

République Algérienne Démocratique 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

**Elaboration d'une cartographie de la
pollution photochimique du grand Alger**

Présentée par

OUCHER Nassima

Magister en Génie de l'Environnement

Sous la direction de **Mr. Rabah KERBACHI - Professeur**

Présenté(e) et soutenue publiquement le (09/07/2020)

Composition du jury :

Mme BELHANACHE Naima	Professeur, ENP	Présidente
Mr. KERBACHI Rabah	Professeur, ENP	Directeur de Thèse
Mr. YASSAA Nourreddine	Professeur USTHB, Haut-Commissaire aux ER	Examineur
Mr. LOUNICI Hakim	Professeur, Université de Bouira	Examineur
Mr. BOUGHEDAOUI Menouar	Professeur, Université de Blida	Examineur
Mr. ALI KHODJA Hocine	Professeur, Université de Constantine	Examineur

10, Avenue Hassen Badi – B.P. 182-16200 El Harrach –Alger – Algérie / www.enp.edu.dz

ENP 2020

République Algérienne Démocratique 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

**Elaboration d'une cartographie de la
pollution photochimique du grand Alger**

Présentée par

OUCHER Nassima

Magister en Génie de l'Environnement

Sous la direction de **Mr. Rabah KERBACHI - Professeur**

Présenté(e) et soutenue publiquement le (09/07/2020)

Composition du jury :

Mme BELHANACHE Naima	Professeur, ENP	Présidente
Mr. KERBACHI Rabah	Professeur, ENP	Directeur de Thèse
Mr. YASSAA Nourreddine	Professeur USTHB, Haut-Commissaire aux ER	Examineur
Mr. LOUNICI Hakim	Professeur, Université de Bouira	Examineur
Mr. BOUGHEDAOUI Menouar	Professeur, Université de Blida	Examineur
Mr. ALI KHODJA Hocine	Professeur, Université de Constantine	Examineur

10, Avenue Hassen Badi – B.P. 182-16200 El Harrach –Alger – Algérie / www.enp.edu.dz

ENP 2020

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, qui m'ont montré le chemin à suivre ;

Mes frères

Ma belle-sœur et ma nièce

Mes amies qui m'ont soutenu

Mes collègues du CDER

Et toute l'équipe du Département de Génie de l'environnement.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, mes remerciements sincères à Monsieur le Professeur KERBACHI R., qui m'a donné l'opportunité de faire partie de son équipe de recherche au sein du Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique. Je le remercie également, pour m'avoir proposé ce sujet intéressant et d'actualité ainsi que pour ses précieuses suggestions prodiguées tout au long de la réalisation de ce travail.

Je le remercie également pour ses encouragements, ses conseils pendant mes travaux de recherches et surtout pour sa gentillesse et sa compréhension.

Je tiens à remercier Mme N. BELHANECHÉ, Professeur à l'E.N. P, d'avoir accepté d'être la présidente du jury.

Je tiens à remercier vivement Mr. N. YASSAA, Professeur et Haut-Commissaire aux ER, qui, malgré ses occupations, m'a fait l'honneur d'examiner mon travail.

Mes remerciements s'adressent également à tous les membres du jury Mr. LOUNICI Hakim, Professeur à l'Université de Bouira, Mr. BOUGHEDAOUI Menouar, Professeur à l'Université de Blida, et Mr. ALI KHODJA Hocine, Professeur à l'Université de Constantine, pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail en acceptant de l'examiner.

Je remercie vivement Monsieur Y KERCHICH pour sa disponibilité et ses conseils. Qu'il trouve ici mes meilleurs remerciements et l'expression de mon profond respect.

Mes remerciements s'adressent également à :

- Mme F BELMACHHOUR
- Mr G PASSERINI

Finalement, je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance, mes meilleurs remerciements et l'expression de mon profond respect.

ملخص

تعرض هذه الدراسة مستويات تلوث الأوزون التروبوسفوري (O_3) المقاسة في خمسين (50) موقعا مختلفا (حضري وفي الضواحي) على مدى عامين (2012 و 2013) بالجزائر. خلال هذه الفترة، أجريت أربع حملات أسبوعية لأخذ العينات باستخدام أنابيب الانتشار السليبي. حيث أظهرت النتائج المتحصل عليها أن متوسط تركيزات O_3 المقاسة في جميع المواقع لمجمل الحملات التي تم تنفيذها يتراوح ما بين 44.26 إلى 213.18 ميكروغرام م³ أن المتوسط السنوي لـ O_3 خلال فترة الدراسة كان 156.60 ميكروغرام م³ مع قيم متوسطة دنيا وأقصى. من 100.80 إلى 211.25 ميكروغرام م³ على التوالي. بالإضافة إلى ذلك، تم قياس مستويات تلوث الأوزون على مدار 8 ساعات و 24 ساعة في موقع حضري. حيث أظهرت دراسة التغيرات الموسمية أن التركيزات عالية في فصل الصيف مقارنة بالشتاء. تم وضع خريطة للأوزون التروبوسفوري لأول مرة في شمال الجزائر. إذ تم إنجاز هذه الخريطة بواسطة برنامج ArcGis. أظهرت النتائج أن أعلى مستويات O_3 تم تسجيلها بشكل رئيسي في الجزء الشرقي للجزائر، وإلى حد أقل في الجزء الغربي. بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام بيانات الأوزون من شبكة مراقبة جودة الهواء في الجزائر لاختبار نموذج RAMS-EPS3-CAMx للأوزون في شمال الجزائر. هذا يدل على وجود اتفاق جيد إلى حد ما بين البيانات المقاسة والمتوقعة مع التوزيع الواضح للأوزون خلال النهار. كان التطور المكاني للأوزون الناتج عن المراقبة والنمذجة متشابهة نسبيا، باستثناء بعض الانحرافات المسجلة.

الكلمات المفتاحية: الأوزون التروبوسفوري، العينات السليبية، التغيرات الموسمية، خريطة، ArcGis، التصميم، RAMS-EPS3-CAMx، الجزائر.

Abstract

This study presents tropospheric ozone (O_3) pollution levels measured at fifty (50) different sites (urban and suburban) over two-year period (2012 and 2013) in Algiers. During this period, four weekly sampling campaigns were carried out using the Radiello passive diffusive tubes. The results obtained showed that the average O_3 measured concentrations on all sites for the set of campaigns carried out ranged from 44.26 to 213.18 $\mu\text{g m}^{-3}$ and the annual O_3 average during the study period was 156.60 $\mu\text{g m}^{-3}$ with minimum and maximum average values of 100.80 and 211.25 $\mu\text{g m}^{-3}$ respectively. In addition, ozone pollution levels over a period of 8h and 24h were measured on urban site. The study of seasonal variations showed high levels of ozone concentrations during the summer period compared to the winter period. Tropospheric ozone cartography was also established for the first time over the northern of Algeria in this work. The cartography was carried out by the ArcGis software. The results show that the highest O_3 levels was mainly recorded in the East part of Algiers and to a lesser degree, in the West part. In addition, the ozone data of the Algiers Air Quality Monitoring Network was used to test the RAMS-EPS3-CAMx model system for ozone over the northern of Algeria. It shows that there is relatively good agreement between the measured and predicted data with a clear diurnal ozone distribution. The ozone spatial evolution obtained from observation and modelling was relatively similar albeit some registered deviations.

Keywords: Tropospheric ozone, passive samplers, seasonal variations, cartography, ArcGIS, modelling, RAMS-EPS3-CAMx, Algiers.

Résumé

Cette étude présente les niveaux de pollution par l'ozone troposphérique (O_3) mesurés en cinquante (50) sites différents (urbains et suburbains) sur une période de deux ans (2012 et 2013) à Alger. Au cours de cette période, quatre campagnes d'échantillonnage hebdomadaires ont été réalisées à l'aide des tubes à diffusion passive Radiello. Les résultats obtenus ont montré que les concentrations moyennes d' O_3 mesurées sur tous les sites pour l'ensemble des campagnes réalisées allaient de 44,26 à 213,18 $\mu\text{g m}^{-3}$ et que la moyenne annuelle d' O_3 pendant la période d'étude était de 156,60 $\mu\text{g m}^{-3}$ avec des valeurs moyennes minimale et maximale de 100,80 et 211,25 $\mu\text{g m}^{-3}$ respectivement. De plus, les niveaux de pollution par l'ozone sur une période de 8h et 24h ont été mesurés sur un site urbain. L'étude des variations saisonnières a montré des concentrations élevées d'ozone en été par rapport à l'hiver. La cartographie de l'ozone troposphérique a également été établie pour la première fois dans le nord de l'Algérie. La cartographie a été réalisée par le logiciel ArcGis. Les résultats montrent que les niveaux les plus élevés d' O_3 ont été principalement enregistrés dans la partie Est d'Alger et, dans une moindre mesure, dans la partie Ouest. De plus, les données d'ozone du réseau de surveillance de la qualité de l'air d'Alger ont été utilisées pour tester le système de modèle RAMS-EPS3-CAMx pour l'ozone au nord de l'Algérie. Les résultats montrent qu'il existe une assez bonne concordance entre les données mesurées et prévues avec une distribution claire de l'ozone diurne. L'évolution spatiale de l'ozone obtenue à partir de l'observation et de la modélisation était relativement similaire, à l'exception de quelques déviations enregistrées.

Mots-clés : Ozone troposphérique, échantillonneurs passifs, variations saisonnières, cartographie, ArcGIS, modélisation, RAMS-EPS3-CAMx, Alger.

Liste des abréviations

ADEME :	Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
AQMEII :	Air Quality Modelling Evaluation International Initiative
APRUE :	Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Energie
BTEX :	Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes.
CAMx :	Comprehensive Air Quality Model with Extensions
CDER :	Centre de Développement des Energies Renouvelables
CE :	Commission Européenne
CH₄ :	Méthane
CO :	Monoxyde d'oxygène
CO₂ :	Dioxyde d'oxygène
CORINAIR :	CORe INventory AIR emissions
COV :	Composés Organiques Volatils
COVNM :	Composés Organiques Volatils Non Méthaniques
DO :	Densité optique
ECRHS :	European Community Respiratory Health Survey,
EMEP :	European Monitoring and Emission Program
EPA :	Environmental Protection Agency
EPS3 :	Emissions Processing System, version 3.20
ESRI :	Environmental Systems Research Institute
GEF :	Global Environment Facility
GIEC :	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
Hab :	Habitant
HC :	Hydrocarbure
HAP :	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
HPLC :	Chromatographie en phase liquide à haute performance
INCT :	Institut National de Cartographie et des Télécommunications
IPCC :	Intergovernmental Panel on Climate Change
INSP :	Institut National de Santé Publique
MATE :	Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
MTBH :	3-méthyl-4-benzothiazolinone hydrazone
MTEP :	Millions de Tonnes Equivalent Pétrole
NOAA :	National Oceanic and Atmospheric Administration
NO :	Monoxyde d'azote
NO₂ :	Dioxyde d'azote
NO_x :	Oxydes d'azotes
O₃ :	Ozone
OH :	Hydroxyde d'oxygène
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
ONEDD :	Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable
ONS :	Office National des Statistiques
PA :	4-piridylaldéhyde
PNUD :	Programme des Nations Unies pour le Développement
PTFE :	Polytétrafluoroéthylène
RQESM :	Root Mean Square Standardized Error
SNAP :	Selected Nomenclature for sources of Air Pollution
UE :	Union Européenne
UV :	Ultra-violet

Liste des figures

Figure 01	Mortalité attribuée à la pollution de l'air ambiant	15
Figure 02	Les différentes couches de l'atmosphère terrestre	18
Figure 03	Sources de formation d'ozone troposphérique	19
Figure 04	Cycle de formation d'ozone dans la troposphère	20
Figure 05	Cycle photo-dynamique des NO _x en milieu pollué	22
Figure 06	Evolution diurne de l'ozone en milieu urbain	23
Figure 07	Conséquence d'inversion de température	25
Figure 08	Analyseur d'ozone par absorption UV	30
Figure 09	Modèle de diffusion sur un échantillonneur passif	30
Figure 10	Localisation des sites d'échantillonnage	38
Figure 11	Localisation des stations de mesure du réseau Samasafia et de la station météo	40
Figure 12	Principe du tube passif radial	41
Figure 13	Etapes de l'utilisation d'un tube Radiello	42
Figure 14	Courbe d'étalonnage de l'ozone	44
Figure 15	Présentation de la démarche d'étude	46
Figure 16	Diagramme schématique du système de modélisation CAMx	52
Figure 17	Grille principale G1 et grilles imbriquées	54
Figure 18	Concentrations moyennes d'ozone mesurées en 2012 et 2013 en différents sites d'Alger	58
Figure 19	Teneurs moyennes en ozone selon le type de sites	58
Figure 20	Evolution des teneurs en ozone selon la saison étudiée	61
Figure 21	Teneurs moyennes en ozone selon la saison étudiée	61
Figure 22	Comparaison des teneurs moyennes d'ozone mesurées en périodes hivernale et estivale	62
Figure 23	Quantités massiques d'O ₃ piégées pour les différentes durées d'exposition	65
Figure 24	Variogrammes d'ajustement et surfaciques de l'O ₃ moyen pour certaines périodes de l'étude	68
Figure 25	Cartographie de la teneur moyenne en ozone (a) et cartographie des écarts-types de la saison hivernale (b)	70
Figure 26	Cartographie de la teneur moyenne en ozone (a) et cartographie des écarts-types des deux étés (b)	71
Figure 27	Cartographie de la teneur moyenne en ozone (a) et cartographie des écarts-types de l'été 2013 (b)	72
Figure 28	Cartographie de la teneur moyenne en ozone (a) et cartographie des écarts-types des saisons estivales (b)	73
Figure 29	Cartographie de la teneur moyenne en ozone de toutes les campagnes de mesure (a) et cartographie des écarts-types (b)	74
Figure 30	Cycles diurnes (calculés et mesurés) des concentrations d'ozone	76
Figure 31	Cycles diurnes (mesuré et calculé) de l'ozone pour la journée du 23 juin 2002	77
Figure 32	Evolution du taux de contribution de la pollution par l'ozone	79

Liste des tableaux

Tableau 01	Normes règlementant les expositions à l’ozone	28
Tableau 02	Densité de population par commune	36
Tableau 03	Répartition fréquentielle du vent sur 16 directions et 04 classes de vitesse (en%)	39
Tableau 04	Niveaux moyens d'ozone mesurés pendant la période d'étude	56
Tableau 05	Données météorologiques moyennes des quatre campagnes de mesure	63
Tableau 06	Paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux de O ₃	66
Tableau 07	Validation statistique de la qualité d'estimation de l’ozone par krigeage ordinaire	69

SOMMAIRE

Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale	10
CHAPITRE I. Généralités sur la pollution de l'air par l'ozone	
I.1 Introduction	15
I.1.1 Enjeux de la pollution de l'air	15
I.1.2 La pollution photochimique	17
I.2 Origine et sources de formation de l'ozone troposphérique	18
I.2.1 Origine	18
I.2.2 Mode de formation de l'ozone troposphérique naturel	19
I.2.3 Mode de formation de la pollution par l'ozone troposphérique	20
I.3 Facteurs météorologiques influençant la dispersion des polluants	23
I.3.1 Le vent	24
I.3.2 La température de l'air	24
I.3.3 Les nuages	24
I.3.4 Le phénomène d'inversion de la température	24
I.4 Effets de l'ozone	25
I.4.1 Effets sur la santé	25
I.4.2 Effets sur l'environnement	26
I.5 Réglementation relative à l'ozone	28
I.6 Techniques de prélèvement dans l'air ambiant de l'ozone	29
I.6.1 Prélèvement actif (automatique)	29
I.6.2 Prélèvement passif	30
I. 7 Notions de cartographie de la pollution	33
CHAPITRE II. Matériels et méthodes	
II.1 Description du site d'étude et campagnes de prélèvement	36
II.2 Méthodologie expérimentale	41
II.2.1 Mode d'échantillonnage	41
II.2.2 Analyse des échantillons	42
II.2.3 Calcul des teneurs atmosphériques	44
II.3 Géostatistique et modélisation	45
II.3.1 Méthodologie de la cartographie	47
II.3.2 Méthodologie de la modélisation	48
CHAPITRE III. Résultats et discussion	
III.1 Niveaux de pollution par l'ozone	56
III.2 Variation saisonnière et influence des facteurs météorologiques	61
III.3 Teneurs diurnes de l'ozone	64
III.4 Cartographie de la pollution par l'ozone à Alger	66
III.4.1 La variographie	66
III.4.2 Qualité d'estimation de la cartographie de l'O ₃	67
III.4.3 Validation statistique de la cartographie	68
III.4.4 Résultats de cartographie : Cartes de distribution de la pollution	69
III.5 Modélisation des résultats	76
III.6 Comparaison des résultats de modélisation	78
Conclusion générale	81
Bibliographie	83
Annexes	92
Production scientifique	122

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, plusieurs études ont mis en évidence l'influence de l'ozone troposphérique sur la dégradation de la qualité de l'air (Beck, Reeves et al. 1992) ; (Guicherit and Roemer 2000) ; (Hsu 2007) ; (Krzyscin, Krizan et al. 2007) ; (Kulkarni, Bortoli et al. 2011) ; (Oltmans, Lefohn et al. 2006) ; (Özbay, Keskin et al. 2011), l'effet de serre et la contribution au forçage radiatif du climat (Solomon, Qin et al. 2007). Par conséquent, l'ozone est l'un des six polluants de critères réglementés par diverses institutions internationales telles que l'OMS, L'Union Européenne et l'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis. Dans les directives de l'OMS, le seuil de protection sanitaire de l'O₃ est estimé à 160 µg/m³ par 1h (Santé 2017).

Bien que de nature chimique identique, il convient de distinguer l'ozone stratosphérique de l'ozone troposphérique. En effet, non seulement les mécanismes de formation ne sont pas identiques, mais les conséquences de leur présence sont opposées. Seul l'ozone troposphérique nous intéresse dans le cadre de cette étude. Cet ozone est un polluant dit “secondaire” qui, en plus de ses effets sur la santé, contribue indirectement à l'effet de serre. Il résulte généralement de la transformation chimique dans l'atmosphère de certains polluants dits “primaires” sous l'effet du rayonnement solaire. Cette formation photochimique d'ozone est un phénomène bien connu résultant de réactions chimiques d'oxydes d'azote (NO et NO₂) et de composés organiques volatils en présence de conditions météorologiques favorables et en particulier de rayonnement solaire (Özbay, Keskin et al. 2011). Les mécanismes réactionnels sont complexes et les plus fortes concentrations d'O₃ apparaissent, par transport, en périphérie des zones émettrices des polluants primaires.

De nombreuses études ont montré que la principale source d'émission de polluants dans les grandes villes est le trafic routier. Ainsi, certains auteurs estiment qu'environ 70% des NO_x émis dans l'atmosphère dans les grandes villes sont attribuables au secteur des transports routiers (Joumard 1989). Avec les hydrocarbures, les NO_x sont les principaux précurseurs de l'ozone photochimique (Butler 1979) ; (Kerbachi, Boughedaoui et al. 1996).

De ce fait, la surveillance de la pollution photochimique par l'ozone photo-oxydant O₃ et ses précurseurs, les NO_x et les composés organiques volatils (COV), dans les zones rurales, suburbaines et urbaines, est devenue une préoccupation majeure pour les scientifiques, les autorités locales, la santé et l'environnement (Caballero, Galindo et al. 2007). Alors que dans

les pays développés, cette forme de pollution fait l'objet d'une attention accrue de la part des décideurs et des scientifiques, ce n'est malheureusement pas le cas en Algérie où toutes les conditions nécessaires à la formation de cette pollution sont réunies.

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 (Boughédaoui, Joumard et al. 2008) ; (Khedidji, Ladjji et al. 2013); (Ladjji, Yassaa et al. 2014).

En Algérie, au cours des dernières années, le développement socio-économique, l'amélioration de la qualité de vie de la population et la croissance démographique sont à l'origine d'une demande en énergie fossile qui croît de manière exponentielle, engendrant par là une augmentation des émissions des substances polluantes. Selon l'Agence de maîtrise de l'énergie APRUE, la consommation des énergies fossiles par le secteur des transports à lui seul, s'élevait à environ 44 % de la consommation interne du pays (APRUE 2012). De plus, l'utilisation exclusive et accrue de combustibles d'origine fossile caractérisés par des facteurs d'émission élevés, contribue à maintenir à son plus haut niveau la présence des oxydes d'azote et des COV dans l'atmosphère qui sont les précurseurs de l'ozone.

L'amélioration du contexte économique s'est traduite par une très forte croissance du parc automobile, estimée en 2013 (Année de notre étude) à 5 123 705 véhicules (ONS 2013). Pour la même année 2013 et pour une population de 3 090 986 habitants (ONS 2013), le quart de ce parc, soit environ 1 326 667 véhicules, était immatriculé dans la Wilaya d'Alger, soit un très fort taux de motorisation de plus de 400 Véhicules/1000 habitants. Les voitures particulières y représentent 70%, suivies des véhicules légers avec 21% et camions avec 3% (ONS 2013).

Ainsi, à Alger, Le trafic routier représente une part importante de la pollution de l'air en ville (Kerbachi, Boughedaoui et al. 2006) ; (Boughédaoui, Joumard et al. 2008) ; (Chikhi and Medvedev 2014).

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 (Kerbachi,

Boughedaoui et al. 2006) ; (Kerchich and Kerbachi 2012) ; (Ladji, Yassaa et al. 2014) ; (Abderrahim, Chellali et al. 2016) ; (Talbi, Kerchich et al. 2018).

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 de surveillance pour mesurer en continu les concentrations de certains polluants. Dans ce cadre, 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. Alger a été équipée en 2003 de quatre stations de mesure SAMASAFIA qui suivent les concentrations des principaux polluants atmosphériques, mais ces dernières ont connu beaucoup de problèmes de maintenance et d'étalonnage et sont depuis plusieurs années à l'arrêt. En 2017 le CDER a lancé sa propre station de mesure de la qualité d'air station « NESMA » installée au CHU Musptapha dotée d'analyseurs de (PM, BC, O₃, COV et NO_x).

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.

Comme les grandes villes du bassin méditerranéen, la région métropolitaine d'Alger (Latitude nord 36° 43'), qui abrite un important trafic routier, avec une longueur totale du réseau routier d'environ 2346 km (ONS 2011) est caractérisée par un climat méditerranéen modéré de faible amplitude thermique avec un peu de gelée. Les deux caractéristiques climatiques sont les vents dominants de l'Ouest et la grêle qui se produit en moyenne 12 jours par an dans le Sahel. La température moyenne annuelle varie entre 16 et 18 ° C. Les précipitations sont en moyenne de 735 mm/an avec dépassement de 100 mm/an de cette moyenne pour les mois de novembre, décembre et janvier (ONS 2011). L'Algérie bénéficie d'un fort ensoleillement ; la durée moyenne de l'ensoleillement annuelle varie de 2 600 heures/an dans le Nord à 3 500 heures/an dans les Hautes Terres et le Sud (Yaiche and Bouhanik 2013). Ces facteurs météorologiques répondent à toutes les conditions qui peuvent provoquer une intense pollution oxydante.

La mesure de l'ozone permet de se rendre compte de l'importance des épisodes de pollution photochimique qui surviennent par temps chaud et ensoleillé. Dans notre région, les premiers épisodes peuvent apparaître dès le mois de juin et se prolonger jusqu'en septembre.

Comme, l'air est indispensable à tous les êtres vivants et quand on considère que l'homme (adulte) en inhale de 12 à 15 m³ par jour, on conçoit que le maintien de sa qualité naturelle figure au premier plan de nos préoccupations. De ce fait, la connaissance de l'impact de cette pollution nécessite dans un premier temps une évaluation de son ampleur, sa répartition spatiale et sa modélisation.

