIMERE et MM5-FLEXPART à la modélisation de l'ozone et des PM10 sur la région Nord-Pas-de-Calais. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I.
- Terrouche, A. Ali-Khodja, H. Kemmouche, A. (2016). Identification of sources of atmospheric particulate matter and trace metals in Constantine, Algeria. *Air Qual Atmos Heal* 9:69–82.
- Thouren L (2017). Modélisation dynamique multi-échelle de la pollution atmosphérique en milieu urbain. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
- Toro, M.V. Cremades, L.V. and Calbo, J. (2006). Relationship between VOC and NO_x emissions and chemical production of tropospheric ozone in the Aburra Valley (Colombia). *Chemosphere*, 65, pp 881-888.
- Vestreng, V. (2003). Review and revision. Emission data reported to CLRTAP. MSC-W Status Report.
- Wiegand, A. N. Menzel, S. King, R. Tindale, N. (2011). Modelling the aeolian transport of ammonia emitted from poultry farms and its deposition to a coastal waterbody. *Atmos Environ* 45:5732–5741.
- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Phys. Geogr.*, 2(2) :184–194.
- Willmott, C. J. and Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Cli- mate Res.*, 30: 79–82.
- Wing, S. E. Bandoli, G. Telesca, D. Su, J.G. and Ritz, B. (2018). Chronic exposure to inhaled, traffic-related nitrogen dioxide and a blunted cortisol response in adolescents, *Environmental research*, 163, 201-207.
- Yu, S. Eder, B. Dennis, R. Chu, S-H. Schwartz, S. E. (2006). New unbiased symmetric metrics for evaluation of air quality models. *Atmospheric Science Letters*. 7. 26-34.
- Yu, Y. Sokhi, R. S. Kitwiroon, N. Middleton, D.R. Fisher, B. (2008). Performance characteristics of MM5-SMOKE-CMAQ for a summer photochemical episode in southeast England, United Kingdom. *Atmos Environ* 42:4870–4883.
- Zanobetti, A. Bind, M.-A.C. Schwartz, J. (2008). Particulate air pollution and survival in a COPD cohort. *Environ. Health* 7:48.
- Zhong, S. Fast, J. (2003). An Evaluation of the MM5, RAMS, and Meso-Eta Models at Subkilometer Resolution Using VTMX Field Campaign Data in the Salt Lake Valley. *Mon Weather Rev* 131:1301–1322.

Annexe

ANNEXE 1 : Facteurs d'émission.

Tableau 1. Classification de carburant (EEA 2016).

Tier 1 Fuel type	Associated fuel types
Hard coal	Coking coal, other bituminous coal, sub-bituminous coal, coke, manufactured 'patent' fuel
Brown coal	Lignite, oil shale, manufactured 'patent' fuel, peat
Gaseous fuels	Natural gas, natural gas liquids, liquefied petroleum gas, refinery gas (EFs for refinery gas are available in section 4.2), gas works gas, coke oven gas, blast furnace gas
Heavy fuel oil	Residual fuel oil, refinery feedstock, petroleum coke, orimulsion, bitumen
Light oil	Gas oil, kerosene, naphtha, shale oil
Biomass	Wood, charcoal, vegetable (agricultural) waste

Tableau 2. Technologie de combustion et le carburant correspondant (EEA 2016).

Combustion technology	Relevant fuels
Dry bottom boiler	Coking coal, steam coal, sub-bituminous coal, brown coal, lignite, wood, peat, coke, oven coke, residual oil, natural gas
Wet bottom boiler	Coking coal, steam coal, sub-bituminous coal, brown coal, lignite,
Fluid bed boiler	Hard coal, brown coal
Gas turbine	Natural gas, gas oil, refinery gas, blast furnace gas
Stationary engine	Natural gas, gas oil

Tableau 3. Facteurs d'émission des centrales électriques (EEA 2016).