C'est dans ce contexte que nous avons approché ce travail sur la pollution de l'air par l'ozone en utilisant pour la première fois en Algérie la technique d'échantillonnage passif du tube de Radiello dans les zones urbaines et suburbaines. Contrairement à l'échantillonnage actif, la technique passive permet de mener des mesures, à moindre coût et simultanément, sur un grand nombre de sites dans des zones très vastes. Les mesures réalisées permettent d'accéder aux niveaux de pollution atmosphérique ambiante et à l'élaboration de la cartographie de la pollution photochimique par l'O₃ dans le grand Alger. La distribution spatio-temporelle est réalisée en utilisant une méthode d'interpolation spatiale, probabiliste, disponible dans l'extension Geostatistical Analyst d'ArcGIS. D'autre part, comme la modélisation spatiale est un élément clé de la chaîne des outils de gestion de la pollution atmosphérique, nous avons testé le système modèle RAMS-EPS3-CAMx pour le polluant secondaire O₃ dans la grande ville d'Alger. Le réseau de stations de surveillance de l'air, les inventaires d'émissions et les modèles de dispersion sont des outils utiles et ils doivent être utilisés ensemble. De plus, l'évolution des niveaux d'ozone de ces deux techniques a été comparée.

Nous présenterons en chapitre 1, une synthèse bibliographique des généralités sur la pollution de l'air par l'ozone. Le chapitre 2 est consacré à la description du matériels et méthodes : la méthodologie expérimentale utilisée.

Les résultats et discussion de la cartographie, la modélisation ainsi que, la comparaison de cartographie et résultats de modélisation sont présentés et discutés dans le chapitre 3.

Enfin dans la partie conclusion, nous résumons les principaux résultats et perspectives de ce travail.

CHAPITRE I.

Généralités sur la pollution de l'air par l'ozone

I.1 Introduction

I.1.1 Enjeux de la pollution de l'air

❖ Sanitaires

De nombreuses études épidémiologiques ont été menées afin de mettre en évidence la dépendance entre pollution urbaine et les impacts sanitaires à court et long terme (Zanobetti, Bind et al. 2008) ; (Cesaroni, Forastiere et al. 2014) ; (Korek, Bellander et al. 2015). Cependant, peu d'études sanitaires ont été réalisées en Algérie sur les populations exposées aux émissions atmosphériques (Laid, Atek et al. 2006) ; (Moncef, Reda et al. 2016) ; (Mourad and Noureddine 2016) alors que selon l'Office National des Statistiques, (ONS) en 2012, environ 69% de la population vivait sous l'influence de la ville (aire urbaine de plus de 20 000 habitants) (ONS 2017). De plus, l'OMS a déclaré que près de 7 millions de personnes meurent chaque année suite à l'exposition à la pollution de l'air (OMS 2016). La figure 01, montre la mortalité attribuée à la pollution de l'air ambiant dans le monde.

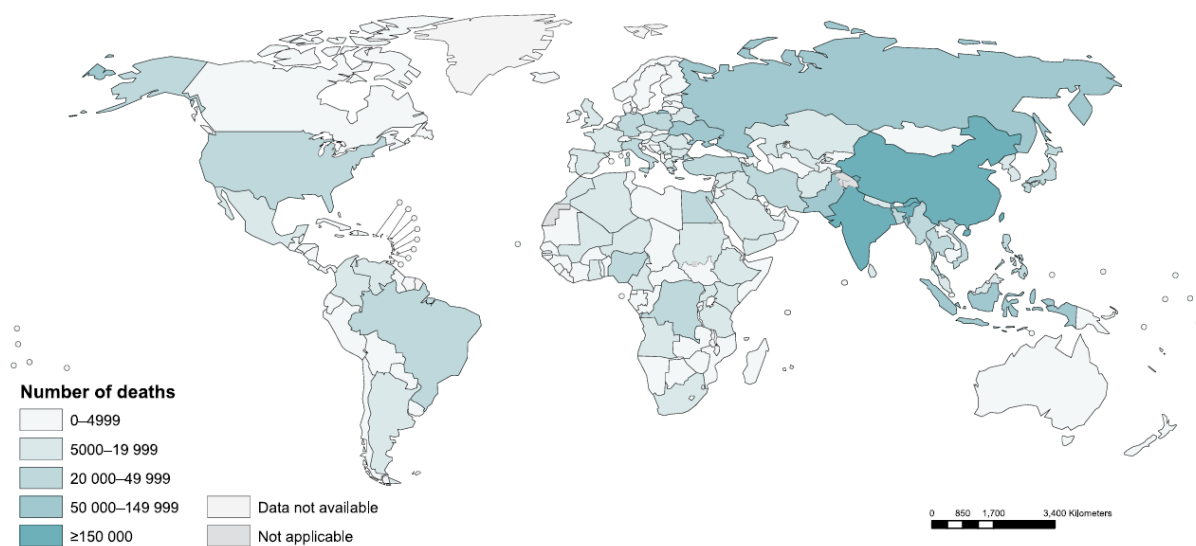


Figure 01 : Mortalité attribuée à la pollution de l'air ambiant (OMS 2016).

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 l'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).

❖ Environnementaux

Outre les effets sur la santé, la pollution urbaine induit des dégradations environnementales importantes. Le transfert des polluants dans les 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, Kirchner 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, Forrow 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, Kotsyuk 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 le cuivre) par (Gómez-Mendikute, Etxeberria et al. 2002) aux abords côtiers de grandes villes. D'autres études ont montré le lien direct entre concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les sols, leur dépôt sous forme solide sur la route ainsi que leur transfert dans les eaux de ruissellement. (Liu, 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.1.2 La pollution photochimique

L'ozone O₃ est la deuxième forme allotropique de l'oxygène, c'est un composé naturel présent dans la basse atmosphère à de faibles concentrations (de l'ordre de quelques ppb). Son nom dérive du grec "ozein" signifiant exhaler, sentir une odeur, cette odeur est caractéristique (âcre). Sa répartition dans l'atmosphère n'est pas homogène. C'est dans la stratosphère vers 20 kilomètres d'altitude qu'on le rencontre à des teneurs maximales. Sa quantité totale équivaut à une couche qui, à température et pression normale, couvrirait la terre avec une épaisseur de 3 millimètres. Dans cette couche appelée « couche d'ozone », il joue le rôle d'un filtre protecteur en absorbant les radiations ultraviolettes très nocives de longueur d'onde courtes comprises entre 200 et 300 nm (MEGIE 1988).

La concentration en O₃ dans la stratosphère est bien plus grande que celle présente dans la troposphère. Cette couche troposphérique contient près de 10 % de la quantité totale d'ozone présent dans l'atmosphère (Academie des Sciences 1993). Dans des conditions normales, il n'y a que très peu d'échanges entre la stratosphère et la troposphère. Ce n'est que dans des conditions de turbulences accrues que l'ozone stratosphérique peut être amené vers le sol (Singh and Titli 1978) ; (Marenco 1986).

A signaler aussi que dans les deux couches atmosphériques stratosphère et troposphère, la seule réaction de production directe d'ozone est la recombinaison d'un atome d'oxygène et d'une molécule d'oxygène en présence d'un troisième corps M (M : auxiliaire de collision N₂ ou O₂) qui stabilise les produits de la réaction : $O_2 + O\bullet + M \rightarrow O_3 + M$ (1)

La composition de l'air n'est pas la même en tous les points ni au cours du temps, elle dépend de plusieurs facteurs dont (Khatraoui 2009) :

- L'altitude ;
- La période prise en compte pendant la journée ;
- Le domaine concerné (mer, terre, zone rurale, zone urbaine...etc) ;

La troposphère est la zone qui nous intéresse le plus dans notre présente étude, vu qu'elle est le lieu principal de la pollution atmosphérique (Delmas, Mégie et al. 2005). La figure 02 illustre les différentes couches de l'atmosphère.

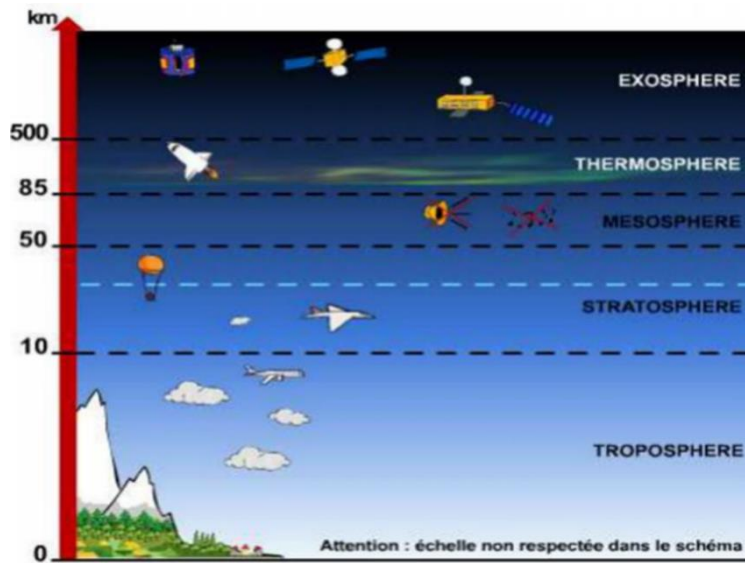


Figure 02 : Les différentes couches de l'atmosphère terrestre

I.2 Origine et sources de formation de l'ozone troposphérique

I.2.1 Origine

L'ozone que l'on trouve dans la troposphère est produit à proximité du sol par des réactions photochimiques mettant en jeu certains polluants de l'air tels que le monoxyde d'azote NO, le dioxyde d'azote NO₂ (désignés par la formule générale NO_x), le monoxyde de carbone CO et les hydrocarbures HC en présence de la lumière solaire (Leighton and Hughes 1961). Cette source, très importante, représente plus de 80 % de l'ozone troposphérique. Le CO et le CH₄ qui ont de plus longues durées de vies donnent lieu à une production relativement lente d'ozone. Les composés organiques volatils non méthaniques (COV) tels que les oléfines dis-substitués et les aromates qui sont les plus réactifs donnent lieu à des formations bien plus rapides d'ozone. Cette dernière source tend à accroître de manière significative les teneurs en ozone à proximité des aires urbaines et industrielles (Leighton and Hughes 1961). Nous illustrons en figure 03 les types de sources de pollution pouvant mener à la formation de l'ozone dans la troposphère.

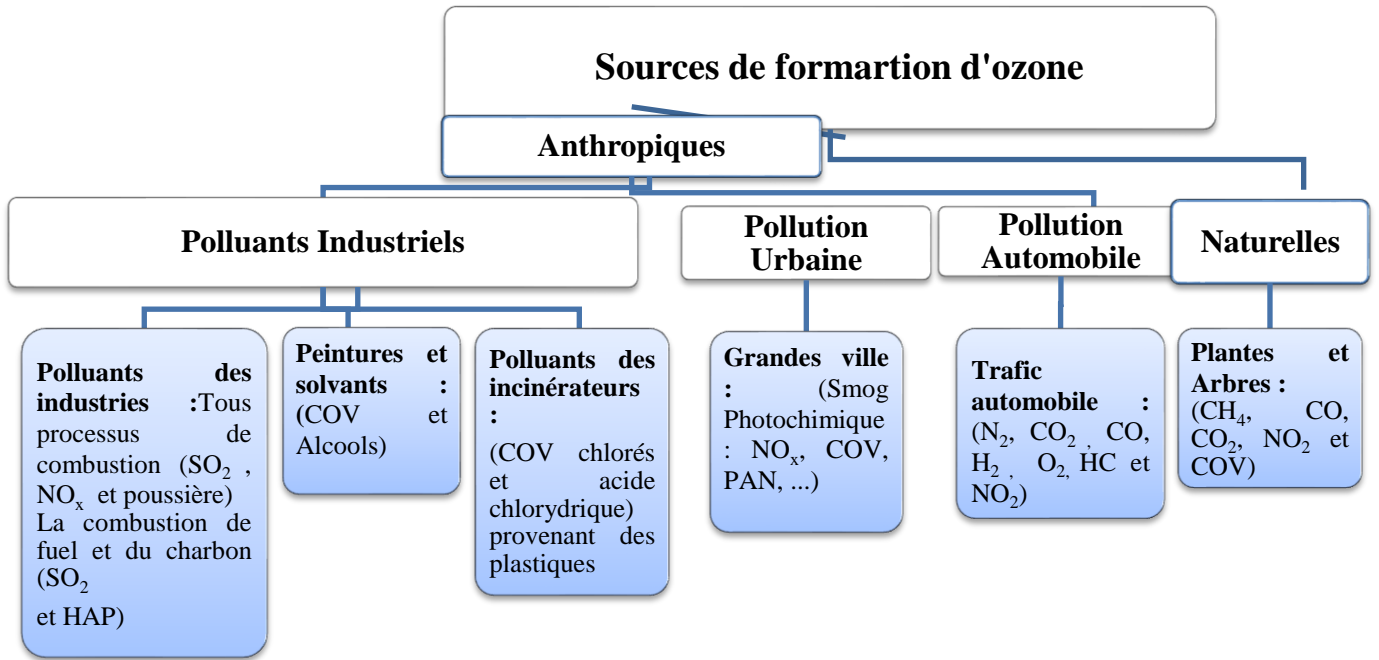
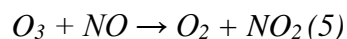
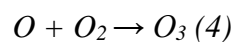
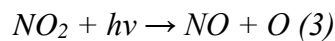
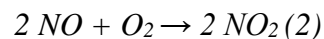


Figure 03 : Sources de formation d'ozone troposphérique

Selon la nature de l'ozone, naturel ou d'origine anthropique, son mode de formation est différent.

I.2.2 Mode de formation de l'ozone troposphérique naturel

Les activités humaines produisent une grande quantité d'oxydes d'azote qui, sous l'effet du rayonnement UV, peuvent libérer des atomes d'oxygène. Dans la troposphère, l'atome d'oxygène, appelé radical O produit par photodissociation aux longueurs d'onde inférieures à 400 nm (Chaxel 2001), mène aux réactions suivantes :



L'ozone se forme ainsi directement dans l'atmosphère par la recombinaison d'un atome d'oxygène O avec une molécule de dioxygène O₂, en présence d'un troisième corps qui stabilise les produits de la réaction (Réactions 2 et 5).

Cette série de réactions, nommée *cycle de Chapman*, où l'ozone se forme et est détruit, conduit à un équilibre où l'ozone naturel présent dans les basses couches de l'atmosphère n'atteint pas des teneurs nocives. En effet, l'ozone formé réagit quantitativement avec le monoxyde d'azote (réaction 5), ce qui permet d'atteindre un équilibre photo-dynamique qui limite l'accumulation

de l'ozone en milieu naturel non pollué. La teneur naturelle en ozone troposphérique de cet équilibre photochimique est déterminée par le rapport entre les concentrations de NO et NO₂ et l'intensité du rayonnement solaire. Elle varie d'un pays à un autre (pays ensoleillé ou non) et d'une saison à une autre (intensité du rayonnement solaire). En général, les teneurs en ozone naturel peuvent aller jusqu'à 40 µg/m³ (Mills, Buse et al. 2007).

I.2.3 Mode de formation de la pollution par l'ozone troposphérique

Dans la réalité les teneurs en ozone troposphérique mesurées dans les villes et périphéries dépassent largement les teneurs naturelles. Ceci est dû au fait qu'en milieu pollué, le cycle de Chapman est perturbé par la présence de composés organiques volatiles (COV) et d'un excès d'oxydes d'azote, espèces majoritairement générées par le trafic routier. Comme illustré en figure 4, cette perturbation provoque alors une série de réactions qui favorisent une formation excessive de molécules d'ozone (Jenkin and Clemitshaw 2000). Les émissions de COV contribuent ainsi à accroître de manière significative la teneur en ozone à proximité des aires urbaines et industrielles (Leighton and Hughes 1961).

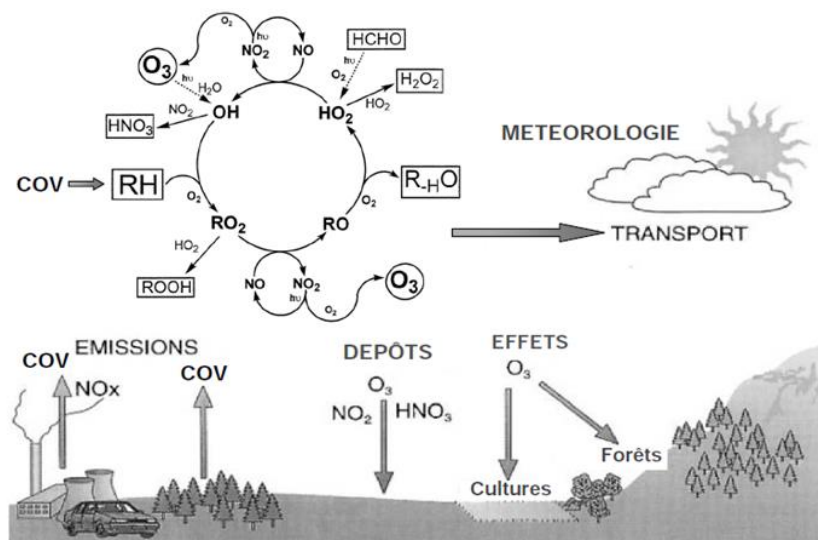


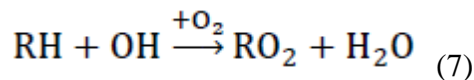
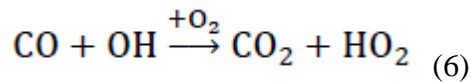
Figure 04 : Cycle de formation d'ozone dans la troposphère (LISA 2017)

En se combinant préférentiellement avec le monoxyde d'azote, les radicaux issus des COV rendent possible l'accumulation de l'ozone. De plus, ils représentent une source de NO₂ non issu de la dégradation de l'ozone, ce qui déséquilibre d'avantage le système en faveur de la

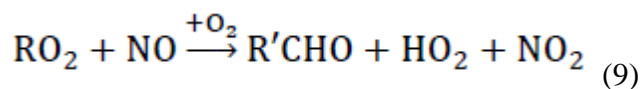
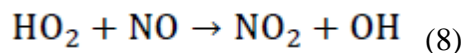
formation d'ozone. La formation de l'ozone dans la troposphère est donc associée à la présence de précurseurs chimiques, oxydes d'azote et COV, ce qui fait de l'ozone un polluant secondaire. Formé sous l'action du rayonnement solaire, il est en outre qualifié de polluant photochimique. Le cycle photo-dynamique donné en figure 05 illustre le nouveau cycle de formation de l'ozone. Les traits pleins donnent le cycle en milieu non ou peu pollué (voir réactions chimiques 2 à 5 données plus haut). Les flèches en pointillé montrent l'intervention des composés organiques qui viennent perturber le cycle normal. L'équation 5 n'a plus lieu ce qui permet à l'ozone de s'accumuler et d'atteindre des teneurs élevées.

A l'origine ce sont les radicaux OH qui interviennent dans la dégradation des COV pour former de nouveaux radicaux d'hydrocarbures très réactifs selon :

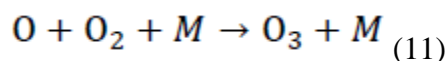
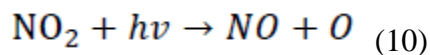
Le pool de radicaux est souvent appelé hydrogène impair (HO_x) et est le plus utilement considéré comme la somme des radicaux OH, HO_2 et RO_2 . La formation d'ozone se produit à travers la séquence de réactions suivante. La séquence est généralement initiée par la réaction de divers CO ou COV avec le radical OH selon les formules (6) et (7).



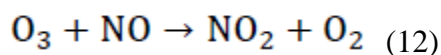
Ceci est suivi de la conversion du NO en NO_2 par réaction avec les radicaux HO_2 ou RO_2 , qui régénère également OH selon les formules (8) et (9). RO_2 représente n'importe laquelle d'un certain nombre de chaînes organiques avec un O_2 attaché.



Le NO_2 est photolysé pour générer de l'oxygène atomique, qui se combine avec l' O_2 pour créer de l' O_3 par la réaction (10) et (11).



Les épisodes d'ozone dans les régions polluées sont généralement dus à la séquence de production d'ozone illustrée ci-dessus. Cependant, la nuit et à proximité immédiate de très grandes émissions de NO, les concentrations d'ozone sont réduites par le processus de titrage des NO_x , selon la formule (12).



Il existe une compétition entre les COV et les NO_x pour le radical OH. À un rapport élevé entre la concentration de COV et de NO_x, OH réagit principalement avec les COV tandis qu'à faible rapport, la réaction de NO_x peut prédominer (Seinfeld and Pandis 2016)

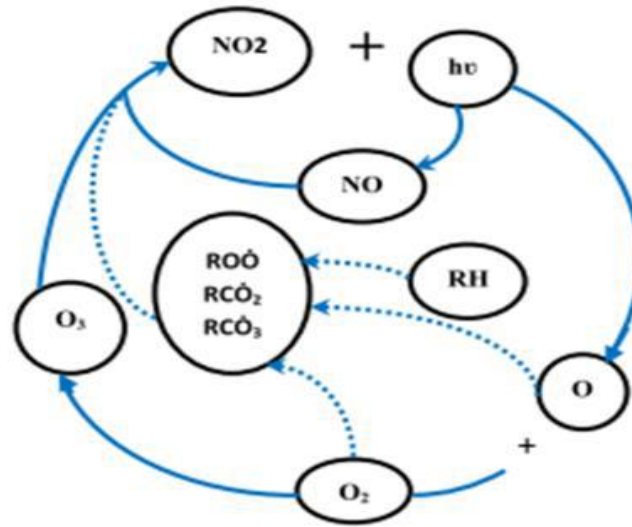


Figure 05 : Cycle photo-dynamique des NO_x en milieu pollué

Les principales conditions favorisant l'apparition de pics ou du smog photochimique d'ozone sont (Wroblewski, Riffault et al. 2007) :

- L'ensoleillement, puisque le rayonnement UV est directement à l'origine de la formation d'ozone ;
- Le trafic routier qui est une importante source de précurseurs chimiques (NO_x et COV) ;
- L'absence de vent, qui empêche la dispersion des polluants primaires et secondaires.

D'autres facteurs interviennent également, parmi lesquelles l'activité industrielle, productrice de COV, ou la température de l'air, avec laquelle augmente la volatilité des COV.

En zones urbaines, la concentration importante en monoxyde d'azote permet d'éliminer efficacement l'ozone formé (Le NO est un puit ou piège de l'ozone : équation 5). Cette réaction intervient surtout la nuit en l'absence de formation d'ozone, mais peut aussi se produire le jour lorsque la concentration en NO est forte et celle en COV faible. Cette situation se produit notamment de manière régulière en début de matinée. A ce moment, la circulation automobile, productrice de NO, est intense et la température de l'air encore peu élevée, ce qui limite la volatilité des COV. En zones urbaines, la concentration en ozone suit donc un rythme diurne et est maximale en milieu d'après-midi et relativement faible la nuit. La représentation graphique de l'évolution diurne de l'ozone suit en général une courbe en forme de cloche (Figure 06).

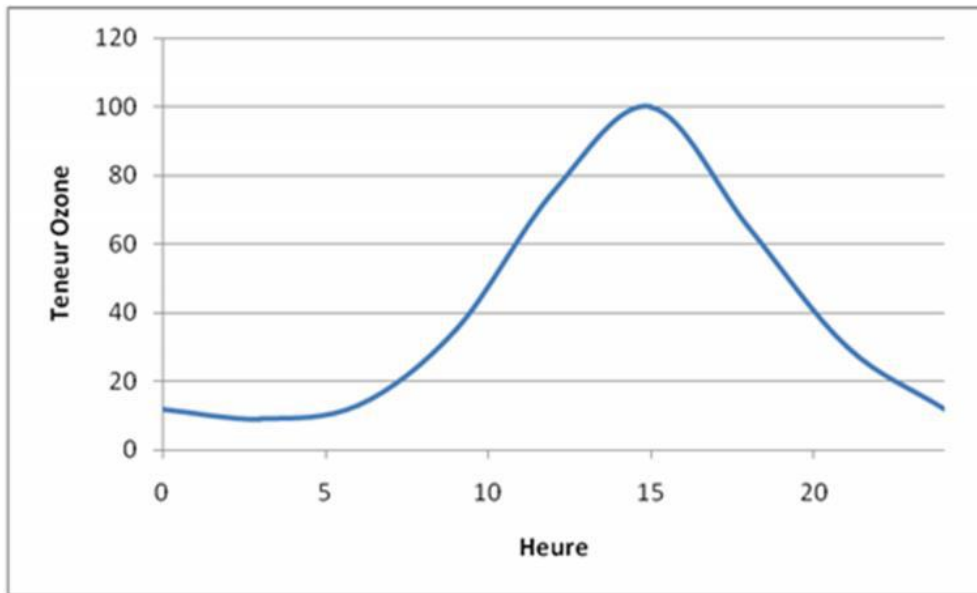


Figure 06 : Evolution diurne de l'ozone en milieu urbain.

Une particularité notable de la pollution photo-oxydante, dont l'ozone est le constituant majeur, est sa répartition géographique (Wroblewski, Riffault et al. 2007) :

- En milieu urbain, à proximité des voies de circulation, les concentrations d'ozone restent généralement modestes car il est consommé par les polluants primaires, en particulier le NO, selon la réaction 5. Ce sont les débits relatifs d'espèces sources et puits qui expliquent la présence ou l'absence d'ozone. Sous l'action des vents, les masses d'air chargées en précurseurs gagnent la périphérie des agglomérations peu ou pas pollués où les "pièges à ozone" (émissions de NO) ne sont pas présents en quantités suffisamment importantes pour le détruire ; Il s'accumule alors et atteint des concentrations élevées formant un épisode d'ozone.
- L'ozone périurbain suit des cycles annuels et journaliers typiques : les teneurs sont faibles en *hiver*, les plus fortes valeurs étant mesurées durant les mois de *juillet et août*. Les plus forts niveaux d'ozone sont atteints à *la mi-journée*, aux *heures d'ensoleillement intense*, les plus faibles la *nuit* (consommation chimique de l'ozone).

I.3 Facteurs météorologiques influençant la dispersion des polluants

Les concentrations et la distribution spatio-temporelle des polluants ne sont pas déterminées que par les sources et les transformations physico-chimiques. Elles le sont aussi par des paramètres physiques qui relèvent de la dynamique atmosphérique (Masclat 2005).

Un épisode de pollution est observé lorsque les émissions de polluants sont importantes et la météo est défavorable. Les conditions météorologique peuvent influencer la dispersion de polluants sont l'absence de vent ou vent faible, la chaleur et lumière, l'absence de pluies et les basses couches d'inversion (Masclat 2005).

I.3.1 Le vent

Le vent tend à disperser la pollution surtout en absence de relief. Plus le vent est fort, plus la pollution se disperse rapidement. En zone montagneuse, si les polluants rencontrent une barrière montagneuse, il n'y a pas dispersion des polluants mais accumulation (Masclat 2005).

I.3.2 La température de l'air

A la base du mouvement de l'air est la température qui a des valeurs différentes à la surface du sol due à des caractéristiques thermiques différentes et à des variations d'emménagement de la chaleur solaire (Barnea 1974).

I.3.3 Les nuages

La présence des nuages à une hauteur proche du sol produit une surface fermée où la dilution des impuretés ne peut pas avoir lieu même dans des conditions satisfaisantes. La répétition de cette opération au cours de l'année augmente le taux de pollution dans les zones couvertes de nuages (Barnea 1974).

I.3.4 Le phénomène d'inversion de la température

Sous l'action de la poussée d'Archimède, les polluants se dispersent verticalement. Il peut se produire un phénomène appelé « inversion de température » qui consiste à piéger une masse d'air froid sous une masse d'air plus chaud. Le sol s'est refroidi d'une façon importante pendant la nuit ; la masse d'air qui se trouve près du sol (plus froide et plus lourde) ne peut alors s'élever et se disperser dans l'atmosphère. La température, à quelques centaines de mètres d'altitude est alors supérieure à celle mesurée au niveau du sol. Les polluants se trouvent bloqués sous un « couvercle » d'air chaud, appelé couche d'inversion. Le phénomène d'inversion peut durer de

quelques heures à plusieurs jours. Un couvercle de pollution se forme et bloque les polluants émis à basse altitude (Buchard, Helfer et al. 2000).

La Figure07 présente les conséquences d'inversion de température.

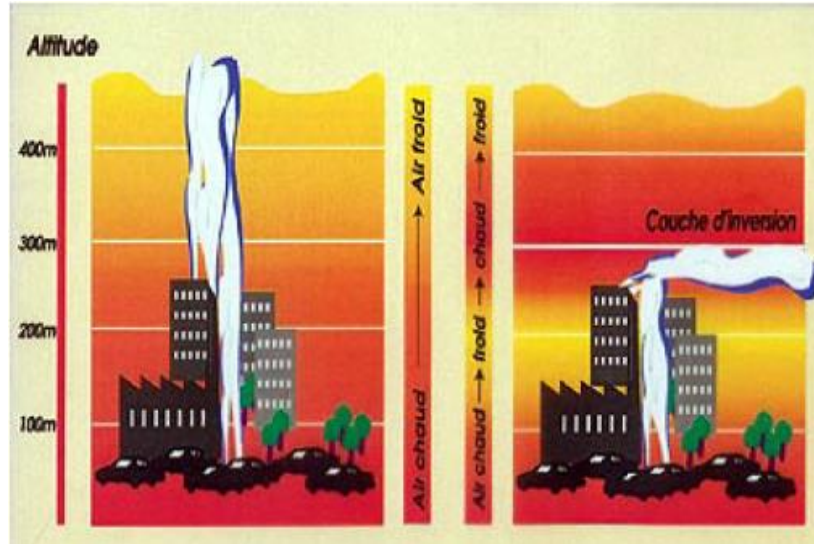


Figure 07 : Conséquence d'inversion de température (BUCHARD, HELFER et al. 2000)

I.4 Effets de l'ozone

I.4.1 Effets sur la santé

L'ozone est un gaz incolore et un oxydant puissant pénétrant facilement jusqu'aux alvéoles pulmonaires. Il provoque, dès une exposition prolongée de 150 à 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, des irritations oculaires, des migraines, de la toux et une altération pulmonaire surtout chez les enfants et les asthmatiques. Les effets sont amplifiés par l'exercice physique (Wroblewski, Riffault et al. 2007).

L'étude des effets sanitaires des polluants atmosphériques est une tâche délicate, car ces effets sont généralement d'origines multiples (non propres à une substance) et les populations sont souvent exposées à des mélanges de polluants (INSPQ 2012). La mise en évidence des effets toxiques d'une substance telle que l'ozone devient ainsi difficile, et les conclusions tirées de ces effets proviennent souvent de la synthèse d'études scientifiques de disciplines multiples (toxicologie, épidémiologie, etc.).

Sur le plan de la toxicologie, les principales voies d'absorption et d'élimination de l'ozone sont respectivement l'inhalation et l'exhalation. Ce gaz, qui a une solubilité modérée, peut pénétrer dans les poumons, atteindre les bronchioles et les alvéoles, et entraîner des dommages par l'oxydation directe des molécules du corps humain ou encore, par la formation de radicaux libres ou d'intermédiaires réactifs dans les voies respiratoires inférieures (INSPQ 2012).

Par ailleurs, les études épidémiologiques suggèrent qu'il existe une relation entre l'exposition à l'ozone à court terme (un à quelques jours) et certains effets respiratoires – dont la diminution des fonctions pulmonaires - et l'augmentation de l'inflammation des poumons, de la perméabilité pulmonaire, de l'hyperréactivité des voies respiratoires ainsi que des visites aux urgences et des hospitalisations attribuables à des problèmes respiratoires. Une association probable est aussi suggérée avec la mortalité, et les connaissances scientifiques montrent aussi une possible association avec des effets cardiovasculaires et neurologiques (U.S. EPA 2006).

En ce qui concerne l'exposition à long terme, les évidences épidémiologiques suggèrent un possible lien avec des morbidités respiratoires, telles l'émergence de nouveaux cas d'asthme et l'accentuation des symptômes respiratoires chez les asthmatiques. Les études font aussi état d'une possible relation avec des effets cardiovasculaires et neurologiques, des effets toxiques sur la reproduction et sur le développement de même qu'avec une mortalité toutes causes confondues (U.S. EPA 2006).

Ainsi, les effets d'une exposition à l'ozone sont très variés. Toutefois, leur ampleur pourrait dépendre non seulement de différents paramètres associés à l'exposition, telle la concentration, la durée et la co-exposition à d'autres facteurs environnementaux (ex. : la chaleur), mais également de paramètres individuels, dont l'intensité de l'exercice physique pratiqué au moment de l'exposition ou encore les susceptibilités individuelles (ex : prédispositions génétiques, condition physique, âge, sexe). Les enfants, les asthmatiques et les personnes travaillant à l'extérieur seraient parmi les individus les plus vulnérables aux effets de l'ozone (U.S. EPA 2006).

I.4.2 Effets sur l'environnement

Les végétaux semblent particulièrement sensibles aux concentrations d'ozone. Il a été démontré que l'influence des concentrations d'ozone varie selon les espèces. Certains végétaux très

sensibles, comme les *plants de tabac*, sont utilisés comme *indicateurs* de la pollution photochimique. De façon générale, l'ozone agit défavorablement sur le développement des végétaux en altérant le mécanisme photosynthétique et en provoquant des nécroses foliaires (Airparif 2017).

L'ozone exerce différents effets sur les végétaux :

❖ **Au niveau macroscopique**

Les symptômes foliaires furent les premiers témoignages de l'effet de l'O₃ sur les plantes (Haagen-Smit, Darley et al. 1952). Ils peuvent se traduire par des taches chlorotiques ou nécrotiques réparties sur les feuilles, résultant de la dégradation des chlorophylles.

Les lésions provoquées par l'ozone sur la végétation sont régulièrement observées aux États-Unis, en Europe, au Canada, au Mexique, en Egypte, en Inde et à Taiwan (Ashmore 2005). En Europe, les niveaux ambiants d'ozone sont suffisamment élevés pour causer des effets visibles chez les espèces natives et des cultures irriguées. En France, des nécroses visibles causées par l'ozone sont observées sur les feuilles et les aiguilles d'arbres forestiers mais également sur de nombreux végétaux des milieux naturels (Garrec and Delzenne-Van Haluwyn 2002).

❖ **Au niveau microscopique**

Il s'agit de la possibilité d'existence d'une lésion invisible, c'est-à-dire altération des fonctions d'une plante sans apparition des lésions sur les feuilles ni sur les autres parties de la plante (Felzer, Cronin et al. 2007).

L'ozone modifie différents processus physiologiques en causant :

- La diminution du rendement agricole et accélère le vieillissement des plantes (Bagard, Le Thiec et al. 2008) ;
- Le stress oxydatif et altération cellulaire (Castagna and Ranieri 2009) ;
- L'apparition de dommages foliaires (Ashmore 2005) ;
- Une baisse de la photosynthèse (Castagna and Ranieri 2009) ;
- Une baisse de la croissance de la plante (Britz and Robinson 2001) ;
- Une diminution des rendements (Fiscus, Booker et al. 2005) ; (Wittig, Ainsworth et al. 2007) ; (Feng and Kobayashi 2009).

I.5 Réglementation relative à l'ozone

De par ses nuisances, l'ozone est un polluant réglementé. Les principales normes réglementant les expositions à l'ozone sont données dans le tableau 01.

Tableau 01 : Normes règlementant les expositions à l'ozone

Pays ou Organisme	Normes	Observation		Référence
OMS	50 ppb ($100\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur 8 h 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 1 h	Seuil de protection pour la santé		(Santé) 2017)
	100 ppb ($200\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur 1 h 32.5 ppb ($65\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur 24 h	Seuil de protection de la végétation		
Union Européenne	60 ppb ($120\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur 8 h plus de 25 jours par an (moyenne calculée sur 3 ans)	Seuil d'information	Seuil protection de la santé	(Airparif 2017)
	60 ppb ($120\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur 8 h	Objectif à long terme		
	AOT40 de Mai à Juillet (8h-20h) : 3000ppb ($6000\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur 1 h	Seuil de protection de la végétation		
Algérie	55 ppb ($110\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur 8 h 80 ppb ($160\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur 1 h	Seuil de protection de la santé		(JORA 2006)
	90 ppb ($180\mu\text{g}/\text{m}^3$) 180 ppb ($360\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Seuils d'information Seuils d'alerte		
	32.5 ppb ($65\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur 24 h 100 ppb ($200\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur 1 h	Seuil de protection pour la végétation		

Le seuil sur la durée 8 heures de protection de la santé est pratiquement le même pour toutes les normes (100 à $120\mu\text{g}/\text{m}^3$).

I.6 Techniques de prélèvement dans l'air ambiant de l'ozone

Les deux principales techniques de prélèvement de l'ozone sont :

- Prélèvement réalisé de façon automatique (prélèvement actif) à l'entrée d'un système analytique (analyseur d'O₃) ;
- Piégeage des composés de l'air à échantillonner sur support solide (cartouche d'adsorbant) par diffusion (prélèvement passif)

I.6.1 Prélèvement actif (automatique)

Le principe de mesure d'ozone se fait à partir d'une lampe UV de haute énergie, un rayonnement traverse alternativement deux chambres de réaction. Celles-ci sont traversées par l'échantillon gazeux, alternativement contenant l'ozone et filtré de tout ozone. La présence d'ozone dans une des chambres de réaction entraîne une diminution de l'intensité lumineuse du rayonnement UV. Cette intensité lumineuse est mesurée à l'aide de deux photomultiplicateurs à l'extrémité des chambres de réaction. Une double chambre de réaction permet d'assurer une correction en cas de modification éventuelle de l'intensité lumineuse (Masclat 2005).

La méthode consiste à utiliser un analyseur qui dose l'ozone par absorption UV. L'échantillon d'air, prélevé en continu par une pompe placée en fin de circuit, traverse préalablement un filtre poussière, puis est dirigé vers une chambre optique où les molécules d'ozone absorbent sélectivement le rayonnement UV centré sur une longueur d'onde de 254nm. La mesure de la concentration d'ozone est effectuée par différence entre l'absorption UV due à l'échantillon gazeux et celle due à l'échantillon exempt d'ozone. Le minimum détectable est inférieur à 1ppb. Le débit de prélèvement est de 1,5 l/min. C'est sur la base d'un tel analyseur (Figure 08) qu'est mesuré l'ozone dans les réseaux de surveillance.

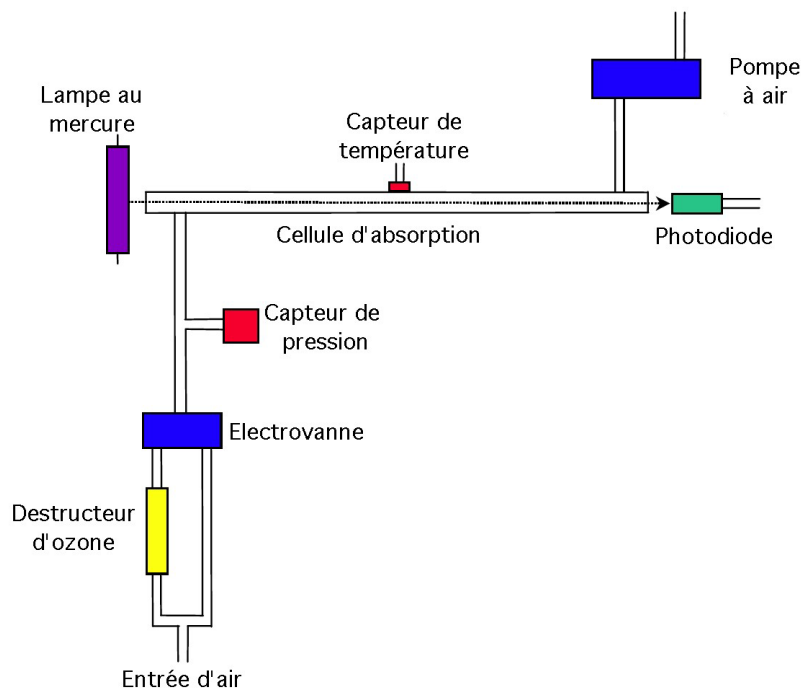


Figure 08 : Analyseur d'ozone par absorption UV (TwoBeTehnologies 2005)

I.6.2 Prélèvement passif

L'échantillonnage passif est basé sur le principe du piégeage d'un polluant sur un support à un débit d'échantillonnage constant contrôlé par la diffusion moléculaire.

L'ozone peut être mesuré par échantillonnage passif, par tube de Palmes (diffusion axiale, exposition longue d'au moins 1 semaine) ou plus généralement par tube Radiello (diffusion radiale, exposition courte). Les analyses peuvent être menées par colorimétrie (très répétable) ou HPLC (plus sensible, moins répétable) (Fondazione Salvatoremaugeri-Irccs 2004).

Les principales caractéristiques du tube Radiello sont illustrées en figure 09.

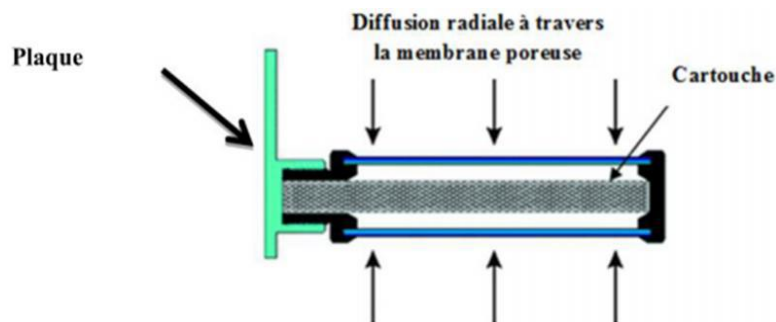


Figure 09 : Modèle de diffusion sur un échantillonneur passif

La méthode de mesure repose sur le principe de la diffusion moléculaire régie par la loi de Fick. Pour ce type d'échantillonneur, la diffusion des composés se fait sur toute la circonférence du tube et sur toute sa longueur d'une façon radiale. Le tube est adapté à des durées variables de prélèvement variant entre 8 heures et 7 jours pour des niveaux de concentration rencontrés dans l'air ambiant (ppb) grâce à son débit d'échantillonnage élevé de plusieurs dizaines de ml/min.

Au cours de l'échantillonnage, un gradient de concentration va s'établir entre l'air entourant le tube et la surface de piégeage de la cartouche. Les composés vont diffuser naturellement à travers la membrane poreuse de la zone la plus concentrée en composés (air ambiant) vers la surface de l'adsorbant où ils sont captés et accumulés. Les caractéristiques de la membrane (porosité et épaisseur) vont conditionner le flux de composés arrivant sur l'adsorbant.

En effet, le parcours de diffusion des composés dépendra de l'épaisseur de la membrane et de sa porosité, ce qui entrainera des débits d'échantillonnage pour les composés visés plus ou moins élevés. Elle a également comme fonction de limiter l'effet du vent sur l'échantillonnage en imposant un parcours de diffusion "tortueux" (à travers les pores de la membrane) qui entrainerait une sensibilité réduite aux mouvements de l'air se produisant sur la surface externe de la membrane.

Le tube Radiello est vissé sur une plaque d'appui pour la phase d'exposition dans l'air ambiant. Le tube Radiello est un échantillonneur passif à diffusion radiale. Sa surface de contact avec l'air est de 360° sur toute la longueur de l'échantillonneur (Fondazione Salvatoremaugeri-Irccs 2004).

a) Paramètres influençant le débit d'échantillonnage passif

Le débit d'échantillonnage passif peut être influencé par plusieurs facteurs: la concentration en polluant dans l'air, la température, la pression, l'humidité, la vitesse du vent et la durée d'exposition (Fondazione Salvatoremaugeri-Irccs 2004).

- **Influence de la vitesse du vent**

Le mouvement de l'air peut affecter le transfert de masse du polluant lors de la diffusion de deux façons :

- si le vent est faible, une zone pauvre en polluant va apparaître à l'entrée de l'échantillonneur provoquant un rallongement du parcours de diffusion. Ceci aura pour effet de sous-estimer la concentration.

- si le vent est important à l'entrée du capteur, il se crée de la turbulence qui va raccourcir la longueur de diffusion. Ce processus va accélérer le transfert de masse et créer ainsi une surestimation de la concentration.

- **Influence de la durée d'exposition**

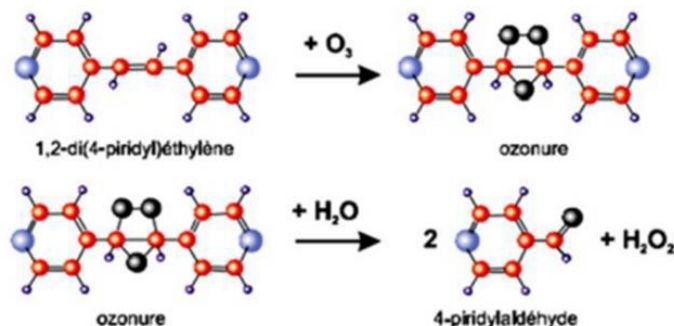
Le débit d'échantillonnage peut dépendre de la durée d'exposition. En effet, plus la durée de prélèvement est longue, plus la masse de composé adsorbée est importante et plus les sites d'adsorption du matériau vont être occupés. Or, il y a un seuil au-delà duquel une saturation à la surface de la cartouche est atteinte. En conséquence, la totalité des molécules arrivant sur la surface adsorbante n'est plus piégée et le débit d'échantillonnage diminue.

- **Influence de l'humidité relative**

La rétention de l'eau sur l'adsorbant peut entraîner une diminution de la capacité d'adsorption. Cette diminution est liée à la nature de l'adsorbant.

b) Prélèvement passif et analyse de l'ozone

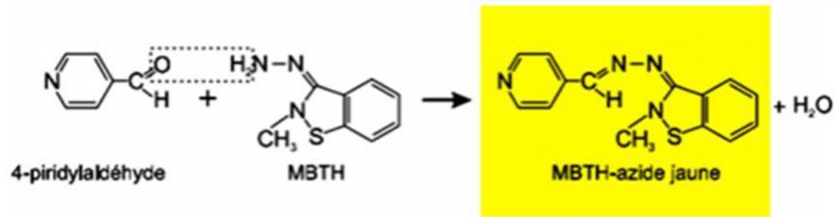
Pour l'étude de l'ozone, les tubes Radiello utilisent une substance absorbante qui est du gel de silice revêtu de 4,4'-dipiridyléthylène contenu dans un tube en polyéthylène microporeux, enfermé au bout par un bouchon PTFE. Pendant l'exposition, l'ozonolyse en milieu acide du 4,4'-dipiridyléthylène produit du 4-piridylaldéhyde selon le schéma réactionnel suivant :



La présence constante d'eau, qui est nécessaire à la réaction, est assurée par le gel de silice.

Après l'exposition, on fait réagir le 4-piridylaldéhyde formé lors de l'échantillonnage avec le

3-méthyl-4-benzothiazolinone hydrazone (MTBH) qui donne l'azide correspondant, coloré en jaune, dont l'absorbance est mesurée par spectrophotométrie à 430 nm.



La production du 4-pyridylaldéhyde est spécifique de l'ozone : n'interfèrent ni les oxydes d'azote ni les composés organiques, y inclus les aldéhydes (Fondazione Salvatoremaugeri-Irccs 2004).

La durée d'exposition des tubes Radiello peut aller de quelques heures à 7 jours. Cette technique qui présente une limite de détection de quelques ppb est suffisante pour détecter même les faibles teneurs d'ozone naturel. Le suivi de l'ozone par cette méthode d'échantillonnage passif est de plus en plus utilisé pour élaborer une cartographie de la pollution sur de vastes zones.