Tier 1 default emission factors					
	Code	Name			
NFR Source Category	1.A.1.a	Public electricity and heat production			
Fuel	Gaseous fuels				
Not applicable					
Not estimated	NH3, PCBs, HCB				
Pollutant	Value	Unit	95% confidence interval		Reference
			Lower	Upper	
NOx	89	g/GJ	15	185	US EPA (1998), chapter 1.4
CO	39	g/GJ	20	60	US EPA (1998), chapter 1.4
NM/OC	2.6	g/GJ	0.65	10.4	US EPA (1998), chapter 1.4
SOx	0.281	g/GJ	0.169	0.393	US EPA (1998), chapter 1.4
TSP	0.89	g/GJ	0.445	1.34	US EPA (1998), chapter 1.4
PM ₁₀	0.89	g/GJ	0.445	1.34	US EPA (1998), chapter 1.4
PM _{2.5}	0.89	g/GJ	0.445	1.34	US EPA (1998), chapter 1.4
BC	2.5	% of PM _{2.5}	1	6.3	See Note
Pb	0.0015	mg/GJ	0.0005	0.0045	Nielsen et al., 2012
Cd	0.00025	mg/GJ	0.00008	0.00075	Nielsen et al., 2012
Hg	0.1	mg/GJ	0.01	1	Nielsen et al., 2010
As	0.12	mg/GJ	0.04	0.36	Nielsen et al., 2012
Cr	0.00076	mg/GJ	0.00025	0.00228	Nielsen et al., 2012
Cu	0.000076	mg/GJ	0.000025	0.000228	Nielsen et al., 2012
Ni	0.00051	mg/GJ	0.00017	0.00153	Nielsen et al., 2012
Se	0.0112	mg/GJ	0.00375	0.0337	US EPA (1998), chapter 1.4
Zn	0.0015	mg/GJ	0.0005	0.0045	Nielsen et al., 2012
PCDD/F	0.5	ng I-TEQ/GJ	0.25	0.75	UNEP (2005)
Benzo(a)pyrene	0.56	µg/GJ	0.19	0.56	US EPA (1998), chapter 1.4 ("Less than" value based on method detection limits)
Benzo(b)fluoranthene	0.84	µg/GJ	0.28	0.84	US EPA (1998), chapter 1.4 ("Less than" value based on method detection limits)
Benzo(k)fluoranthene	0.84	µg/GJ	0.28	0.84	US EPA (1998), chapter 1.4 ("Less than" value based on method detection limits)

Tableau 4. Facteurs d'émission des centrales électriques (EEA 2016).

Tier 2 emission factors					
	Code	Name			
NFR Source Category	1.A.1.a	Public electricity and heat production			
Fuel	Gaseous Fuels				
SNAP (if applicable)	010104	Public power - Gas turbines			
Technologies/Practices	Gas Turbines				
Region or regional conditions	NA				
Abatement technologies	NA				
Not applicable					
Not estimated	NH ₃ , PCB, PCDD/F, HCB				
Pollutant	Value	Unit	95% confidence interval		Reference
			Lower	Upper	
NO _x	48	g/GJ	28	68	Nielsen et al., 2010
CO	4.8	g/GJ	1	70	Nielsen et al., 2010
NM VOC	1.6	g/GJ	0.5	7.6	Nielsen et al., 2010
SO _x	0.281	g/GJ	0.169	0.393	See note
TSP	0.2	g/GJ	0.05	0.8	BUWAL, 2001
PM ₁₀	0.2	g/GJ	0.05	0.8	BUWAL, 2001
PM _{2.5}	0.2	g/GJ	0.05	0.8	Assumed equal to PM _{2.5}
BC	2.5	% of PM _{2.5}	1	6.3	See Note
Pb	0.0015	mg/GJ	0.0005	0.0045	Nielsen et al., 2012
Cd	0.00025	mg/GJ	0.00008	0.00075	Nielsen et al., 2012
Hg	0.1	mg/GJ	0.01	1	Nielsen et al., 2010
As	0.12	mg/GJ	0.04	0.38	Nielsen et al., 2012
Cr	0.00078	mg/GJ	0.00025	0.00228	Nielsen et al., 2012
Cu	0.000078	mg/GJ	0.000025	0.000228	Nielsen et al., 2012
Ni	0.00051	mg/GJ	0.00017	0.00153	Nielsen et al., 2012
Se	0.0112	mg/GJ	0.00375	0.0337	US EPA (1998), chapter 1.4
Zn	0.0015	mg/GJ	0.0005	0.0045	Nielsen et al., 2012
Benzo(a)pyrene	0.58	µg/GJ	0.19	0.58	US EPA (1998), chapter 1.4 ("Less than" value based on method detection limits)
Benzo(b)fluoranthene	1.58	µg/GJ	0.5	4.7	API, 1998
Benzo(k)fluoranthene	1.11	µg/GJ	0.4	3.3	API, 1998
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	8.38	µg/GJ	2.8	25.1	API, 1998