I.7 Notions de cartographie de la pollution

Le phénomène de dispersion ou d'accumulation de la pollution par l'ozone troposphérique dans une région donnée peut être étudié par une analyse géostatistique qui aboutit à une cartographie de la pollution. La géostatistique est une approche qui caractérise la structure de la variabilité spatiale de toute propriété et son estimation s'avère très appropriée pour cartographier un phénomène naturel (Droesbeke, Lejeune et al. 2006). Elle comporte deux phases (Douaoui 2005):

1. La première est l'analyse spatiale de la variable d'étude à travers le variogramme: La caractérisation des structures de la variabilité spatiale ou de l'analyse structurelle est la première étape nécessaire à toute étude géostatistique.
2. La seconde est l'utilisation d'une technique de prédiction spatiale utilisant comme outil le krigeage. Le krigeage est une technique de prédiction prenant en compte les informations fournies par le variogramme, et est également une méthode d'interpolation spatiale probabiliste ; elle est probabiliste dans la mesure où il considère que le champ spatial de la variable est une réalisation d'une fonction aléatoire.

Le Kriging est une technique d'interpolation développée depuis les années 50 par le géologue sud-africain Krige, mais ce n'est que dans les années 60 que Matheron et l'équipe de l'Ecole des Mines de Paris ont formulé la théorie des variables régionalisées, d'où le nom de Géostatistique (Droesbeke, Lejeune et al. 2006). La cartographie est explorée par l'application d'une forme particulière de krigeage. La cartographie constitue le moyen le plus approprié pour une bonne représentation spatiale de la pollution.

Pour cette analyse géostatistique, il existe des logiciels qui permettent de créer la carte de distribution de la pollution, dans notre cas de l'ozone, dans la zone d'étude. Ces logiciels nécessitent généralement une grille de données (x, y, z) régulièrement espacées pour pouvoir générer des lignes d'iso-concentration. Celles-ci sont calculées par un algorithme d'interpolation de la base de données de coordonnées Lambert des sites $(x$ et $y)$ et des concentrations de composés étudiées pour z . Pour un nombre de points inférieur à 250, la méthode de calcul par interpolation "krigeage" est souvent recommandée. Pour une carte plus réaliste, le logiciel recherche le meilleur variogramme.

CHAPITRE II.
Matériels et méthodes

II.1 Description du site d'étude et campagnes de prélèvement

L'étude a été réalisée sur une zone couvrant en moyenne cinquante sites de mesure répartis sur toutes les communes de la Wilaya d'Alger. Ces communes se caractérisent par une forte urbanisation et une longueur totale de route d'environ 500 km soit une densité de route d'environ 3km/km². La zone de la wilaya d'Alger connaît un trafic routier important le long de la semaine.

Tous les échantillons sur les cinquante sites d'échantillonnage ont été installés dans (des établissements scolaires) par mesure de sécurité pour éviter tout acte de vandalisme.

Le tableau 02 résume la répartition de la population et la densité de population pour les communes étudiées.

Tableau 02 : Densité de population par commune (ONS 2011)

Codes	Communes	Densité population (hab/km ²)	x	y
1	Souidania	1140,333	491933,00	4062608,00
2	Mehalema	593,086	488764,00	4059379,00
3	Zeralda	1718,400	486283,00	4063341,00
4	Staouéli	2166,545	490262,00	4067849,00
5	Dely Brahim	4563,472	498898,00	4068401,00
6	Cheraga	2245,111	495834,00	4068550,00
7	Beni Messous	4575,348	498182,00	4070720,00
8	Bouzaréah	6736,093	502940,00	4072388,00
9	El Biar	11600,980	503284,00	4068372,00
10	Alger centre	20416,486	505106,00	4069543,00
11	Bab El Oued	53497,521	504717,00	4071909,00
12	Bologhine	15882,246	503684,00	4073292,00
13	Hammamet	2809,133	497788,00	4074082,00
14	Madania	18571,889	505434,00	4066588,00
15	Baraki	3619,751	508940,00	4057424,00
16	Sidi Moussa	941,761	507819,00	4051453,00

CHAPITRE II. Matériels et méthodes

17	Eucalyptus	3829,387	514509,00	4059463,00
18	Gué de Constantine	9164,168	507961,00	4061548,00
19	Bachedjerah	30768,000	510150,00	4064054,00
20	Kouba	10418,706	506646,00	4064965,00
21	Birkhadem	8745,669	503000,00	4063330,00
22	Saoula	1667,600	502207,00	4062640,00
23	Birtouta	1131,988	499174,00	4055999,00
24	Ouled Chebel	682,799	500166,00	4049519,00
25	Tessala El Merdja	772,647	495341,00	4054311,00
26	Douéra	1390,195	494797,00	4057851,00
27	Ouled Fayet	1103,720	495286,00	4063749,00
28	El Achour	3422,500	499610,00	4065155,00
29	Baba Hacéne	2159,636	498573,00	4060572,00
30	Bordj El Kiffan	7002,304	516615,00	4066803,00
31	Bordj El Bahri	7060,963	523445,00	4071212,00
32	Ain Taya	3612,670	525184,00	4072168,00
33	Heraoua	2222,984	526682,00	4069120,00
34	Reghaia	3135,853	530524,00	4066599,00
35	Rouiba	1506,294	525616,00	4066219,00
36	Dar El Beida	2404,115	518696,00	4063579,00
37	Mohammadia	7827,660	512985,00	4065109,00
38	El Harrach	5187,792	513579,00	4064222,00
39	Bab Ezzouar	11737,181	515548,00	4063717,00
40	El Marsa	3118,557	521421,00	4073425,00
41	Khraicia	1395,500	498684,00	4058863,00
42	Megharia	20033,758	509512,00	4065300,00
43	Hussein Dey	9553,521	508801,00	4065590,00
44	Belouizdad	20393,519	507055,00	4066752,00
45	Rai Hamidou	5759,312	500783,00	4074620,00
46	Ain Bénian	4272,125	492803,00	4072899,00
47	Ben Aknoun	4918,538	501395,00	4067750,00
48	Draria	3152,929	500526,00	4062461,00
49	Rahmania	821,778	493345,00	4060051,00

Quatre campagnes d'échantillonnage hebdomadaire donnant 177 prélèvements dans des sites urbains et suburbains de la Wilaya d'Alger, ont été menées, reposant sur l'utilisation de tubes à diffusion passive Radiello au cours de la période 2012-2013.

La figure 10 illustre sur la carte d'Alger, la localisation de l'ensemble des sites étudiés.

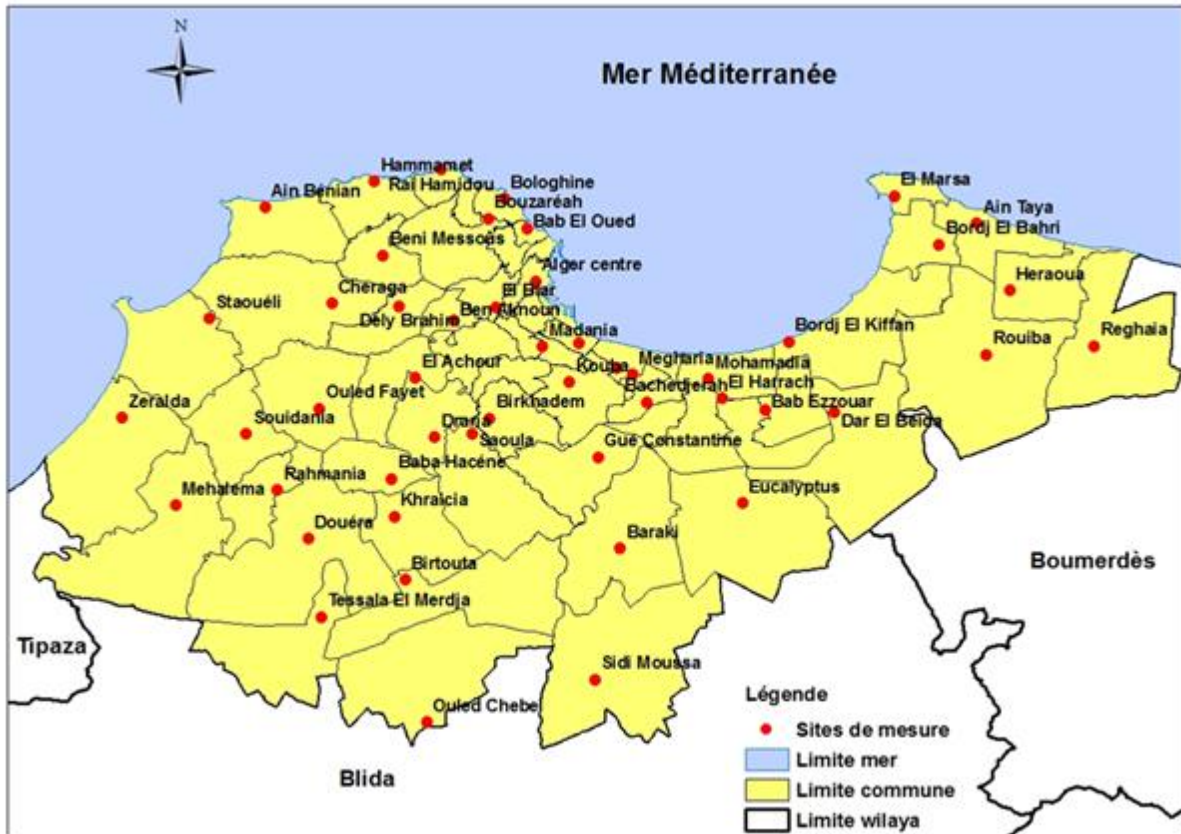


Figure 10 : Localisation des sites d'échantillonnage

La répartition des campagnes d'échantillonnage s'est faite comme suite :

- Une première campagne était programmée de février à mars 2012 (saison hivernale) ;
- Une deuxième en juillet 2012 (saison estivale) ;
- Une troisième de juin à juillet 2013 (saison estivale) ;
- Une quatrième en septembre 2013 (saison estivale).

Les échantillonnages ont été effectués en bordure de route et en site de fond. La majorité des sites d'échantillonnage sont de type suburbain et urbain. Afin de mieux, comparez nos résultats (moyennes hebdomadaires) avec la norme de l'OMS de 8h. Une étude des quantités massiques moyennes d'ozone collectées sur des tubes passifs Radiello a été réalisée au cours de trois campagnes d'échantillonnage du 12 juillet au 13 août 2015 au niveau de l'Ecole Nationale

Polytechnique Nous avons ainsi réalisé 7 prélèvements sur 8 heures, 2 prélèvements sur 24 heures et deux prélèvements sur 7 jours

Les enregistrements des données météorologiques, pendant les périodes d'échantillonnage ont été obtenus de l'Office National de Météorologie d'Alger (ONM 2013) et du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER 2013). Ces données ont ensuite été extraites correspondant à chaque période d'échantillonnage.

La rose des vents et la répartition fréquentielle du vent de la station de Dar el Beida sont présentées en tableau 3. La figure 11 illustre la localisation des stations de mesure du réseau de surveillance de la qualité de l'air SAMASAFIA et de la station météo de Dar El Beida.

Tableau 03 : Répartition fréquentielle du vent sur 16 directions et 04 classes de vitesse (en%)

Station : DAR-EL-BEIDA (Altitude : 25 m / Latitude : 36°41 N / Longitude : 03°13 E)
Période : 1990– 2010

ANNUEL					
Direction en °	Classes de Vitesse (m/s)				Total (%)
	1.0 - 3.0	3.0 - 5.0	5.0 - 7.0	>= 7.0	
N	1	2	1	0	4
NNE	1	2	1	0	4
NE	1	2	2	1	6
ENE	1	2	2	1	6
E	1	1	1	0	3
ESE	0	0	0	0	0
SE	0	0	0	0	0
SSE	0	0	0	0	1
S	0	1	0	0	2
SSW	1	1	0	0	2
SW	1	2	1	0	4
WSW	1	3	2	1	7
W	1	3	3	2	9
WNW	0	1	0	1	2
NW	0	1	1	1	2
NNW	0	2	2	1	4
Calme					46
Total	8	22	15	10	100

CHAPITRE II. Matériels et méthodes

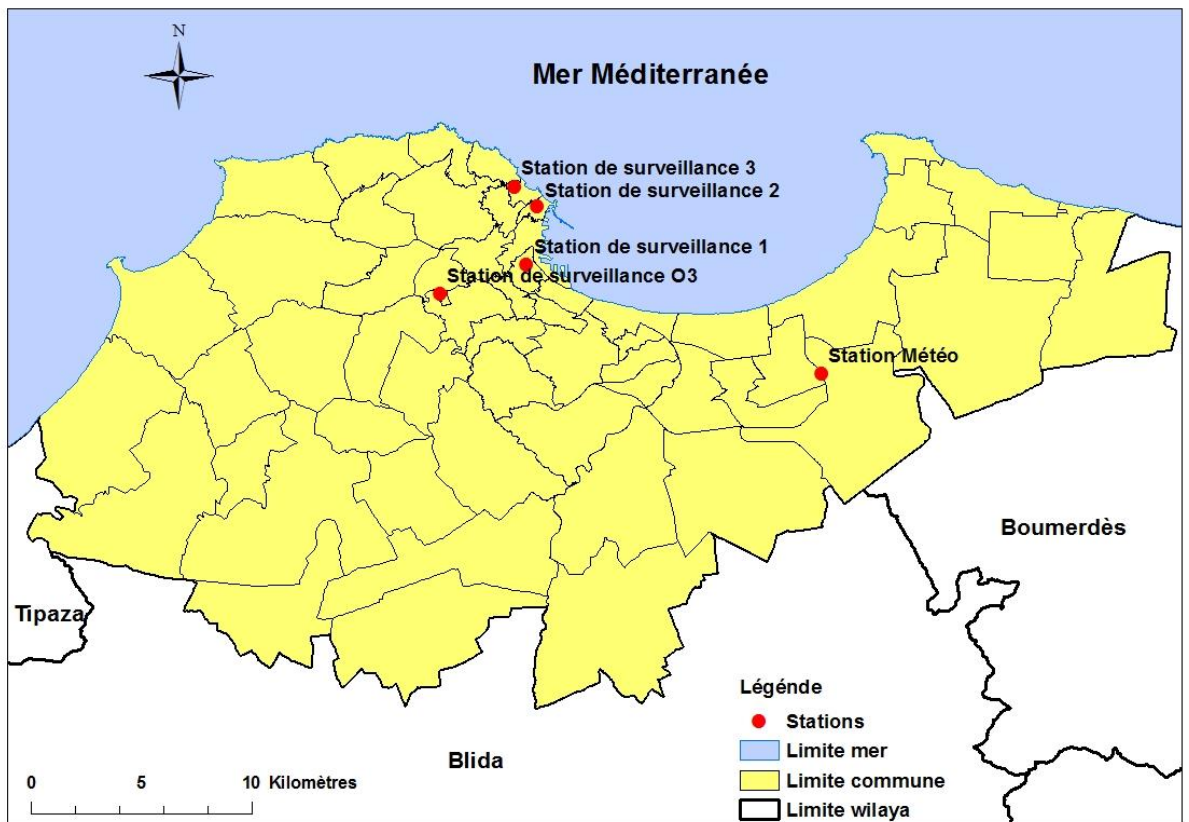
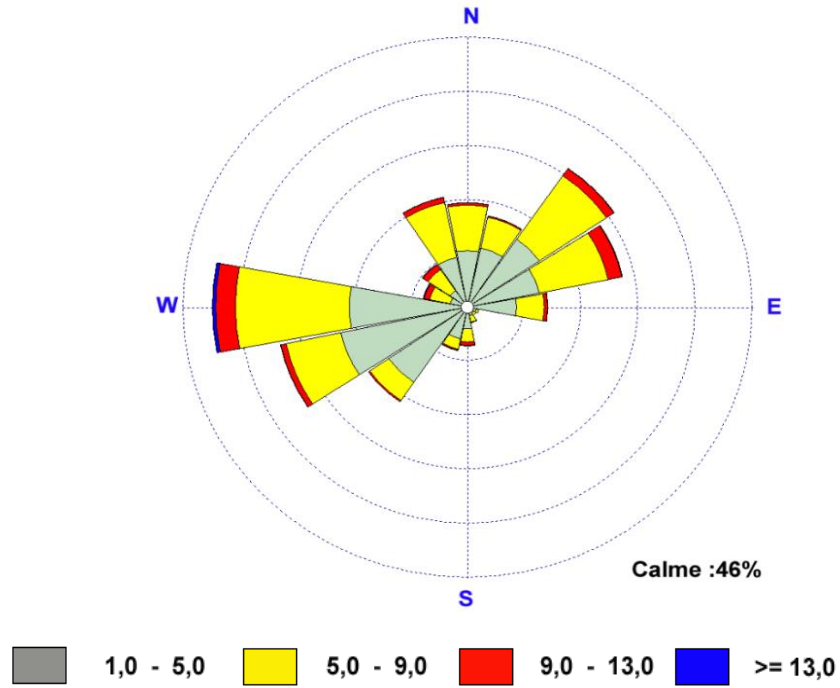


Figure 11 : Localisation des stations de mesure du réseau Samasafia et de la station météo

II.2 Méthodologie expérimentale

II.2.1 Mode d'échantillonnage

Les prélèvements sont effectués sur des tubes passifs de type «Radiello» de la firme Fondazione Salvatore Maugeri, Padova, Italie. L'efficacité de ces capteurs a été démontrée par plusieurs études (Derwent, Jenkin et al. 2001) ; (Derwent, Jenkin et al. 1998) ; (Masclat 2005). Ces derniers sont constitués de deux tubes cylindriques concentriques (Figure 12) :

- Un tube externe en polyéthylène microporeux, appelé membrane diffusive, au travers duquel diffusent les composés gazeux. Ce tube externe faisant office de filtre en arrêtant les poussières et autres impuretés.
- Un tube interne (cartouche) réalisé avec un tamis cylindrique en acier inoxydable de 5,8 mm de diamètre à la maille 100 mesh, rempli avec 530±30mg de charbon actif 35-50 mesh. Cette cartouche d'adsorption est remplie de gel de silice recouvert de 4,4'-dipyridyléthylène et fermée à une extrémité par un capuchon en PTFE.

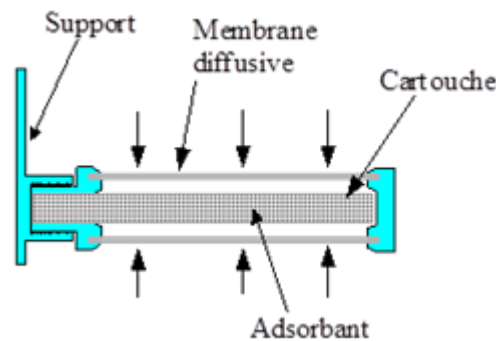


Figure 12 : Principe du tube passif radial

Avant prélèvement, la préparation des tubes Radiello suit les étapes suivantes :

- 1- La cartouche est introduite dans le corps diffusif
- 2- Le corps diffusif est vissé à la plaque du support
- 3- Une étiquette est fixée sur la poche du support pour l'inscription de différentes informations (Numéro du site, date du début d'échantillonnage)
- 4- Les supports sont placés dans une boîte de protection. Après fixation du boîtier sur site, l'échantillonnage peut commencer.
- 5- L'échantillonnage terminé, la cartouche est récupérée et mise dans son tube d'origine, puis acheminée vers le laboratoire pour analyse (Photos 1 à 6 sur la figure 13)

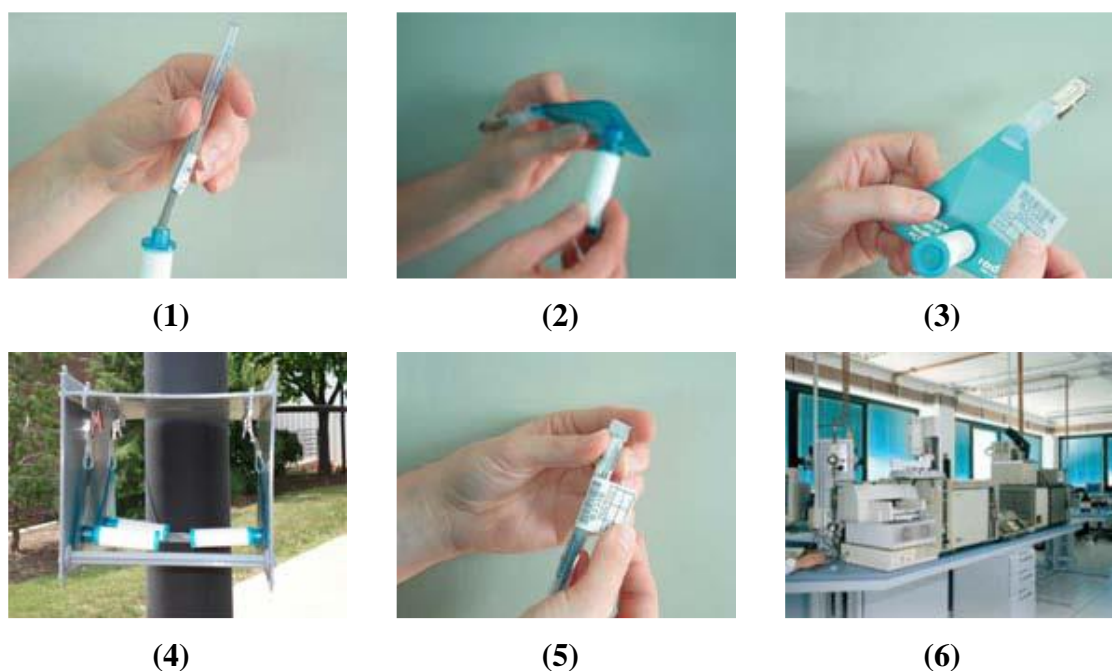


Figure 13 : Etapes de l'utilisation d'un tube Radiello.

Pour l'échantillonnage, les tubes diffusifs ainsi préparés sont exposés à l'air ambiant en chaque site d'échantillonnage pendant une semaine et ce pour chaque campagne de mesure. A cet effet, Les tubes Radiello sont fixés à des supports (Poteaux) à environ 3 m d'altitude. Il y a eu très peu de pertes de tubes par vol ou vandalisme.

Les cartouches de diffusion sont conservées au réfrigérateur à 4°C avant et après l'échantillonnage jusqu'au traitement de l'échantillon. Trois cartouches vierges servant de blanc sont conservées dans les mêmes conditions.

II.2.2 Analyse des échantillons

L'analyse des prélèvements suit le protocole indiqué par le constructeur des tubes Radiello (Fondazione Salvatoremaugeri-Irccs 2004). Le matériel et les réactifs utilisés dans la méthodologie décrite ci-dessous sont pratiquement les mêmes pour toutes les campagnes d'échantillonnages et d'analyses. Dans le cas d'utilisation d'une autre technique, un descriptif sera ajouté.

➤ **Réactifs utilisés :**

- 3-méthyl-2-benzothiazolinone hydrazonchlorure MBTH ;
- 4-piridylaldéhyde (PA) ;
- Filtre microporeux 0,45 µm de marque Millipore ;
- Acide sulfurique concentré (H₂SO₄).

➤ **Préparation de la solution de MBTH**

On pèse 5 g de MBTH qu'on verse dans une fiole de 1 litre, on complète à 1 litre avec de l'eau déminéralisée et 5 ml d'acide sulfurique concentré.

➤ **Dosage spectrophotométrique des échantillons :**

Le 4-pyridylcarboxaldéhyde formé lors du prélèvement est quantifié par spectrométrie d'absorption UV/Visible, après réaction spécifique avec la 3-Méthyl-2-BenzoThiazolinone Hydrazone (MBTH).

La procédure consiste à ôter la cartouche de son tube plastique et à en transférer le contenu de ce dernier dans le même tube plastique. Pour l'extraction, on introduit ensuite dans le tube 5 ml de la solution de MTBH, on ferme le tube et le secoue. On laisse reposer pendant une heure en agitant de temps en temps. Le mélange est filtré sur un filtre microporeux 0,45 µm dans un second tube. L'absorbance UV/visible à 430 nm de la solution filtrée est mesurée par comparaison avec de l'eau distillée sur un spectrophotomètre UV-visible de type SHIMADZU mini 1240. La couleur de la solution gardée dans le tube bien enfermé est stable pendant plusieurs jours.

Les cartouches servant de blanc sont traitées dans les mêmes conditions.