Tableau 5. Facteurs d'émission pour le raffinage du pétrole (EEA 2016).

Tier 2 emission factors					
	Code	Name			
NFR Source Category	1.A.1.b	Petroleum refining			
Fuel	Natural Gas				
SNAP (if applicable)	010305	Petroleum refining - Stationary engines			
Technologies/Practices	4-stroke lean burn gas engines				
Region or regional conditions	NA				
Abatement technologies	NA				
Not applicable					
Not estimated	NH3, PCDD/F, PCBs, HCB				
Pollutant	Value	Unit	95% confidence interval		Reference
			Lower	Upper	
NOx	405	g/GJ	200	810	US EPA (2000), chapter 3.2;
CO	266	g/GJ	130	530	US EPA (2000), chapter 3.2;
NMVOC	56	g/GJ	30	110	US EPA (2000), chapter 3.2;
SOx	0.281	g/GJ	0.169	0.393	US EPA (2000), chapter 3.2;
TSP	0.037	g/GJ	0.003	0.37	US EPA (2000), chapter 3.2;
PM ₁₀	0.037	g/GJ	0.003	0.37	US EPA (2000), chapter 3.2;
PM _{2.5}	0.037	g/GJ	0.003	0.37	US EPA (2000), chapter 3.2;
BC	2.5	% of PM _{2.5}	1	6.3	See Note
Pb	0.04	mg/GJ	0.013	0.12	Nielsen et al., 2010
Cd	0.003	mg/GJ	0.001	0.009	Nielsen et al., 2010
Hg	0.1	mg/GJ	0.03	0.3	Nielsen et al., 2010
As	0.05	mg/GJ	0.017	0.15	Nielsen et al., 2010
Cr	0.05	mg/GJ	0.017	0.15	Nielsen et al., 2010
Cu	0.01	mg/GJ	0.003	0.03	Nielsen et al., 2010
Ni	0.05	mg/GJ	0.017	0.15	Nielsen et al., 2010
Se	0.2	mg/GJ	0.07	0.6	Nielsen et al., 2010
Zn	2.91	mg/GJ	0.97	8.73	Nielsen et al., 2010
Benzo(a)pyrene	16.2	µg/GJ	5.4	48.6	API (1998)
Benzo(b)fluoranthene	149	µg/GJ	50	447	API (1998)
Benzo(k)fluoranthene	241	µg/GJ	80	723	API (1998)
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	54.5	µg/GJ	17.5	158	API (1998)

Tableau 6. Facteurs d'émission pour la production de verre plat (EEA 2016)