➤ **Courbe d'étalonnage**

La courbe d'étalonnage est préparée en dissolvant 100 µl (112,2 mg à 20 °C) de 4-piridylaldéhyde dans 1L d'eau distillée. Par dilution, on réalise des solutions étalons dans des rapports de 1/2, 1/5, 1/10, etc. Dans des tubes contenant 4,5 ml de solution de MBTH, on ajoute alors 0,5 ml de chacune des solutions étalons de 4-piridylaldéhyde dilué. On laisse reposer pendant une heure en agitant de temps en temps.

Comme pour les prélèvements, la densité optique est mesurée à 430 nm sur un appareil UV-visible de type SHIMADZU mini 1240.

En tenant compte de l'équivalence 1 µg de 4-piridylaldéhyde correspond à 0,224 µg d'O₃, on trace la droite d'étalonnage de O₃ (Densité optique en fonction de la masse d'ozone). La figure 14 représente la droite d'étalonnage ainsi obtenue.

La lecture moyenne des tubes à blanc pour chaque semaine d'échantillonnage a été soustraite de la lecture des tubes exposés. La limite de détection de l'échantillonneur Radiello est de 2 µg m⁻³ pour une exposition de 7 jours. L'incertitude à 2σ est de 14,5% sur toute la plage de linéarité du taux d'échantillonnage.

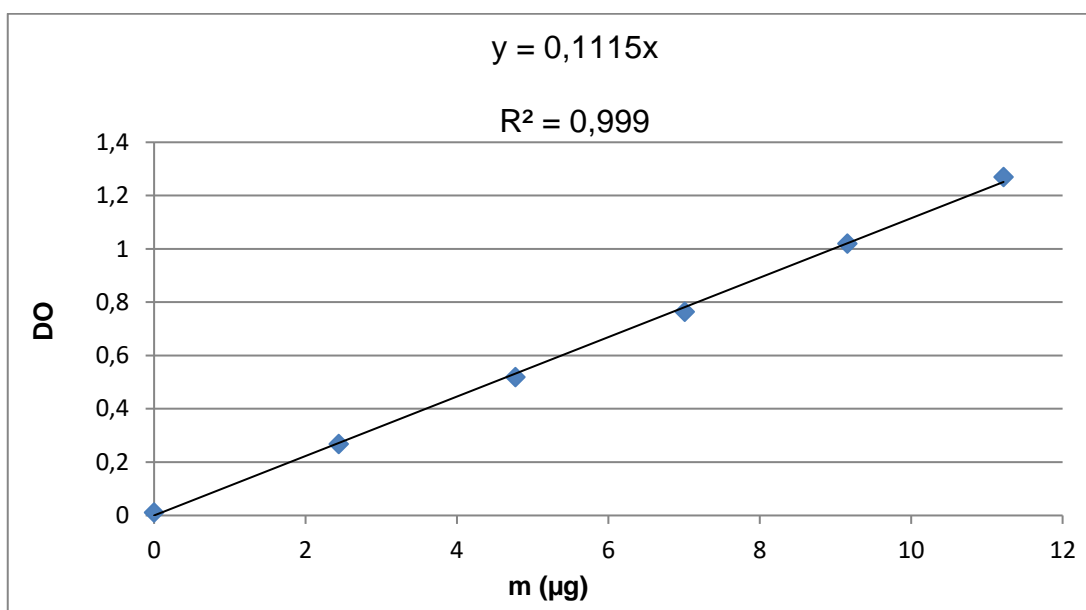


Figure 14 : Courbe d'étalonnage de l'ozone

La courbe obtenue ($R^2 = 0,999$) est une droite d'équation $DO = K \cdot C$ avec $K = 0,1115$

II.2.3 Calcul des teneurs atmosphériques

La teneur atmosphérique moyenne C [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] de l'ozone est calculée par l'équation suivante (Fondazione Salvatoremaugeri-Irccs 2004) :

$$C [\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] = \frac{m [\mu\text{g}]}{24,6 \cdot t [\text{min}]} \cdot 1.000.000$$

Où :

m : est la masse piégée de O₃ en µg ;

t : est le temps d'exposition en minutes.

La valeur du débit de piégeage est **24,6 ml·min⁻¹** (Fondazione Salvatoremaugeri-Irccs 2004).
 La correction du débit de piégeage avec la température en Kelvin (K) par rapport à la valeur mesurée à 298 K est donné par (Fondazione Salvatoremaugeri-Irccs 2004) :

$$Q_K = Q_{298} \left(\frac{K}{298} \right)^{1,5}$$

Où : **Q_K** est la valeur du débit à la température K et **Q₂₉₈** est celle correspondant à la température de référence de 298 K. Cela signifie que le débit change de ±5% pour tous 10 °C en plus ou en moins de 25 °C.

Le débit de piégeage ne change pas avec l'humidité dans l'intervalle 15-90% et avec la vitesse de l'air dans l'intervalle 0,1 et 10 m·s⁻¹.

II.3 Géostatistique et modélisation

L'évolution spatiale de la pollution par l'ozone troposphérique dans la ville d'Alger peut être illustrée par une analyse géostatistique qui donne la cartographie de la pollution. Celle-ci est explorée par l'application d'une forme particulière de krigeage, à savoir le krigeage ordinaire. Pour cette analyse géostatistique, nous avons utilisé ArcGIS version 10, un logiciel permettant de créer la carte de distribution de l'ozone dans la zone d'étude. Ce logiciel nécessite une grille de données (x, y, z) régulièrement espacées pour pouvoir générer des lignes d'iso-concentration. Celles-ci sont calculées par un algorithme d'interpolation de la base de données de coordonnées de Lambert des sites (x et y) et des concentrations de composés étudiées pour z. Pour un nombre de points inférieur à 250, la méthode de calcul par interpolation "krigeage" est souvent recommandée. Pour une carte plus réaliste, le logiciel recherche le meilleur variogramme.

La procédure de krigeage dépend de la structure spatiale locale du processus photochimique de la formation d'ozone et devrait être capable de s'adapter aux tendances des données. Les objectifs sont donc :

- Elaborer la cartographie de la teneur moyenne d'ozone dans la ville d'Alger ;
- Evaluer l'utilisation du krigeage ordinaire par la cartographie de l'écart-type de la moyenne O₃.

Un rappel théorique sur l'analyse géostatistique est présenté en Annexe 01.

En outre, le modèle de la grille photochimique (ENVIRON, 2010) pour le domaine algérien est appliqué à l'aide des émissions, de la météorologie et des conditions de frontière fournies par AQMEII (Air Quality Modelling Evaluation International Initiative) qui est un modèle de dispersion photochimique eulérien « open access » permettant d'évaluer la pollution de l'air gazeux et particulaire à de nombreuses échelles allant du suburbain au continental. Le modèle étudie en outre l'influence des données d'entrée, les hypothèses et les incertitudes sur la performance du modèle CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions). Dans les sections qui suivent, nous décrivons la démarche de l'application de CAMx au nord de l'Algérie en utilisant les données d'entrée fournies par « Inventaire national des émissions de gaz à effet de serre », les analyses de sensibilité du modèle incluant l'utilisation de données d'entrée / hypothèses, et sensibilité de l'O₃ aux émissions de précurseurs (NO_x et COV anthropiques).

L'organigramme donné en figure 15 résume la démarche globale que nous avons suivie.

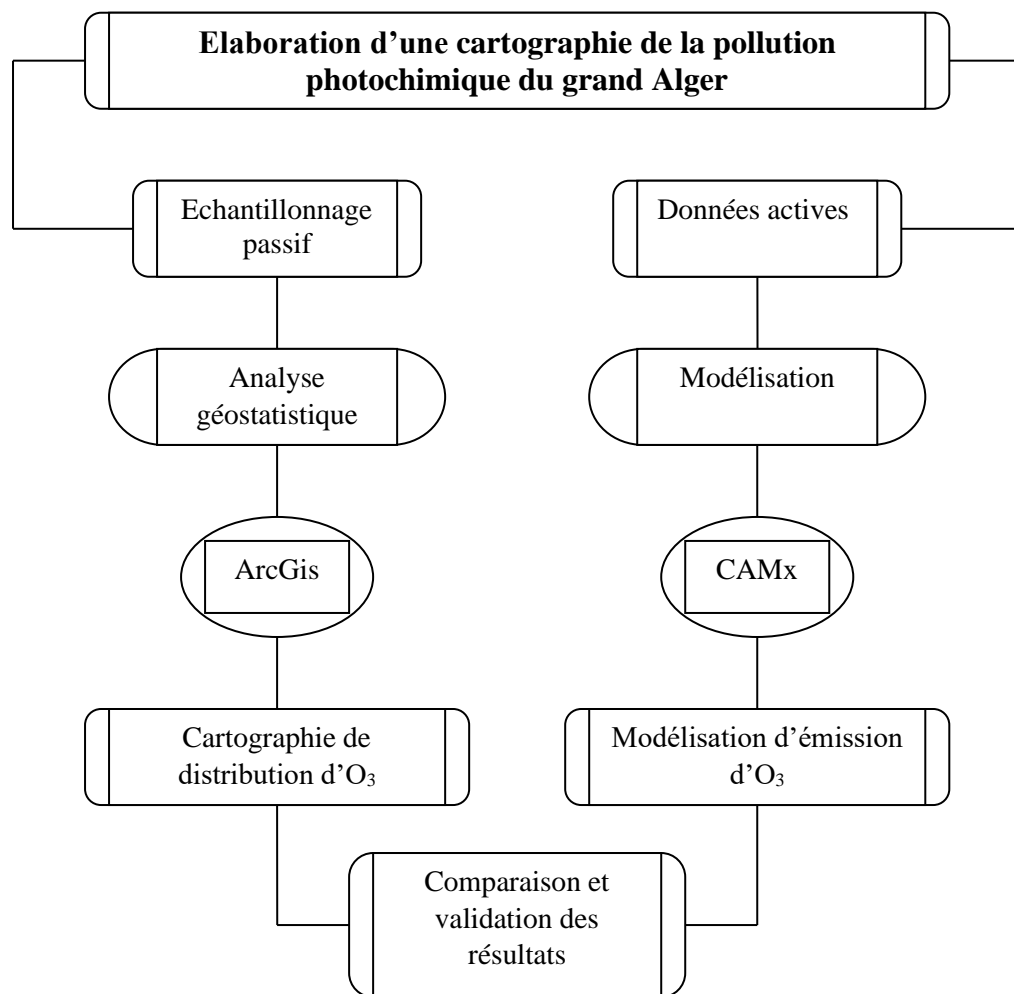


Figure 15 : Présentation de la démarche d'étude

II.3.1 Méthodologie de la cartographique

La cartographie est le moyen le plus approprié pour une bonne représentation spatiale. La géostatistique est une approche qui caractérise la structure de la variabilité spatiale de toute propriété et son estimation s'avère très appropriée pour cartographier un phénomène naturel (Droesbeke, Lejeune et al. 2006).

Le Kriging est une technique d'interpolation développée depuis les années 50 par le géologue sud-africain Krige, mais ce n'est que dans les années 60 que Matheron et l'équipe de l'Ecole des Mines de Paris ont formulé la théorie des variables régionalisées, d'où le nom de Géostatistique (Droesbeke, Lejeune et al. 2006).

ArcGIS est un système d'information géographique développé par ESRI (Environmental Systems Research Institute). Il s'agit d'un outil permettant de gérer, visualiser, cartographier, interroger et analyser toutes les données avec une composante spatiale. ArcGIS inclut une fonctionnalité croissante ArcView, ArcEditor et ArcInfo.

Les méthodes d'interpolation sont nombreuses et complexes, avec une efficacité très variable. Le choix de l'un ou l'autre est logiquement conditionné par la représentativité attendue des résultats souhaités et des objectifs fixes.

Le terme géostatistique se réfère à l'étude des phénomènes naturels (Droesbeke, Lejeune et al. 2006), il comporte deux phases (Douaoui, 2005) :

1. La première est l'analyse spatiale de la variable d'étude à travers le variogramme : La caractérisation des structures de la variabilité spatiale ou de l'analyse structurelle est la première étape nécessaire à toute étude géostatistique.
2. Le second est l'utilisation d'une technique de prédiction spatiale utilisant comme outil le krigeage. Le krigeage est une technique de prédiction prenant en compte les informations fournies par le variogramme, c'est également une méthode d'interpolation spatiale probabiliste ; elle est probabiliste dans la mesure où il considère que le champ spatial de la variable est une réalisation d'une fonction aléatoire.

Pour développer la cartographie de la pollution par l'ozone, nous avons utilisé le logiciel ArcGIS. ArcGIS est un système d'information géographique développé par ESRI (Environmental Systems Research Institute). Il s'agit d'un outil permettant de gérer, visualiser, cartographier, interroger et analyser toutes les données avec une composante spatiale. ArcGIS inclut une fonctionnalité croissante ArcView, ArcEditor et ArcInfo. Les méthodes d'interpolation sont nombreuses et complexes, avec une efficacité très variable. Le choix de l'un ou l'autre est logiquement conditionné par la représentativité attendue des résultats souhaités et des objectifs fixés.

La cartographie est le résultat final de la géostatistique. Ainsi, après avoir estimé la valeur d'une propriété en tout point d'un domaine, obtenir une carte est plus ou moins facile.

Les résultats de nos mesures des niveaux de pollution seront exploités par la technique de géostatistique "ArcGIS" (par variographie et krigeage ordinaire), pour développer la cartographie de la pollution atmosphérique par l'ozone troposphérique à Alger.

II.3.2 Méthodologie de la modélisation

❖ Aperçu

Le modèle complet de la qualité de l'air avec extensions (CAMx) est un modèle régional eulérien de dispersion photochimique qui permet des évaluations intégrées « à une atmosphère » de la pollution atmosphérique troposphérique (ozone, particules, toxiques de l'air) à des échelles spatiales allant des quartiers aux continents.

Il s'agit d'un système « open source » à la pointe de la science qui est efficace sur le plan informatique, flexible et accessible au public. Le code source Fortran du modèle est modulaire et bien documenté. Les formats de fichiers binaires Fortran d'entrée / sortie sont basés sur la convention UAM (Urban Airshed Model) et sont compatibles avec de nombreux outils de pré et post-traitement existants. Les champs météorologiques sont fournis à CAMx à partir de modèles de prévisions météorologiques distincts. Toutes les entrées d'émission sont fournies par des systèmes de prétraitement externes (ENVIRON 2010).

CAMx simule l'émission, la dispersion, la réaction chimique et l'élimination des polluants en faisant avancer l'équation de continuité eulérienne dans le temps (t) pour chaque espèce

chimique (l) sur un système de grilles tridimensionnelles imbriquées. L'équation de continuité décrit spécifiquement la dépendance temporelle de la concentration moyenne d'espèces en volume (c_l) dans chaque cellule de la grille comme une somme de tous les processus physiques et chimiques opérant sur ce volume. Cette équation est exprimée mathématiquement en coordonnées de hauteur (z) en fonction du terrain comme suit (ENVIRON 2010) :

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} = -\nabla_H \cdot V_H c_l + \left[\frac{\partial(c_l \eta)}{\partial z} - c_l \frac{\partial^2 h}{\partial z \partial t} \right] + \nabla \cdot \rho K \nabla(c_l / \rho) + \frac{\partial c_l}{\partial t} \Big|_{Emission} + \frac{\partial c_l}{\partial t} \Big|_{Chemistry} + \frac{\partial c_l}{\partial t} \Big|_{Removal}$$

Où V_H est le vecteur du vent horizontal, η est le taux de transport vertical net, h est la hauteur de l'interface de la couche, ρ est la densité atmosphérique et K est le coefficient d'échange (diffusion) turbulent.

Le premier terme sur le côté droit représente l'advection horizontale, le deuxième terme représente le transport vertical net résolu à travers une grille de hauteur arbitraire variable dans le temps et l'espace, et le troisième terme représente la diffusion turbulente à l'échelle sous-grille.

La chimie est traitée en résolvant simultanément un ensemble d'équations de réaction définies par des mécanismes chimiques spécifiques. L'élimination des polluants à la surface (dépôt) comprend à la fois l'absorption de la surface sèche et le nettoyage humide par précipitation.

CAMx peut effectuer des simulations sur quatre types de projections cartographiques cartésiennes : (Lambert Conic Conformal, Polar Stereographic, Mercator et Universal Transverse Mercator). CAMx offre également la possibilité de fonctionner sur un système de grille géodésique de latitude / longitude. La structure de la grille verticale est définie à l'extérieur, de sorte que les hauteurs d'interface de couche peuvent être spécifiées comme n'importe quelle fonction arbitraire de l'espace et / ou du temps. Cette flexibilité dans la définition des structures de grille horizontale et verticale permet à CAMx d'être configuré pour correspondre à la grille de tout modèle météorologique utilisé pour fournir des champs d'entrée environnementaux (ENVIRON 2010).

❖ Approche numérique

Les représentations physiques et les méthodes numériques utilisées pour chaque terme de l'équation de continuité de polluant (décrites dans la section « Aperçu ») sont présentées dans le tableau A en Annexe 02. CAMx comprend des paires d'algorithmes acceptés et des formulations de composants, et leur cadre modulaire qui permet de remplacer facilement des algorithmes supplémentaires et / ou mis à jour future (ENVIRON 2010).

❖ Mécanismes chimiques

Les mécanismes chimiques de CAMx en phase gazeuse incluent la version 2005 de Carbon Bond (CB05 : (Yarwood, Rao et al. 2005)), SAPRC99 (Carter 2000) et plusieurs versions de Carbon Band IV (CB4 : (Gery, Whitten et al. 1989)). Il existe également une interface qui permet d'utiliser un mécanisme chimique défini simple en codant le mécanisme dans un sous-programme fourni par l'utilisateur (ENVIRON 2010). Les mécanismes chimiques en phase gazeuse actuellement mis en œuvre sont listés dans tableau B en Annexe 02.

Les espèces dans le mécanisme CB4 (mécanisme 3) ainsi que les exigences de données de CAMx sont présentées respectivement dans les tableaux C et D en Annexe 02.

Pour la modélisation de la pollution, nous avons utilisé le système de modélisation "RAMS-EPS3-CAMx" qui se compose de :

- **RAMS** : Modèle météorologique à échelle moyenne : une région côtière est influencée par de nombreux phénomènes météorologiques dues aux interactions entre les brises et les grands systèmes éoliens ;
- **EPS3** : (Système de mise à l'essai des émissions, version 3.20) est un système de modélisation qui génère des émissions spécialisées par grille horaire pour les modèles de grille photochimique : inventaires d'émissions atmosphériques ;
- **CAMx** : (modèle de qualité de l'air complet avec extensions) est un modèle de dispersion photochimique eulérien : CAMx simule l'émission, la dispersion, la réaction chimique et l'élimination des polluants dans la troposphère.

Les exigences de données de CAMx sont les suivantes :

- **Météorologie** : Fournie par un Modèle Météorologique : en utilisant dans notre cas RAMS pour avoir les données météorologiques horaires pour la période sélectionnée qui donnent les Champs Gridés 3-Dimensionnels ;
- **Qualité de l'air** : obtenue à partir des données ambiantes mesurées : en utilisant la valeur de l'EMEP qui donne les concentrations initiales en grille et les concentrations de limites quadrillées ;
- **Émissions** : Fournies par un modèle d'émissions : en utilisant l'inventaire national des émissions de gaz à effet de serre pour l'année 2000 pour EPS3, qui donne les sources à point élevé et les sources à grille combinées ;
- **Géographique** : élaborée à partir du terrain et des cartes terrestres / de couverture terrestre, des cartes d'indice de sécheresse, modélisées ou filtrées par satellite. Couverture nuageuse, indices des aires foliaires dérivées des satellites : utilisant l'orographie et l'utilisation des terres reçues par l'Institut National de Cartographie et des Télécommunications (INCT) donne les caractéristiques de surface grille ;
- **Photolyse** : dérivée des mesures satellitaires et des modèles de transfert radiatif : utilisant des données satellitaires de la NOAA pour la période et la zone sélectionnées qui donnent les propriétés radiatives atmosphériques.

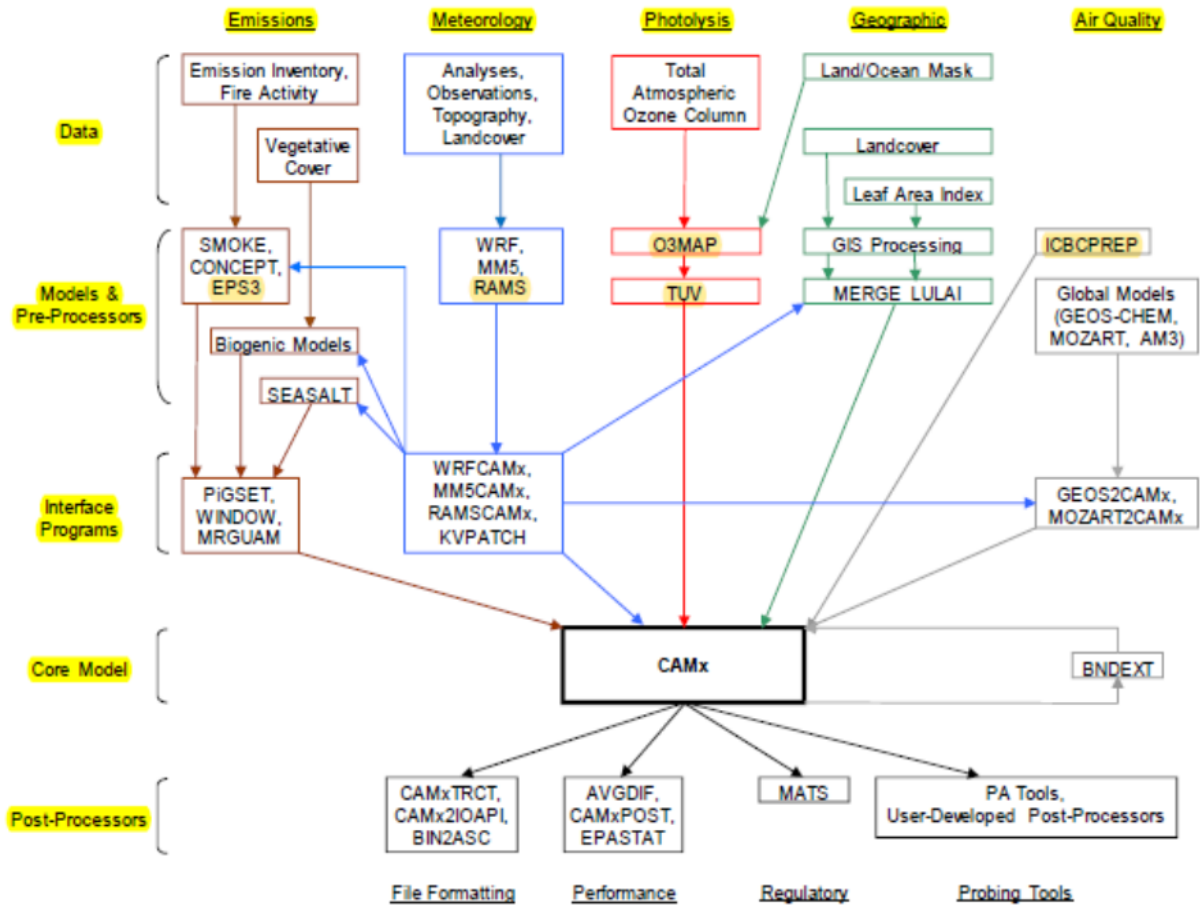


Figure 16 : Diagramme schématisé du système de modélisation CAMx

Le système de modélisation "RAMS-EPS3-CAMx" utilisé dans cette étude est schématisé en figure 16. Ce modèle a été mis à notre disposition par l'Equipe d'Analyse Environnementale du Département de Génie Industriel et de la Science Mathématique de l'Université Polytechnique de Marche d'Ancona en Italie.

Les structures d'entrée / sortie de ce modèle de base sont synthétisées dans le tableau D en Annexe 02. Le modèle exige des concentrations mesurées en continu par les stations de surveillance de la qualité de l'air

Pour ce travail, nous avons pris en compte les données fournies par le réseau de surveillance de la qualité de l'air « SAMASAFIA » où l'une des quatre stations de mesure, celle de « BenAknoun » est équipée d'un analyseur d'ozone Figure 11. Pour cette station, les données utilisées sont de 2002 (période du 21 au 24 juin). Le choix de cette année est dû, premièrement, au fait que cette station a rencontré de nombreux problèmes et n'a correctement fonctionné avec des résultats cohérents qu'en 2002.