Tier 2 default emission factors					
	Code	Name			
NFR source category	2.A.3	Glass production			
Fuel	NA				
SNAP (if applicable)	030314 Flat glass				
Technologies/Practices	Flat glass production				
Region or regional conditions					
Abatement technologies	Abated furnaces (primary/secondary methods)				
Not applicable	HCH, PCBs				
Not estimated	NO _x , NMVOC, SO _x , NH ₃ , CO, PCDD/F, Benzo(a)pyrene, Benzo(a)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene, HCB				
Pollutant	Value	Unit	95 % confidence interval		Reference
			Lower	Upper	
TSP	130	g/Mg glass	20	800	European Commission (2008)
PM ₁₀	120	g/Mg glass	18	720	Visschedijk et al (2004) applied on TSP
PM _{2.5}	100	g/Mg glass	16	640	Visschedijk et al (2004) applied on TSP
BC	0.062	% of PM _{2.5}	0.031	0.12	US EPA (2011, file no.: 91143)
Pb	0.4	g/Mg glass	0.23	0.68	Rivet (2008)
Cd	0.068	g/Mg glass	0.01	0.25	Rivet (2008)
Hg	0.003	g/Mg glass	0.001	0.039	Rivet (2008)
As	0.08	g/Mg glass	0.01	0.18	Rivet (2008)
Cr	0.08	g/Mg glass	0.01	0.13	Rivet (2008)
Cu	0.007	g/Mg glass	0.001	0.011	Rivet (2008)
Ni	0.74	g/Mg glass	0.54	0.97	Rivet (2008)
Se	0.15	g/Mg glass	0.02	0.4	Rivet (2008)
Zn	0.37	g/Mg glass	0.13	0.56	Rivet (2008)

Tableau 7. Facteurs d'émission pour la combustion des déchets mise en décharge (EEA 2016).

Tier 1 default emission factors					
	Code	Name			
NFR Source Category	5.C.2	Open burning of waste			
Fuel	NA				
Not applicable	PCBs				
Not estimated	NH ₃ , Hg, Ni, Indeno(1,2,3-cd)pyrene, HCB				
Pollutant	Value	Unit	95% confidence interval		Reference
			Lower	Upper	
CO	55.83	kg/Mg waste	18.61	167.50	Jenkins et al (1996a)
NO _x	3.18	kg/Mg waste	1.06	9.55	Jenkins et al (1996a)
SO ₂	0.11	kg/Mg waste	0.04	0.32	Jenkins et al (1996a)
NMVOC	1.23	kg/Mg waste	0.41	3.70	Jenkins et al (1996a)
TSP	4.64	kg/Mg waste	1.55	13.93	Jenkins et al (1996a)
PM ₁₀	4.51	kg/Mg waste	1.50	13.53	Jenkins et al (1996a)
PM _{2.5}	4.19	kg/Mg waste	1.40	12.56	Jenkins et al (1996a)
BC ¹	42.0	% of PM _{2.5}	20	70	Turn et al. (1997)
Cr	0.01	g/Mg waste	0.004	0.033	Turn et al. (1997)
Cu	0.20	g/Mg waste	0.07	0.59	Turn et al. (1997)
Zn	17.53	g/Mg waste	5.84	52.58	Turn et al. (1997)
As	0.41	g/Mg waste	0.14	1.24	Turn et al. (1997)
Se	0.07	g/Mg waste	0.02	0.20	Turn et al. (1997)

Tableau 8. Facteurs d'émission pour le traitement biologique des déchets mise en décharge (EEA 2016).

Tier 1 default emission factors					
	Code	Name			
NFR Source Category	5.A	Biological treatment of waste - Solid waste disposal on land			
Fuel	NA				
Not applicable	NO _x , SO ₂ , Pb, Cd, As, Cr, Cu, Ni, Se, Zn, PCB, PCDD/F, Benzo(a)pyrene, Benzo(b)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene, HCB, BC, HCH				
Not estimated	NH ₃ , Hg, CO				
Pollutant	Value	Unit	95% confidence interval		Reference
			Lower	Upper	
NMVOG	1.56	kg/Mg	0.5	3.0	UK Inventory (2004) [*]
TSP	0.463	g/Mg	0.006	2.21	US EPA (2006)
PM ₁₀	0.219	g/Mg	0.003	1.05	US EPA (2006)
PM _{2.5}	0.033	g/Mg	0.0004	0.16	US EPA (2006)

Tableau 9. Facteurs d'émission pour les cimenteries (Aoudia 2001).

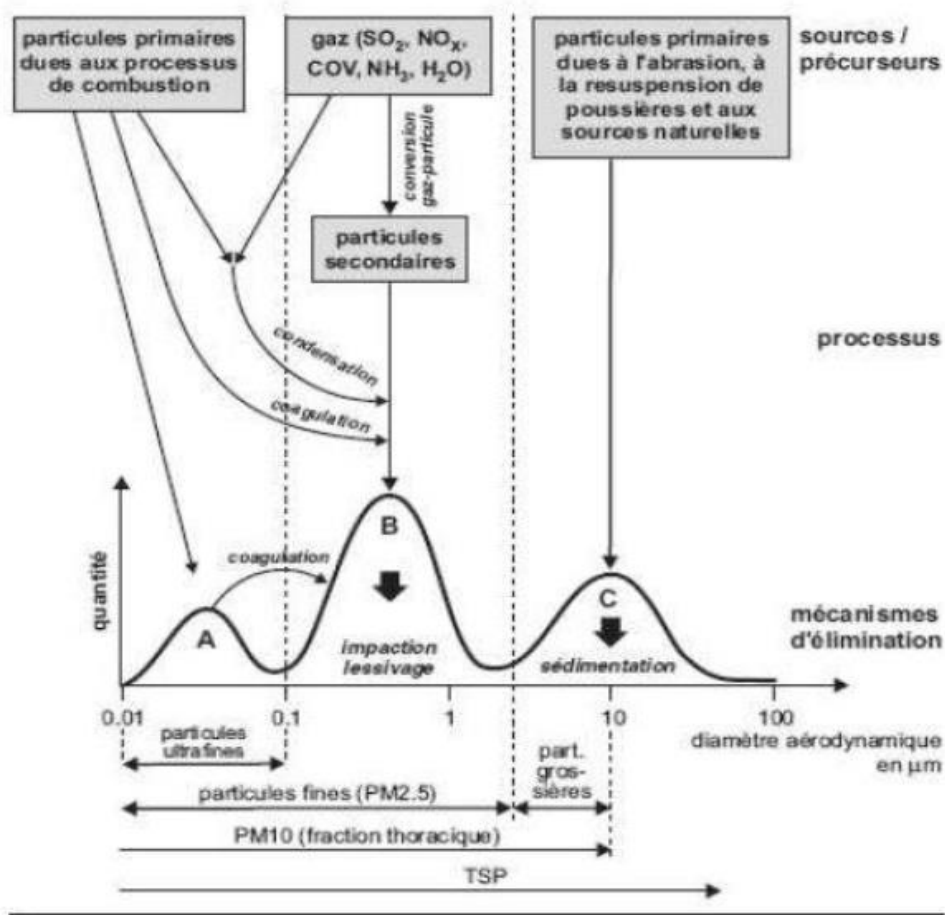
Polluants	Facteur d'émission (kg/ton)
Poussières	3,9
SO₂	0,27
NO_x	2,4
CO₂	900
CO	0,49

ANNEXE 2 : Liste des codes SNAP.