D'autre part, les émissions utilisées dans le modèle sont tirées de l'Inventaire national des émissions de gaz à effet de serre pour l'an 2000 (Rapport 00039149 / GEF / PNUD) comme seule source d'inventaire des émissions disponibles lors de notre étude. Il est supposé que les émissions des stocks 2000 sont assez proches de celles de 2002. Les données météorologiques nécessaires à la modélisation sont celles enregistrées à la station de Dar El Beida, représentative du Grand Alger (Figure11).

Les groupes sources d'émissions utilisés pour ce model CAMx sont au nombre de trois répartis comme suit:

001 : Industriel

- 01 : Combustion dans les Industries de l'Énergie et de la Transformation
- 02 : Combustion dans les Secteurs Commercial, Institutionnel, Résidentiel et Agricole
- 03 : Combustion dans l'Industrie
- 04 : Processus de Production
- 05 : Extraction et Distribution de Combustibles Fossiles
- 06 : Utilisation de Solvant
- 09 : Traitement et Élimination des Déchets

002 :Transport

- 07 : Transport Routier
- 08 : Autres Traitement et Machines Mobiles

003 : Naturel

- 10 : Agriculture Foresterie et Changement d'Utilisation des Terres
- 11 : Nature

De plus, la correspondance entre les catégories de sources du GIEC (IIPCC) de 1996 et SNAP 97 utilisé pour ce model est présenté en détail dans les tableaux en Annexe 03.

L'évaluation du modèle a été effectuée à l'aide de l'outil EPS3 (Système de traitement des émissions, version 3.20) pour les polluants gazeux O₃, NO₂, NO et COV et à inclure une analyse spatiale et temporelle.

Pour appliquer la modélisation, le nord de l'Algérie a été scindé en trois sous-domaines G1, G2 et G3 comme montrés en Figure 17. La grille grossière (G1), mesure 440 x 400 km de large et couvre la plus grande partie de la région nord de l'Algérie à travers ses cellules 22x20 avec un pas de 20km. La deuxième grille imbriquée (G2) est large de 200x200 Km, couvre bien Alger et les villes voisines, et est faite de 40x40 cellules de pas de 5 km. La grille la plus fine (G3) mesure 60x40 km de large et est faite de 62x42 cellules de pas de 1 km. Elle couvre la ville d'Alger (notre zone d'étude).

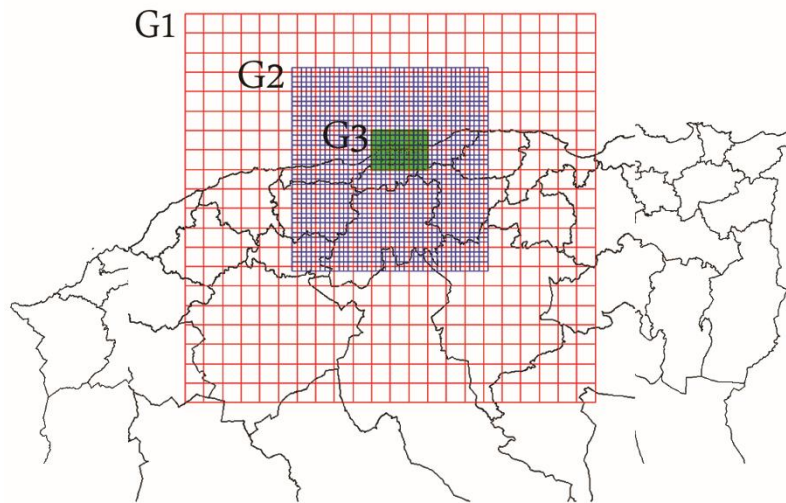


Figure 17 : Grille principale G1 et grilles imbriquées

CHAPITRE III.

Résultats et discussion

III.1 Niveaux de pollution par l'ozone

Les teneurs atmosphériques moyennes d'ozone de la basse atmosphère mesurées au cours des quatre campagnes de mesure (campagne 1 : du 26 février au 08 mars 2012, campagne 2 : du 08 au 19 juillet 2012, campagne 3 : du 23 juin au 04 juillet 2013 et campagne 4 : du 01 au 12 septembre 2013) en sites urbains et suburbains d'Alger sont présentées dans le tableau 4. La figure 18 illustre les teneurs moyennes de toutes les campagnes d'échantillonnage mesurées dans les 49 sites, tous types de sites confondus. La figure 19 illustre les teneurs moyennes selon le type de site (urbain et suburbain)

Tableau 04 : Niveaux moyens d'ozone mesurés pendant la période d'étude

N°	Type de site	Communes	Camp1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Camp2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Camp3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Camp4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Teneur Moy d'O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	Suburbain	Birtouta	73,42	121,33	172,27	171,50	134,63
2	Suburbain	Ouled Chebel	52,40	109,33	198,09	196,91	139,18
3	Suburbain	Mehalema	151,01	165,10	153,34	153,42	155,72
4	Suburbain	Rahmania		169,73	172,65	172,74	171,71
5	Suburbain	Souidania	60,74	136,56	196,75	197,04	147,77
6	Suburbain	Tessala El Merdja	66,75	115,11	178,93	178,31	134,77
7	Suburbain	Khraicia		136,20	188,83	188,46	171,17
8	Suburbain	Zeralda	63,45	111,62	252,73	217,06	161,21
9	Suburbain	Staouéli	138,98	105,80	208,49	185,28	159,64
10	Suburbain	Cheraga	101,91	176,53	239,06	236,45	188,49
11	Suburbain	Beni Messous	85,73	160,35	189,00	186,94	155,51
12	Suburbain	Baraki	69,96	130,38	186,44	185,43	143,05
13	Suburbain	Sidi Moussa	69,97	175,48	188,13	187,57	155,29
14	Suburbain	Eucalyptus	56,06	116,22	146,87	146,36	116,38
15	Suburbain	Gué Constantine	56,11	124,15	111,34	111,73	100,83
16	Suburbain	Saoula	98,78	131,88	205,57	204,55	160,19
17	Suburbain	Douéra	130,95	149,83	172,03	188,62	160,36
18	Suburbain	Ouled Fayet	104,30	155,43	171,60	229,57	165,22
19	Suburbain	El Achour	105,80	116,60	164,96	164,96	138,08
20	Suburbain	Baba Hacéne	119,01	176,47	206,23	204,48	176,55
21	Suburbain	Ain Taya	104,09	175,27	273,16	272,21	206,19
22	Suburbain	Heraoua	85,73	144,58	295,95	294,92	205,30
23	Suburbain	Reghaia	68,58	173,56	228,12	231,70	175,49
24	Suburbain	Rouiba	48,83	136,42	224,83	224,61	158,67
25	Suburbain	Dar El Beida	44,26	136,36	193,97	192,05	141,66
26	Suburbain	Draria		145,89	203,19	203,30	184,13

CHAPITRE III. Résultats et discussion

27	Suburbain	Dely Brahim	92,04	155,01	170,41	168,64	146,53
28	Suburbain	Bouzaréah	122,09	174,21	175,42	174,03	161,44
29	Suburbain	Hammamet	178,82	149,1	222,42	220,77	192,78
30	Suburbain	Bordj El Kiffan	128,03	170,23	161,04	161,04	155,08
31	Suburbain	Bordj El Bahri	108,26	165,57	210,00	179,83	165,91
32	Suburbain	El Marsa		116,95	258,67	258,15	211,25
33	Suburbain	Ain Bénian		213,19	202,01	200,6	205,27
	Moy.		<i>92,36</i>	<i>146,68</i>	<i>197,65</i>	<i>196,64</i>	161,98
	Max.		<i>178,82</i>	<i>213,19</i>	<i>295,95</i>	<i>294,92</i>	211,25
	Min.		<i>44,26</i>	<i>105,80</i>	<i>111,34</i>	<i>111,73</i>	100,83
	Ecart Type		<i>34,01</i>	<i>25,94</i>	<i>37,73</i>	<i>36,48</i>	25,42
34	Urbain	El Biar	119,90	150,35		108,23	126,16
35	Urbain	Alger centre	70,04	105,61	115,11	114,71	101,37
36	Urbain	Bab El Oued	58,48	86,32	143,88	143,38	108,02
37	Urbain	Bologhine	122,25	150,19	204,66		159,03
38	Urbain	Madania	99,70	114,97	195,04	192,62	150,58
39	Urbain	Bachedjerah	68,32	106,29	177,68	176,89	132,29
40	Urbain	Kouba	67,76	122,11	200,39	199,30	147,39
41	Urbain	Birkhadem	79,79	95,47		163,74	113,00
42	Urbain	Mohamadia	68,43	154,83		159,10	127,46
43	Urbain	El Harrach	80,85	125,70	217,59	217,81	160,49
44	Urbain	Bab Ezzouar		173,64	234,05		203,85
45	Urbain	Megharia		147,20	191,55		169,38
46	Urbain	Hussein Dey		81,50	188,34	187,69	152,51
47	Urbain	Belouizdad		131,4	188,37	187,52	169,10
48	Urbain	Rai Hamidou		145,45		138,97	142,21
49	Urbain	Ben Aknoun		159,23	169,62		164,43
	Moy.		<i>83,55</i>	<i>128,14</i>	<i>185,52</i>	<i>165,83</i>	145,45
	Max.		<i>122,25</i>	<i>173,64</i>	<i>234,05</i>	<i>217,81</i>	203,85
	Min.		<i>58,48</i>	<i>81,50</i>	<i>115,11</i>	<i>108,23</i>	101,37
	Ecart Type		<i>22,66</i>	<i>27,80</i>	<i>31,79</i>	<i>34,13</i>	26,67

Les résultats obtenus montrent que les niveaux, minimum, moyen et maximum de l'O₃ obtenus au cours de ces quatre campagnes d'échantillonnage s'élèvent à 100,83 µg/m³, 156,59 µg/m³ et 211,25 µg/m³, respectivement.

Par type de site, les teneurs moyenne, minimale et maximale obtenues pour toutes les campagnes d'échantillonnage, s'élèvent respectivement, à 145,45 µg/m³, 101,37 µg/m³ et 203,85 µg/m³ pour les sites urbains et à 161,98 µg/m³, 100,83 µg/m³ et 211,25 µg/m³ respectivement pour les sites suburbains.

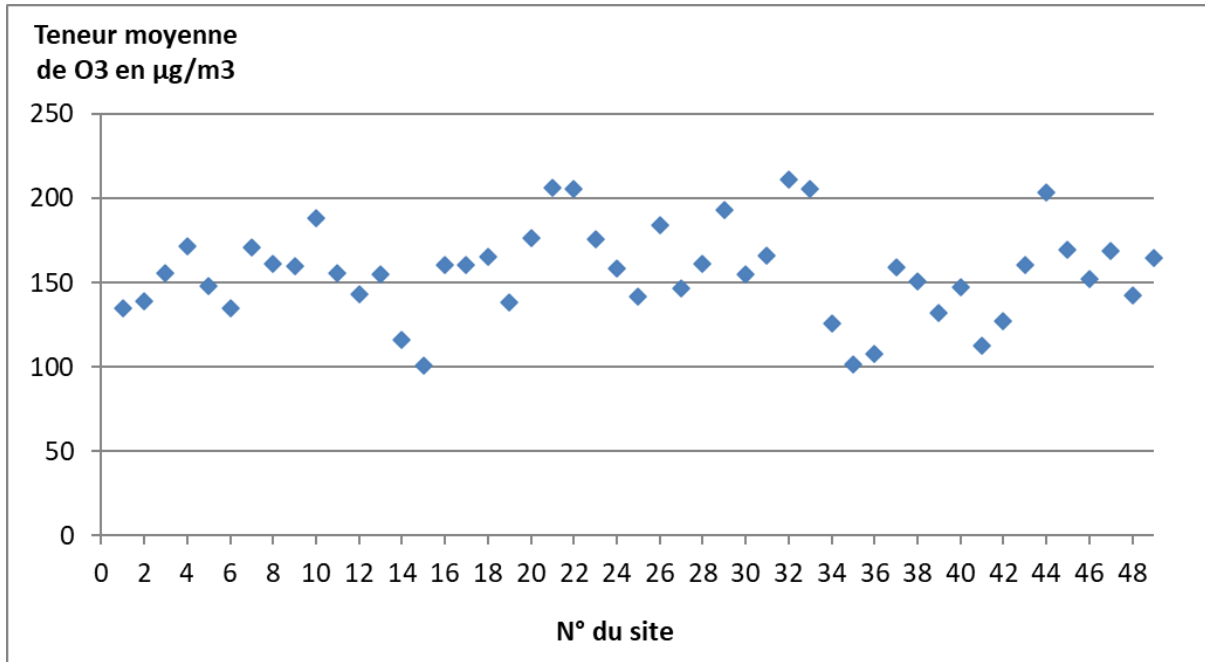


Figure 18 : Concentrations moyennes d'ozone mesurées en 2012 et 2013 en différents sites d'Alger

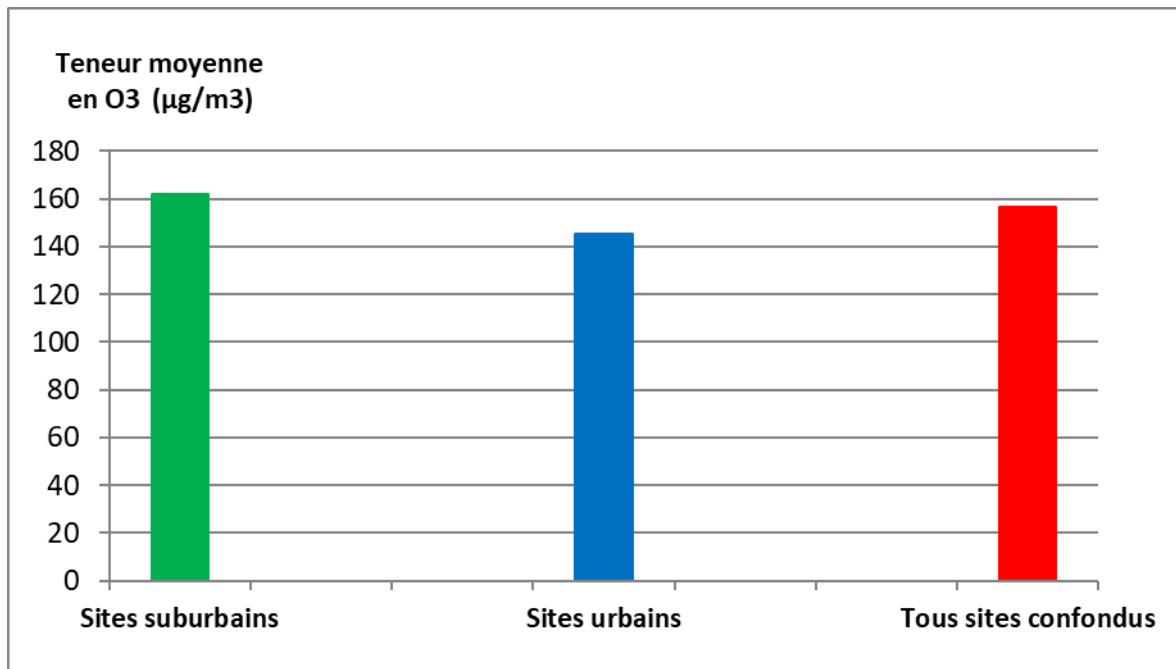


Figure 19 : Teneurs moyennes en ozone selon le type de sites

Comme attendu, on observe que les teneurs atmosphériques en ozone varient d'un site à un autre et pour le même site d'une saison à une autre. Ces fluctuations traduites par un écart-type moyen de l'ordre de $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont généralement dues aux caractéristiques du site liées à la densité urbaine, à l'activité socio-économique, aux infrastructures routières (rochades sud et nord) et principalement aux émissions du trafic routier local (Kiros, Shakya et al. 2016) ; (Zhao, Zheng et al. 2018).

En comparant les teneurs moyennes selon la nature du site, suburbains et urbains (figure 19), on constate que la différence entre les deux types de site n'est pas très importante (environ 162 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour sites suburbains et 145 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les urbains). Ceci est dû au fait qu'il est difficile de classer les communes de la Wilaya d'Alger en sites urbains fortement influencés par les émissions du trafic routier et les sites suburbains qui le sont moins. C'est ainsi que les sites suburbains qui se trouvent en périphérie comme Eucalyptus (116,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Gué de Constantine (100,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et El-Achour (138,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) accusent des teneurs relativement faibles, alors que des sites du centre-ville fortement urbanisés comme Bab Ezzouar (203,85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ou proches du centre-ville Belouizdad (169,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) présentent des niveaux plus élevés qu'attendu.

On retrouve toute fois la tendance globale selon laquelle le NO émis en milieu urbain ou à proximité des grands axes routiers (rocares sud et nord, autoroute Boumerdes-Blida, etc.) réduit les taux d'ozone. Ainsi, selon les résultats de notre étude, on peut globalement résumer les niveaux d'ozone en deux classes :

- Zone fortement urbanisée ou sous forte influence du trafic routier avec un niveau d'ozone inférieur à 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: C'est le cas des zones d'Alger Centre (101,37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Bab El Oued (108,02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Bachedjerah (132,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Gué Constantine (100,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), El Achour (138,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Dar El Beida (141,66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Dely Brahim (146,53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Birkhadem (113 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et El Mohamadia (127,46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Zone de périphérie peu influencée par les émissions du trafic routier avec un niveau d'ozone de l'ordre de 170 à 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. C'est le cas des sites de Rahmania (171,71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Khraicia (171,17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ain Taya (206,19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Heraoua (205,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Draria (184,13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Hammamet (192,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), El Marsa (211,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et Ain Benian (205,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

En ces sites de la banlieue d'Alger, on retrouve des niveaux d'ozone relativement homogènes, principalement liés au transport, à la dispersion des précurseurs de l'ozone et à la répartition de l'intensité du rayonnement solaire (Kerbachi, Boughedaoui et al. 1996). Cette hypothèse peut être confirmée par des études qui ont montré que la variation temporelle (de semaine en semaine) de la distribution de l'ozone est synchrone à l'intérieur et entre tous les bassins d'échantillonnage, ce qui indique qu'il s'agit d'une cohérence régionale en matière de pollution atmosphérique détectable avec des moyennes hebdomadaires (Cooper and Peterson 2000).

Globalement, le grand Alger enregistre des niveaux de pollution photochimique très élevés qui sont caractéristiques des régions fortement ensoleillées où les émissions en précurseurs sont abondantes. C'est en général, le cas de toutes les villes du bassin méditerranéen.

Une comparaison des niveaux mesurés à Alger avec ceux mesurés en continu dans d'autres villes, montre qu'à Alger, l'ozone atteint des niveaux comparables voir légèrement supérieurs à ceux observés dans les zones européennes de l'Europe du sud. A titre de comparaison, le niveau d'ozone mesuré dans des sites urbains et suburbains, s'élevait respectivement à 130 et 129 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Barajas - Pueblo (Espagne), 112 et 118 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Montpellier (France) et 103 et 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Napoli (Italie) (EEA 2015).

De même, l'ozone mesuré à Alger en sites urbains est supérieur au niveau atteint en Grèce (120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Kalabokas and Repapis 2004), à Toulon (France) (114 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), à Rome (Italie) (115 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (EEA 2015) et comparable à celui observé à Gênes (Italie) (142 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), à Toledo (Espagne) (129 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Par ailleurs, les concentrations relevées à Alger sont inférieures à celles enregistrées à Malaga (Espagne) (160 et 190 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Dueñas, Fernández et al. 2004).

Pour les sites suburbains, les concentrations moyennes mesurées sont supérieures à celles enregistrées dans le centre de Pécs (Hongrie) (127 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Kalabokas and Repapis 2004), à Athina (Espagne) (129 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), à Milan (Italie) (126 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et inférieure à celle enregistrée dans le centre de Zagreb (Croatie) (209 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Pehnec, Vadić et al. 2009).

Par rapport à d'autres villes méditerranéennes comme Athènes où O_3 varie de 64 à 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kalabokas, Viras et al. 2000), Madrid avec un niveau moyen de O_3 de $38,5 \pm 3,5$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Martin, Lemey et al. 2010) et Volos avec une valeur maximale de O_3 de 69 ± 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Alger présente une pollution photochimique élevée.

III.2 Variation saisonnière et influence des facteurs météorologiques

Pour visualiser la variation saisonnière, nous présentons en figures 20 à 22 l'évolution des teneurs en ozone en fonction des périodes étudiées.

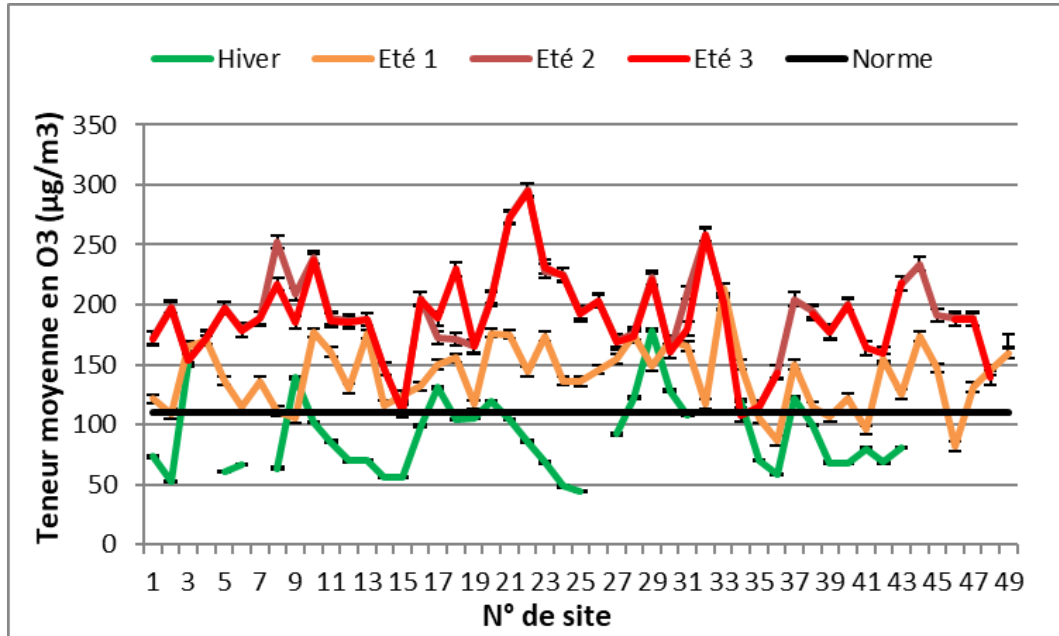


Figure 20 : Evolution des teneurs en ozone selon la saison étudiée

NB : la norme sur la figure 20 est le seuil de protection de la santé par O₃ sur 8h qui est de 110 µg/m³ (JORA 2006).