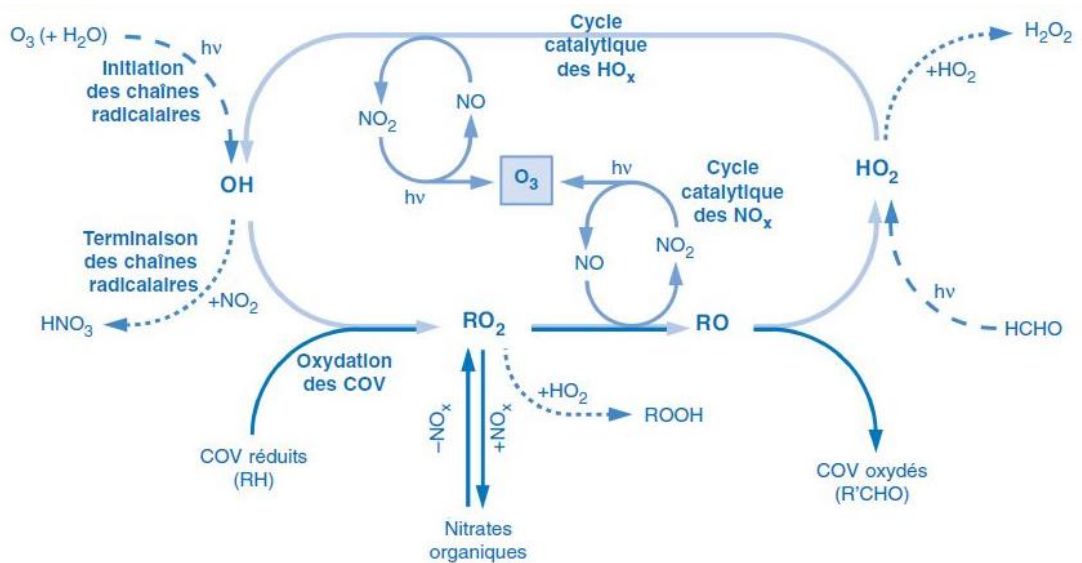
SNAP	Secteur d'émission
SNAP 01 : combustion dans l'industrie de l'énergie et de la transformation de l'énergie	Grosses installations de combustion liées à la production d'électricité, au chauffage urbain, au raffinage de pétrole, à la transformation des combustibles minéraux solides et gazeux... ⇒ Sources ponctuelles exclusivement.
SNAP 02 : combustion hors industrie	Petites installations de combustion des secteurs résidentiel, tertiaire, agricole... moteurs fixes, équipements ménagers... ⇒ Sources surfaciques
SNAP 03 : combustion dans l'industrie manufacturière	Toutes les installations de combustion pour la fabrication (hors procédés) du secteur de l'industrie manufacturière. ⇒ Sources ponctuelles et surfaciques
SNAP 04 : procédés de production	Tous procédés de productions et procédés utilisés en fabrication pour les secteurs industriels et artisanaux et non liés à des combustions définies précédemment (SNAP 03)... ⇒ Sources ponctuelles et surfaciques
SNAP 05 : extraction et distribution de combustibles fossiles/énergie géothermique.	Industries extractives des différents combustibles gazeux, liquides et solides, distribution et stockage des différents combustibles et carburants... ⇒ Sources surfaciques.
SNAP 06 : utilisation des solvants et autres produits	Industries extractives des différents combustibles gazeux, liquides et solides, distribution et stockage des différents combustibles et carburants... ⇒ Sources surfaciques.
SNAP 07 : transport routier.	Voitures, véhicules utilitaires, poids lourds, motos, évaporation d'essence... ⇒ Sources linéiques.
SNAP 08 : autres sources mobiles et machineries.	Trafic ferroviaire, fluvial, maritime et aérien. ⇒ Sources linéiques et surfaciques.
SNAP 09 : traitement et élimination des déchets.	Toutes les installations d'incinération de déchets, les torchères industrielles, les décharges... ⇒ Sources ponctuelles exclusivement.
SNAP 10 : agriculture, sylviculture et aquaculture.	Toutes les installations d'incinération de déchets, les torchères industrielles, les décharges... ⇒ Sources ponctuelles exclusivement.
SNAP 11 : autres sources et puits.	Forêts de feuillus et conifères, prairies... ⇒ Sources surfaciques

ANNEXE 3 : Mécanismes de formation des PM-10 et de NO₂.

1. Mécanismes de formation des PM-10.



1. Mécanismes de formation de NO₂.



ANNEXE 4 : Équations mathématiques de model TAPM (Hurley 2008).

Equations fondamentales de la dynamique des fluides TAPM est un modèle d'équation primitive incompressible, non hydrostatique, avec une coordonnée verticale suivant le terrain.

2. Equations mathématiques de la composante météorologique.

Le vent moyen est déterminé pour les composantes horizontales u (Equation 1) et v (Equation 2) (m/s) à partir de l'équations de quantité de mouvement et le terrain suivant la vitesse verticale s (m/s) de l'équation de continuité.

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} - \theta_v \left(\frac{\partial \pi}{\partial x} + \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right) + fv + F(u) - N_s (u - u_s) \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} - \theta_v \left(\frac{\partial \pi}{\partial y} + \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y} \right) - fu + F(v) - N_s (v - v_s) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \sigma} = - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x} \right) + v \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_v}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \theta_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial \theta_v}{\partial y} \right) - \frac{\partial \overline{w'\theta_v'}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} + S_{\theta_v} + F(\theta_v) - N_s (\theta_v - \theta_{vs}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi_H}{\partial \sigma} = - \frac{g}{\theta_v} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x} \right)^{-1} \quad (5)$$

Avec :

t = time (s) ;

x, y, σ = les composantes de système de coordonnées (m) ;

z = coordonnée verticale cartésienne (m) ;

z_t = hauteur de sommet de modèle (m) ;

z_s = hauteur du terrain (m) ;

K_H = coefficient de diffusion horizontale ;

$\overline{w'\phi}$ = flux vertical de ϕ ;

$F(\phi)$ = filtrage horizontal de ϕ ;

f = paramètre de Coriolis ($4\pi_c \sin(\text{lat})/(24*3600)$) (S^{-1}) ;

$\pi_c = 3,14159265$;

lat = latitude ($^\circ$) ;

u_s, v_s, θ_{vs} = vents synoptiques à grande échelle et température virtuelle potentielle ;

N_s = coefficient de nudging à grande échelle ;

T = température (K) ;

g = constante gravitationnelle ($9,81 \text{ m s}^{-2}$) ;

λ = chaleur latente de vaporisation de l'eau ($2,5 * 10^6 \text{ J kg}^{-1}$) ;

c_p = chaleur spécifique a pression constante ($1006 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

3. Equations mathématiques de la composante pollution.

L'équation pronostique de la concentration de pollution est similaire à celle des variables potentielles de température virtuelle et d'humidité spécifiques, elle comprend l'advection, la diffusion et les termes représentant les émissions de polluants S_c et les réactions chimiques R_c .

$$\frac{d\chi}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{H\chi} \frac{\partial \chi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{H\chi} \frac{\partial \chi}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial \sigma}{\partial z} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} (\overline{w' \chi'}) + S_\chi + R_\chi$$

Où :

$$\overline{w' \chi'} = -K_\chi \frac{\partial \chi}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial z}$$

et avec de coefficients de diffusion $K_{H\chi} = \min(10, K_\chi)$ et $K_\chi = 2,5K$;

$$\frac{d\overline{\chi'^2}}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{H\chi} \frac{\partial \overline{\chi'^2}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{H\chi} \frac{\partial \overline{\chi'^2}}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial z} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_\chi \frac{\partial \overline{\chi'^2}}{\partial \sigma} \right) + P_V - \varepsilon_V + S_V$$

$$P_V = \begin{cases} 2K_\chi \left(\left(\frac{\partial \overline{\chi}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\chi}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{\chi}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\chi}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{\chi}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right)^2 \right), & \text{if } \overline{\chi} \text{ in EGM mode;} \\ 2c_{k(LPM)} K \left(\left(\frac{\partial \overline{\chi}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\chi}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{\chi}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\chi}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{\chi}}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right)^2 \right), & \text{if } \overline{\chi} \text{ in LPM mode;} \end{cases}$$

Taux de dissipation de la variance de la concentration :

$$\varepsilon_\chi = \frac{2}{c_\chi} \frac{\varepsilon}{E} \overline{\chi'^2},$$

Le terme source d'émission :

$$S_V = 2I_E (\overline{\chi'^2})^{1/2} S_\chi,$$