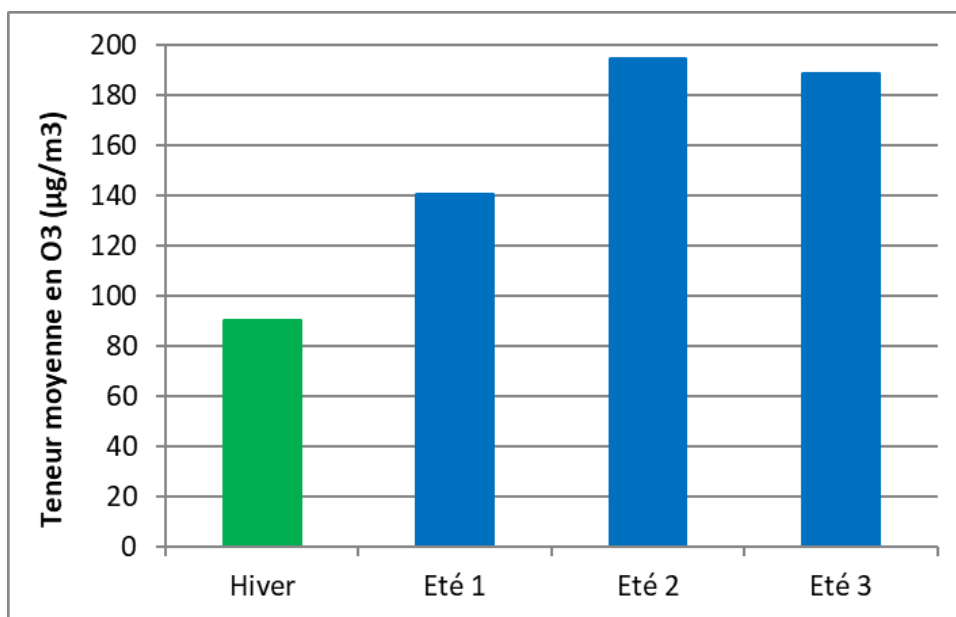


Figure 21 : Teneurs moyennes en ozone selon la saison étudiée

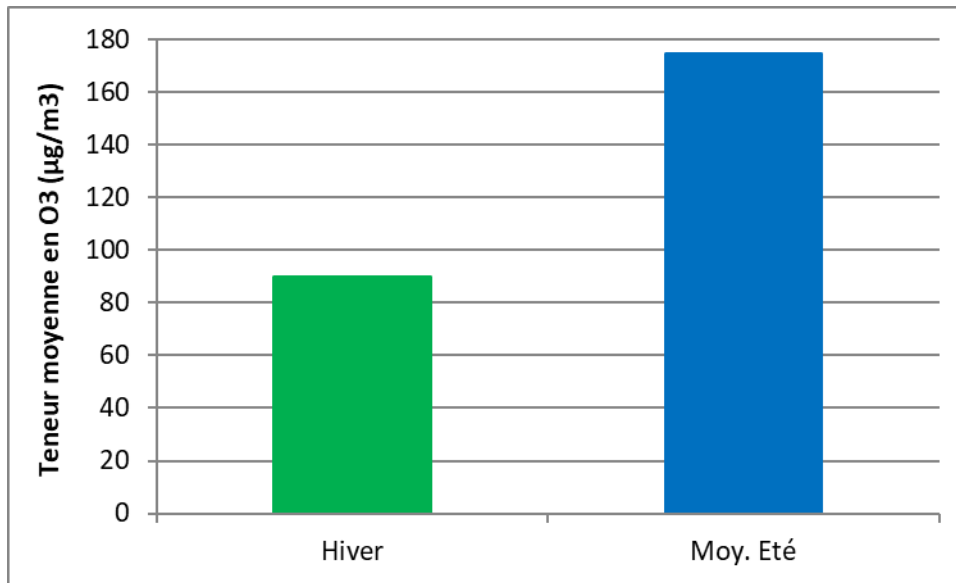


Figure 22 : Comparaison des teneurs moyennes d'ozone mesurées en périodes hivernale et estivale

Les graphes montrent qu'il existe une différence importante dans l'évolution des teneurs en ozone entre la saison hivernale et les trois campagnes estivales de mesure.

Parmi les saisons estivales, les campagnes 3 (Eté 2, du 23 juin au 04 juillet 2013) et 4 (Eté 3, du 01 au 12 septembre 2013) présentent des teneurs de niveau comparable. Les teneurs estivales de la campagne d'échantillonnage Eté 1 (du 08 au 19 juillet 2012), sont légèrement inférieures aux autres concentrations estivales. Ceci est certainement dû aux influences liées à la période d'échantillonnage : la campagne Eté 1 a été réalisée en 2012, alors que celles de l'Eté 2 et l'Eté 3 ont été réalisées toute les deux l'année suivante en 2013 à environ un mois d'intervalle. Durant ces deux années, le parc automobile a connu une croissance extraordinaire de plus de 1,1 million de véhicules. En effet, la quarantaine de concessionnaires implantés dans le pays ont importé 529.976 véhicules en 2013 et 577.637 véhicules en 2012, pour une valeur globale de plus de 13,5 milliards USD (Abbès Zineb 2014). Il en a résulté certainement une énorme croissance d'émissions de précurseurs d'ozone en 2013.

La comparaison entre la moyenne hivernale ($90,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et la moyenne estivale ($174,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Figure 22) montre qu'il y a une différence significative entre les deux saisons, le rapport est de l'ordre de 0,52 ; en d'autres termes, tous sites confondus, les teneurs hivernales ne constituent qu'environ la moitié des teneurs mesurées en période chaude.

Le nombre de valeurs supérieures à la valeur cible de l'UE pour l'ozone (O_3) ($110 \mu\text{g}/\text{m}^3$) pendant la saison chaude était de 33, soit 100% sur les sites suburbains et de 16, soit 100% sur les sites urbains sur les deux années de suivi à Alger.

En ce qui concerne la saison froide, le nombre de valeurs supérieures à cette limite était de 7 soit 28% sur les sites suburbains et 2 soit 20% sur les sites urbains. Ces résultats indiquent un nombre élevé de dépassements des normes de protection de la santé sur tous les sites étudiés, ce qui montre qu'environ 90% de la population peut être affectée par cette pollution. Ces résultats, comparés à ceux rapportés dans la littérature, sont conformes à ceux obtenus dans d'autres lieux / pays, où les valeurs les plus élevées sont enregistrées en période estivale (Alejo, Morales et al. 2011).

Pour l'étude de l'influence des facteurs météorologiques dans la formation de l'ozone, nous considérons les paramètres résumés en tableau 5.

Tableau 05 : Données météorologiques moyennes des quatre campagnes de mesure

Campagnes	Saison	T (°C)	Vitesse Moy. du vent (m/s)	Humidité (%)	Precipitatio n (mm)	Teneur Moy. d' O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ensoleillement (h)
Campagne 1	Hiver	11,62	2,38	71,78	4,89	90,04	90
Campagne 2	Eté 1	26,11	2,30	70,06	0,03	140,63	121
Campagne 3	Eté 2	21,83	2,82	76,04	0,07	194,42	132
Campagne 4	Eté 3	23,49	1,62	82,74	1,28	188,43	97

Ces variations d'ozone et les niveaux élevés enregistrés pendant les saisons froides et chaudes sont généralement liés aux précurseurs de l'ozone et aux facteurs météorologiques, notamment la vitesse du vent, l'humidité et le rayonnement solaire (Tarasova and Karpetchko 2003) ; (Song, Wu et al. 2017). L'étude de la variation des concentrations d'ozone avec les facteurs météorologiques montre une corrélation positive entre l'ozone et la température ($R^2 = 0,49$) et le nombre d'heures d'ensoleillement ($R^2 = 0,29$). A ce titre, on observe que la campagne d'échantillonnage Eté 3 qui présente le niveau le plus élevé d'ozone, coïncide avec la période au nombre d'heures d'ensoleillement le plus élevé (Tableau 5). Ainsi, la présence de précurseurs dans le transport du panache urbain à l'intérieur et à l'extérieur de la zone urbaine conjuguée à

un ciel dégagé, à des températures et à une intensité de rayonnement élevées favorisent la formation de niveau élevé d'ozone (Kerbachi, Koutai et al. 1998) ; (Lin, Jacob et al. 2001).

Comme l'humidité ne varie que très peu durant les quatre campagnes de prélèvement, on n'aboutit pas à une corrélation avec les concentrations d'ozone. Nos prélèvements n'ont malheureusement pas coïncidé avec les périodes de sirocco connues pour leur faible taux d'humidité.

Pour la même raison qu'avec le facteur humidité, on n'observe pas de corrélation entre l'ozone et la vitesse du vent, les vitesses de vent enregistrées pendant les périodes d'échantillonnage étant presque similaires. Toutefois, ce vent qui est souvent relativement faible ne favorise pas un important transport des polluants, ce qui peut expliquer que même en sites urbains, nous observons parfois des taux élevés d'ozone. En général, le transport sous vent fort est plus efficace pour la formation d'ozone dans les zones suburbaines et rurales, où les niveaux les plus élevés sont observés (Liu, Kley et al. 1980).

Cette analyse montre que, pris individuellement, les facteurs météorologiques jouent certes un rôle, mais ne suffisent pas à eux seuls à expliquer les tendances observées dans les teneurs en ozone. Il y a à la fois synergie et antagonisme entre certains facteurs. L'ampleur des précurseurs, le rôle du NO comme puit d'ozone, l'élimination nocturne de l'ozone au sol et l'éventuelle présence de couches d'inversion, jouent également un rôle important dans les niveaux d'ozone.

III.3 Teneurs diurnes de l'ozone

Dans cette section, une conversion des niveaux hebdomadaires d'ozone en niveaux quotidiens (24 heures) et en niveaux de 8 heures a été réalisée afin de comparer nos niveaux hebdomadaires d'ozone avec la valeur-guide de l'OMS de 8h (Valeur de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à ne pas dépasser sur 8h). A cette fin, une étude des quantités massiques moyennes d'ozone a été réalisée du 12 juillet au 13 août 2015. Trois campagnes de mesure ont été menées au cours de cette période. 11 tubes passifs Radiello ont été placés simultanément en un site urbain à l'Ecole Nationale Polytechnique et ont été réparti comme suit : sept (7) échantillons sur 8 heures (prélèvement de 9h du matin à 17h de l'après-midi), deux (2) échantillons sur 24 heures et deux (2) échantillons sur 7 jours. Les concentrations moyennes en masse d'ozone observées sont illustrées à la figure 23 :

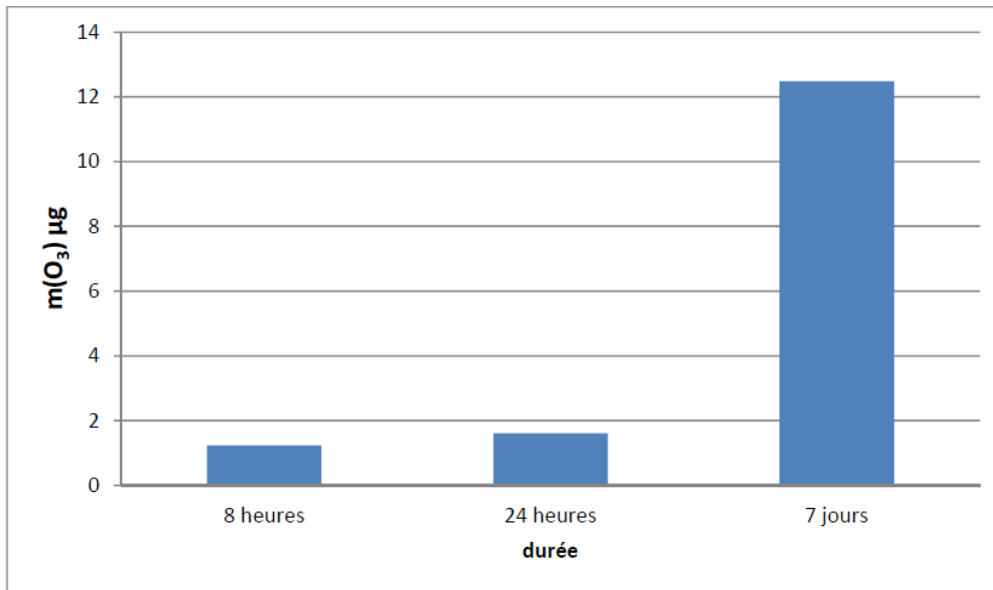


Figure 23 : Quantités massiques d'O₃ piégées pour les différentes durées d'exposition

Les résultats obtenus montrent que les teneurs moyennes en masse de la pollution par l'ozone sur 8 heures, 24 heures et 7 jours étaient respectivement de 1,24 µg, 1,64 µg et 12,48 µg.

L'étude des ratios de masse a montré que la masse collectée sur 7 jours correspond à environ 7 fois la masse collectée sur une journée (24 heures), ce qui donne un ratio moyen ($R = 1,1$) entre la masse de l'échantillonnage de 7 jours et la masse de 7 fois l'échantillonnage de 24 h.

En d'autres termes, dans des conditions météorologiques et des émissions de précurseurs similaires, les niveaux quotidiens d'ozone peuvent être déterminés à partir des niveaux hebdomadaires. Les niveaux hebdomadaires d'ozone peuvent également être déterminés à partir des niveaux quotidiens.

De plus, la comparaison des masses d'ozone collectées sur une période de 8 heures avec celle de 24 heures nous a permis d'avoir une idée de la part de l'ozone nocturne. A partir de ces données, il est apparu que la teneur massique en O₃ sur 8h constituait environ 70% de l'ozone total mesuré sur 24 heures. L'ozone nocturne et celui de matinée (de 18h du soir à 10h du matin suivant) ne constituant que 30%. L'absence de photochimie conjuguée au NO émis la nuit qui est un puits d'ozone entraîne donc une forte diminution de l'ozone.

Ces données ont permis de convertir les moyennes hebdomadaires annuelles de la présente étude (tableau 04). Les résultats des conversions obtenues montrent que les concentrations moyennes en ozone sur 24h et 8h étaient respectivement de 156,71 et 329,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les sites urbains et de 179,00 et 375,90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les sites suburbains. Ces teneurs traduisent l'ampleur de la pollution photochimique à Alger. Elles dépassent largement les standards internationaux pour la protection de la santé et de la végétation et sont de l'ordre de celles qui, selon la norme algérienne de 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, nécessitent information et même une alerte de la population, particulièrement en été (intensification de la photochimie) où les teneurs atmosphériques en ozone sont les plus élevées.

III.4 Cartographie de la pollution par l'ozone à Alger

III.4.1 La variographie

Les variogrammes expérimentaux des teneurs moyennes en O_3 ont été établis à l'aide du logiciel ArcGIS version 10.6.1. Un ajustement automatique de ces derniers est obtenu après avoir sélectionné comme modèle une fonction de type sphérique.

Les caractéristiques d'ajustements des différents variogrammes des teneurs saisonnières (hiver et été) et annuelles sont regroupées dans le tableau 06.

Tableau 06 : Paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux de O_3

Campagnes	Modèle	Effet de pépité	Palier	Portée	Effet de pépité/Palier
Hiver					
Hiver	Sphérique	336,95	998,48	6.597,94	0,34
Etés					
Deux étés	Sphérique	404,78	3.372,08	22.622,21	0,12
Été 2013	Sphérique	307,83	905,68	5.452,84	0,34
Tous les étés	Sphérique	280,42	489,12	4.269,76	0,57
Annuelle					
Toutes les campagnes	Sphérique	461,93	2.939,61	35.275,32	0,16

On constate que les paramètres d'ajustements effet de pépité et palier sont élevés dans le cas de l'O₃ annuel et période des deux étés. Les portées les plus élevées sont observées de même dans ces deux cas. En général, pour pouvoir interpréter les variogrammes, on étudie le rapport entre l'effet de pépité et le palier (Douaoui 2005). Un rapport inférieur à un tiers (1/3) indique que la variable présente une bonne corrélation spatiale. Si le rapport est supérieur à deux tiers (2/3), on est en présence d'une faible corrélation spatiale.

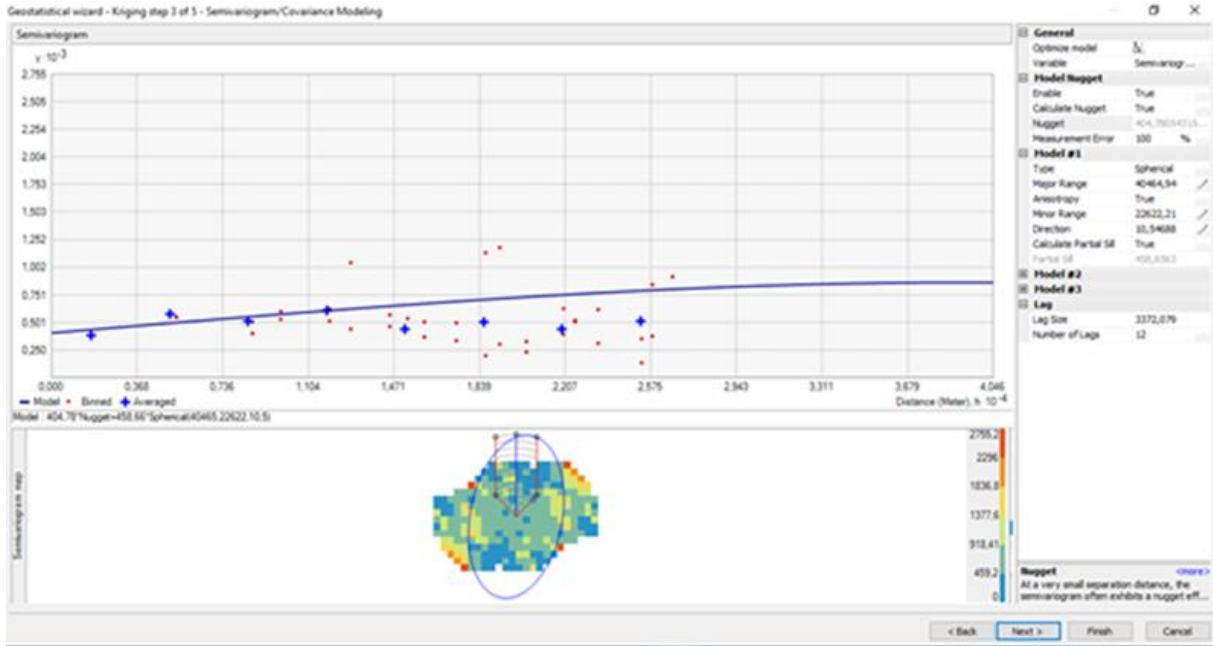
Les valeurs des rapports obtenus dans notre étude (tableau 06) indiquent que l'ozone mesuré en saison estivale (deux étés) et annuel (toutes les campagnes) présente une bonne corrélation spatiale, ce qui sera bénéfique pour l'interpolation (Krigage). Dans les autres cas, on aboutit à une moins bonne corrélation spatiale qui résulte des écarts relevés entre les différentes teneurs mesurées.

A titre d'exemple, nous présentons en figure 24, les modèles d'ajustement des différents variogrammes de l'O₃ moyen étudié pour les périodes de deux étés et la moyenne annuelle.

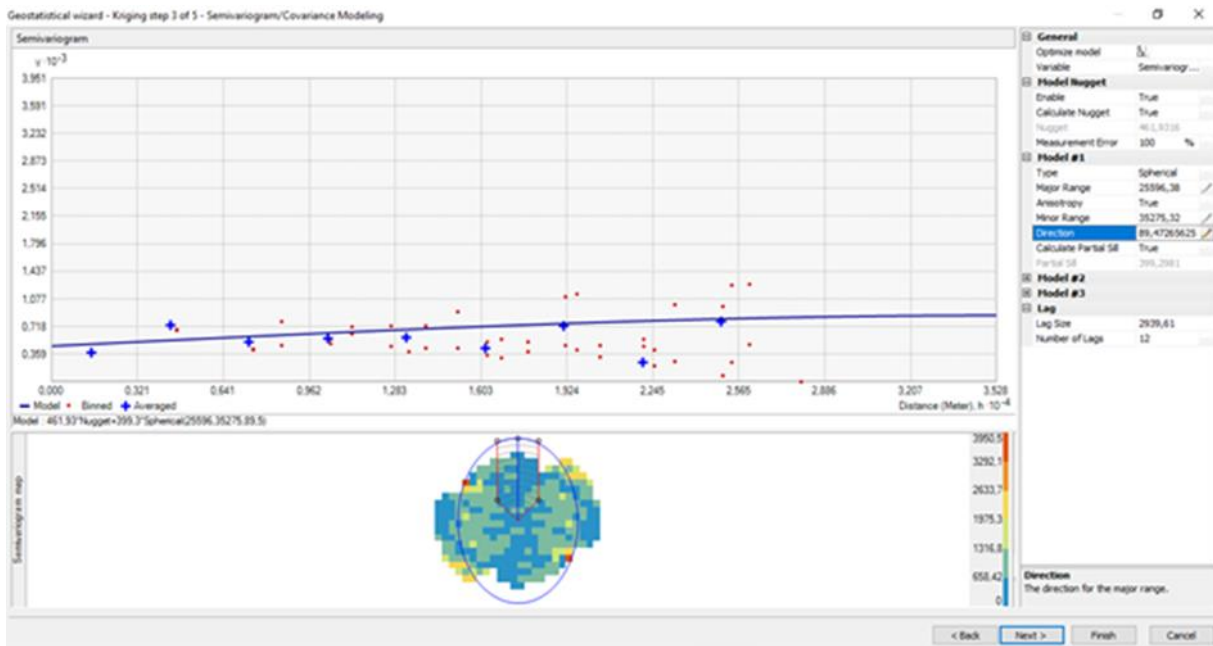
III.4.2 Qualité d'estimation de la cartographie de l'O₃

Pour analyser la qualité de l'estimation obtenue, nous présentons en figures a) à e) (Annexe 04), les graphes de corrélation des valeurs mesurées et estimées par krigeage ordinaire de l'ozone pour les différentes campagnes étudiées.

Ces résultats indiquent que l'estimation est très significative pour l'ensemble des campagnes (voir les paramètres du tableau 06 ci-dessus et le paramètre RQESM ci-dessous).



a) Deux étés



b) Toutes les campagnes de mesure

Figure 24 : Variogrammes d'ajustement et surfaciques de l'O₃ moyen pour certaines périodes de l'étude

III.4.3 Validation statistique de la cartographie

Pour la validation statistique de la qualité d'estimation de l'ozone par krigeage ordinaire, nous avons déterminé le RQESM (Root Mean Square Standardized Error) qui est un paramètre statistique de la qualité d'estimation. Le tableau 7 présente les valeurs du RQESM pour les différentes campagnes de mesure.

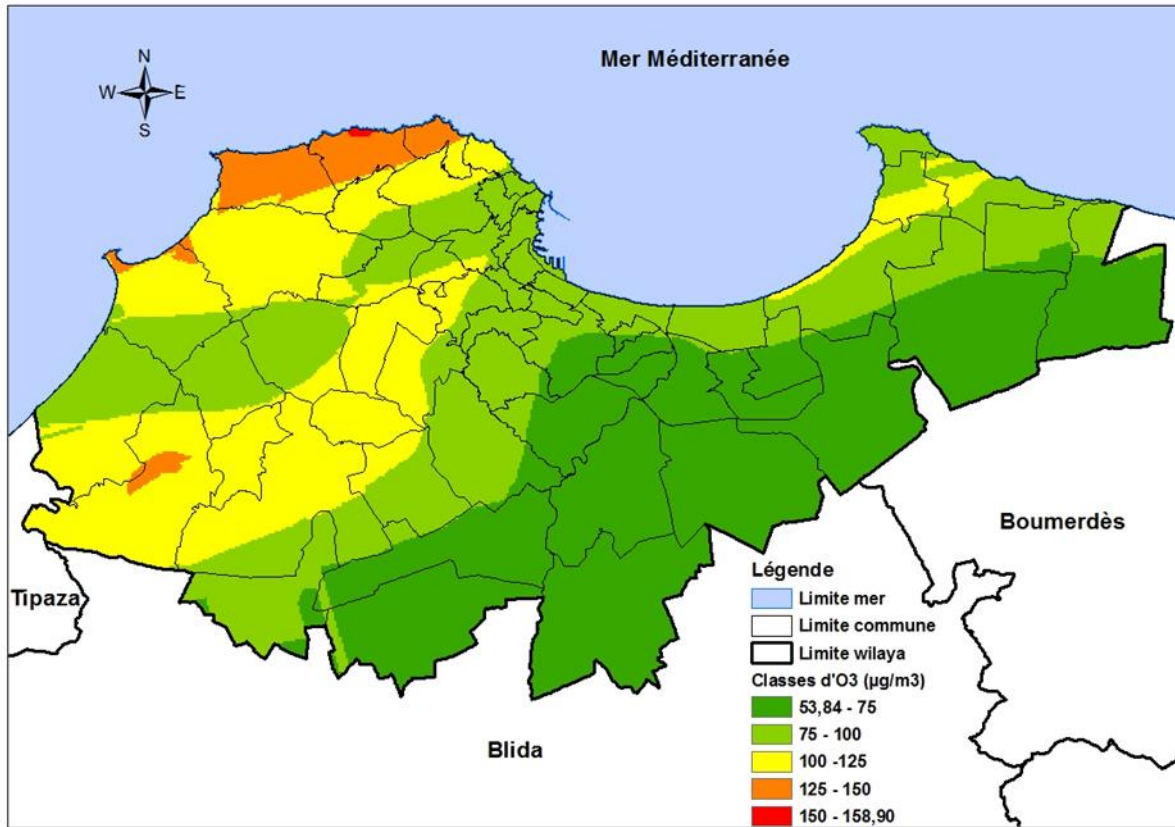
Tableau 07 : Validation statistique de la qualité d'estimation de l'ozone par krigeage ordinaire

Campagnes	RQESM
Hiver	1,021
Deux étés	0,992
Été 2013	1,089
Tous les étés	0,973
Annuelle : Toutes les campagnes	1,013

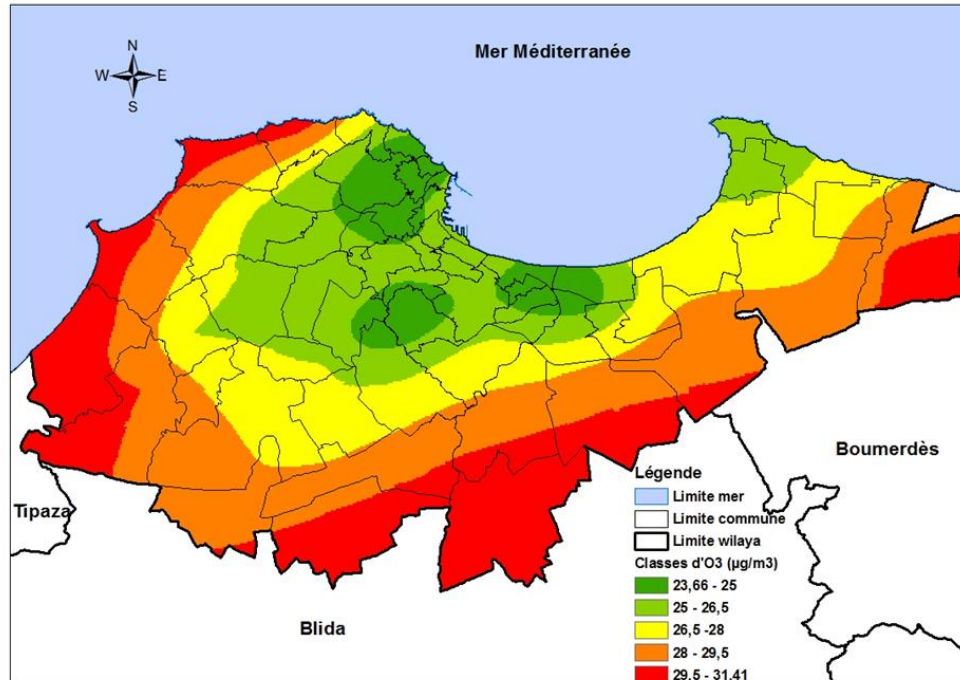
D'après la théorie sur l'analyse géostatistique (voir annexe 01), si la valeur de la RQESM, est inférieure à 1, on aura une sous-estimation, et dans le cas contraire une surestimation. L'étude de la validation statistique (tableau 7) montre que sur l'ensemble des campagnes, cette valeur est très proche de l'unité. Il en résulte, une estimation très significative pour l'ensemble des campagnes étudiées.

III.4.4 Résultats de cartographie : Cartes de distribution de la pollution

Avec les teneurs en ozone mesurées sur l'ensemble des campagnes de mesure, nous avons développé par krigeage ordinaire les cartes de la distribution spatiale de l'ozone. Le krigeage ordinaire des écarts types qui nous permet aussi de calculer l'erreur d'estimation a été également réalisé. Les résultats de la cartographie sont illustrés en figures 25 à 29, respectivement pour les périodes de l'hiver, la moyenne des saisons d'été, l'été 2013, la moyenne annuelle. Chaque figure illustre également la cartographie des écarts types du cas correspondant. Les niveaux moyens de pollution varient de 142,67 à 204,53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les valeurs les plus faibles sont mesurées dans et autour d'Alger-Centre. On observe que c'est surtout la partie Est d'Alger et à un moindre degré la partie Ouest où l'on enregistre les niveaux d'ozone les plus élevés. Globalement, les niveaux augmentent progressivement à partir du centre d'Alger en allant vers l'Est et l'Ouest de la wilaya.

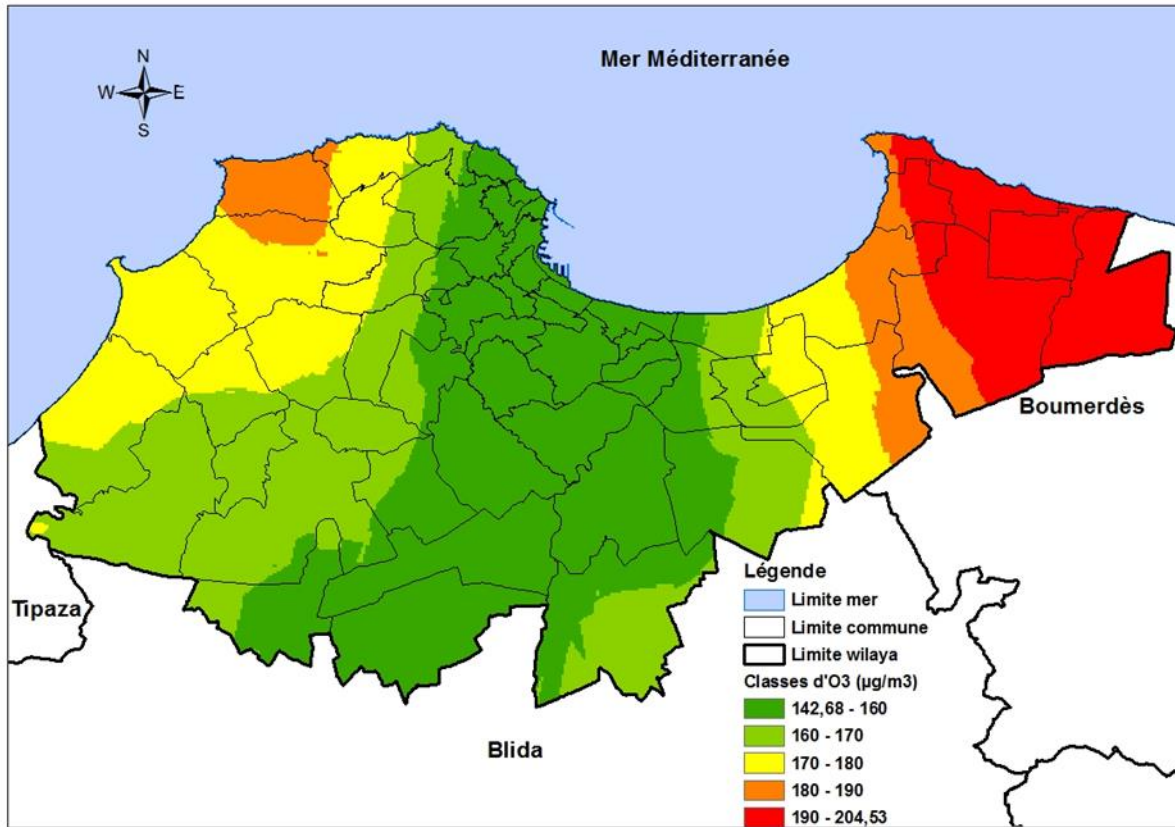


a) Cartographie de la teneur moyenne en ozone de la saison hivernale

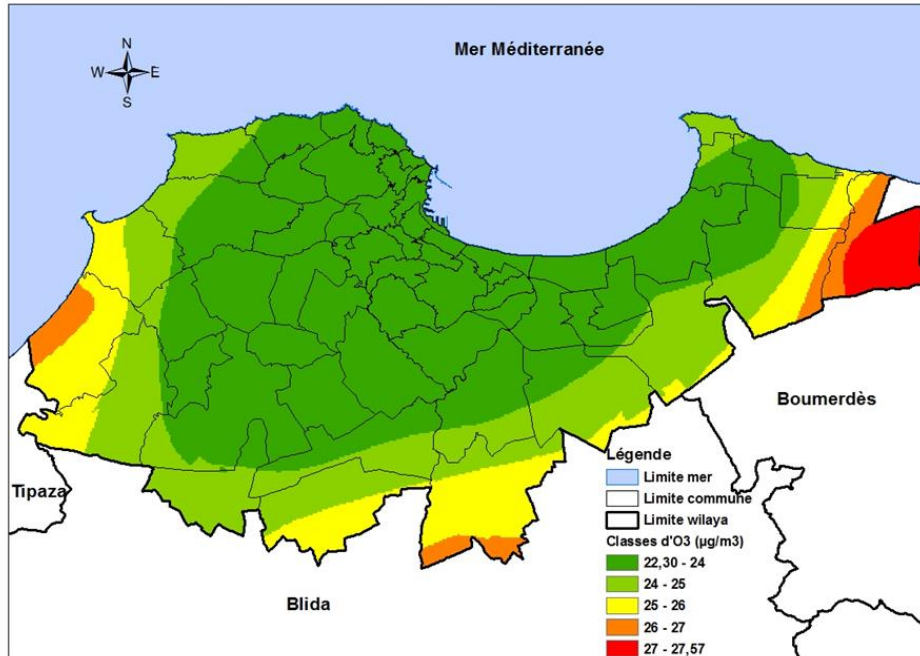


b) Cartographie de l'écart type de la moyenne d'ozone pour la saison hivernale

Figure 25 : Cartographie de la teneur moyenne en ozone (a) et cartographie des écarts-types de la saison hivernale (b)

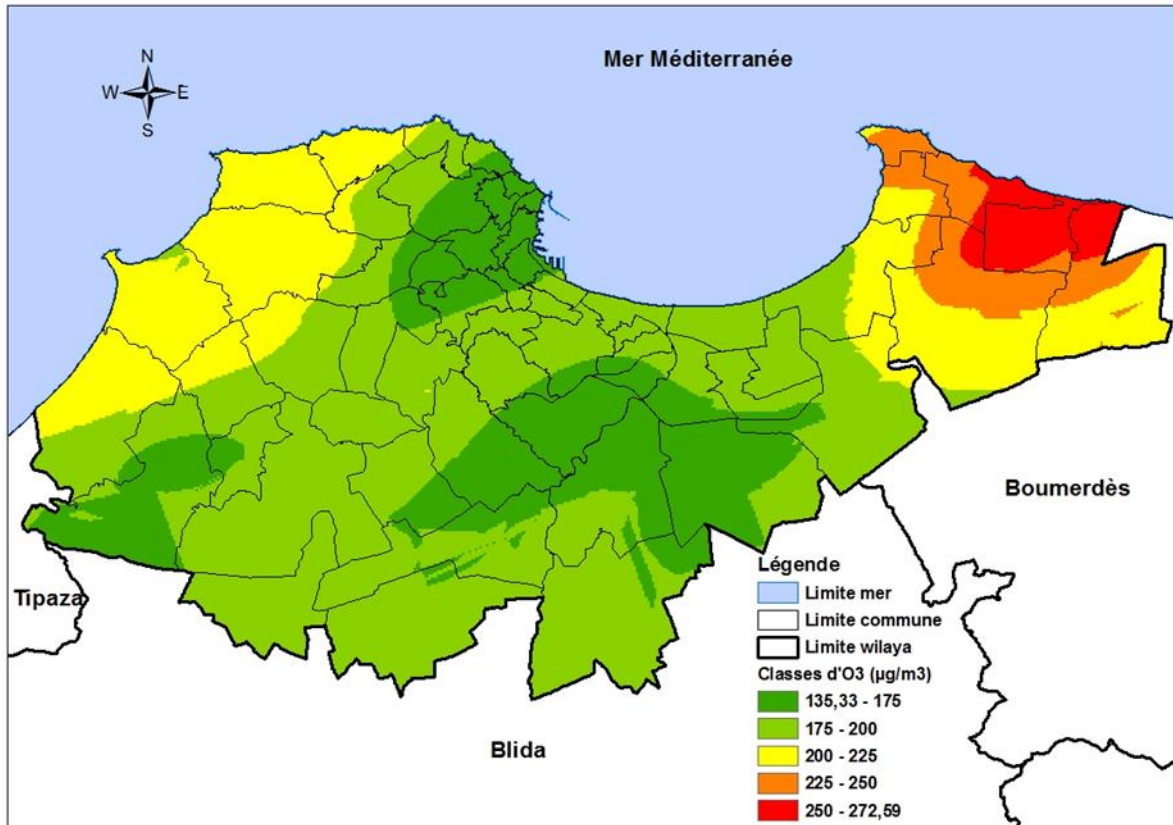


a) Cartographie de la teneur moyenne en ozone des deux étés

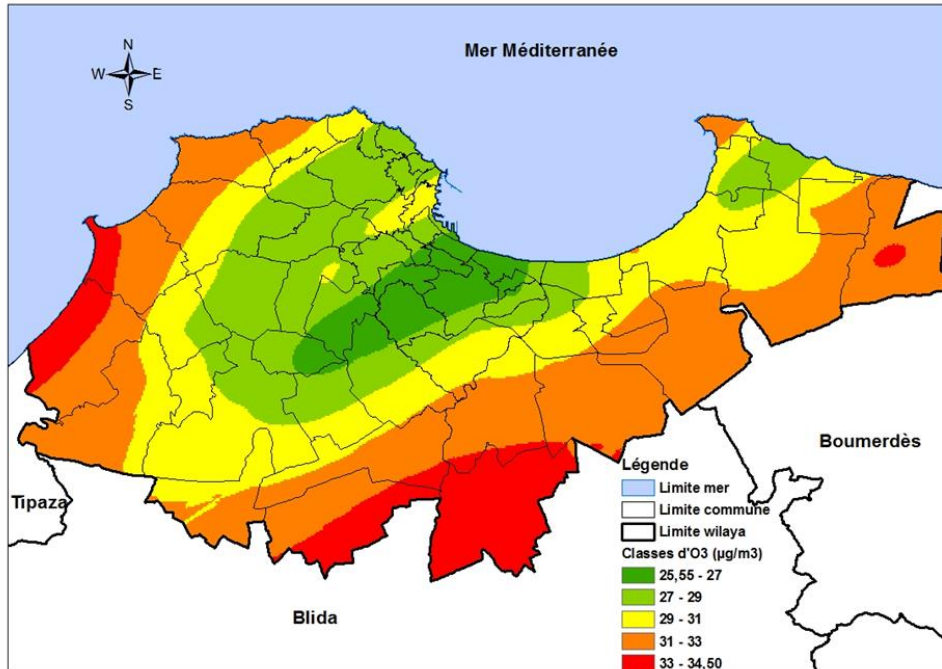


b) Cartographie de l'écart type de la moyenne d'ozone pour les deux étés

Figure 26 : Cartographie de la teneur moyenne en ozone (a) et cartographie des écarts-types des deux étés (b)

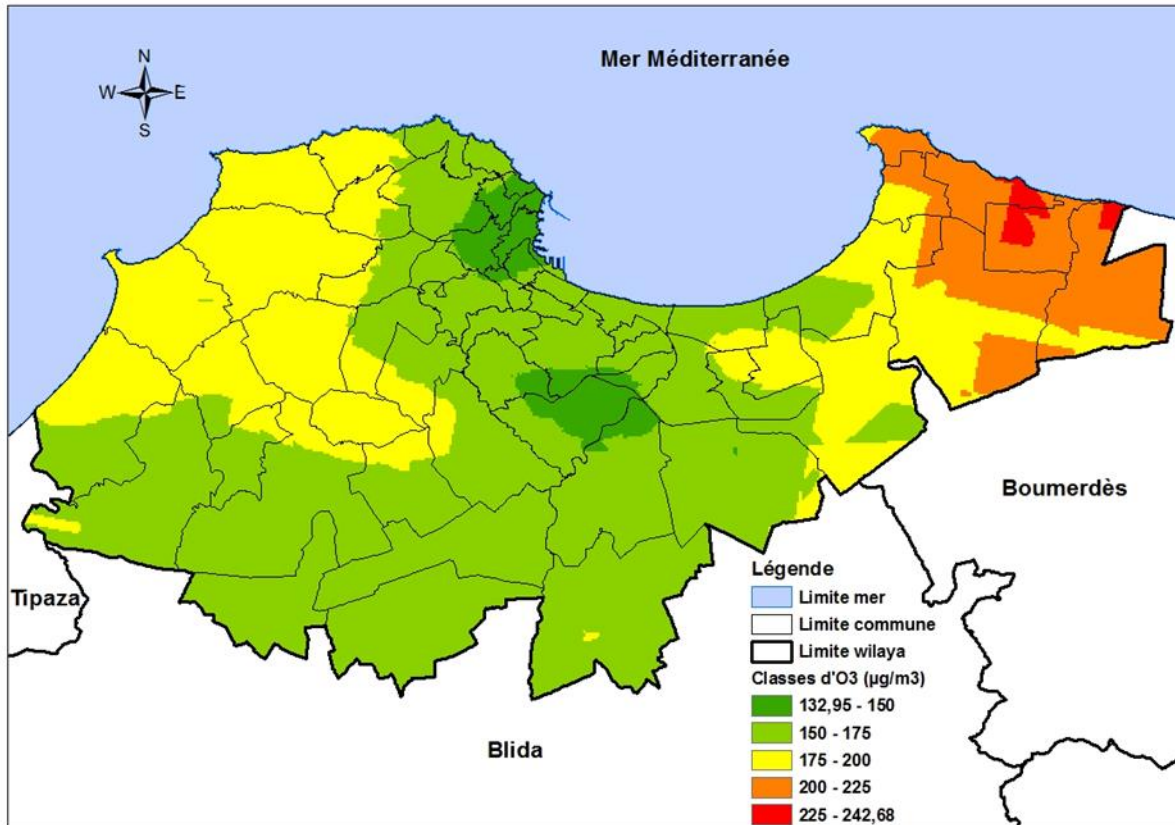


a) Cartographie de la teneur moyenne en ozone pour l'été 2013

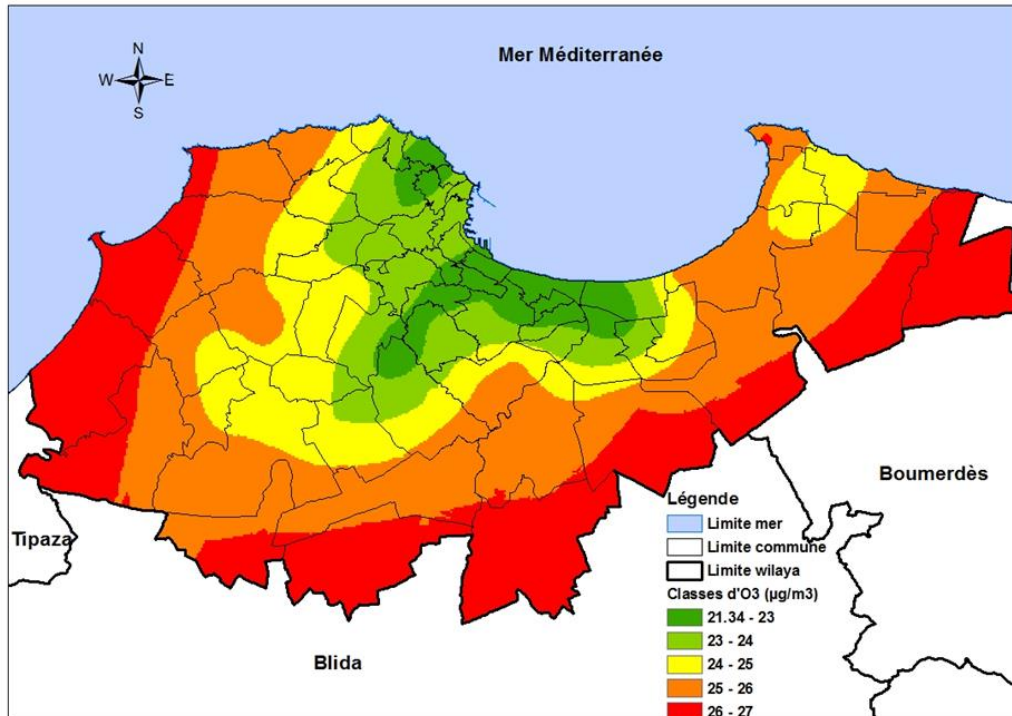


b) Cartographie de l'écart type de la moyenne d'ozone pour l'été 2013

Figure 27 : Cartographie de la teneur moyenne en ozone (a) et cartographie des écarts-types de l'été 2013 (b)

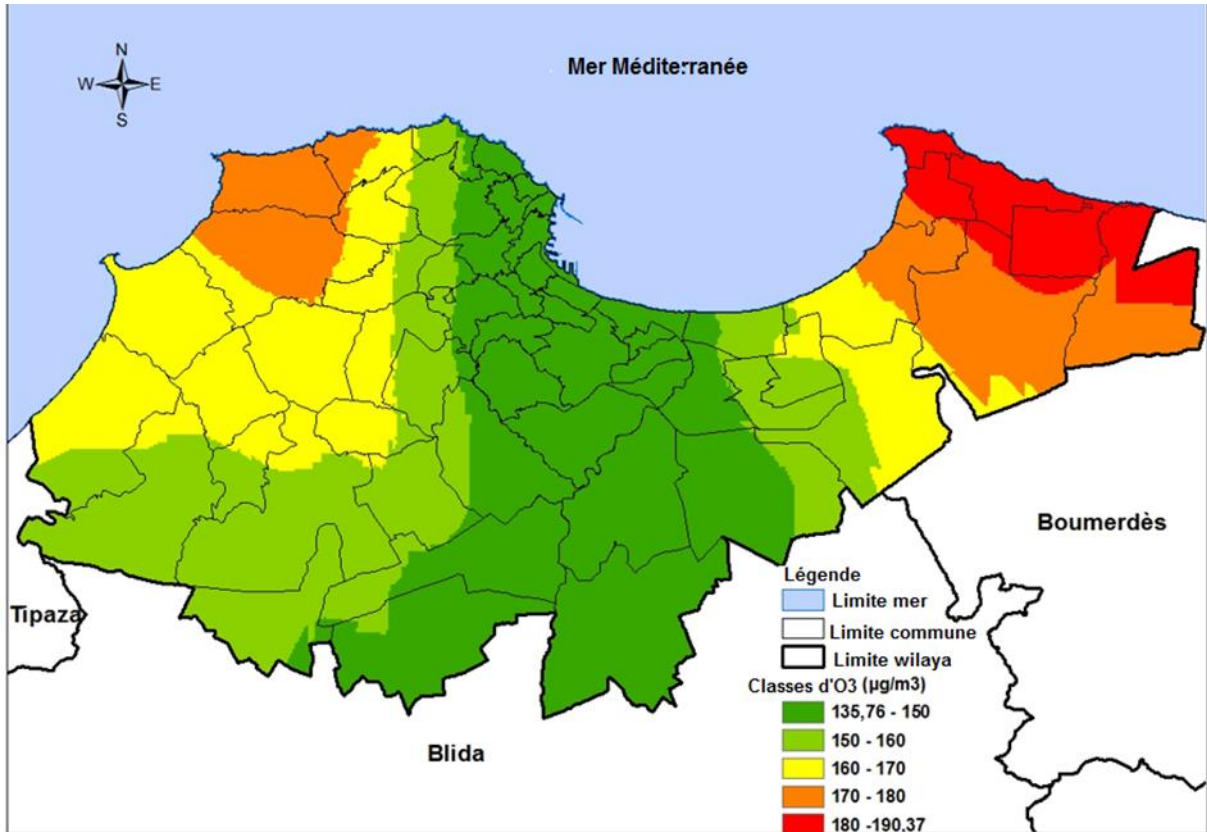


a) Cartographie de la teneur moyenne en ozone des saisons estivales

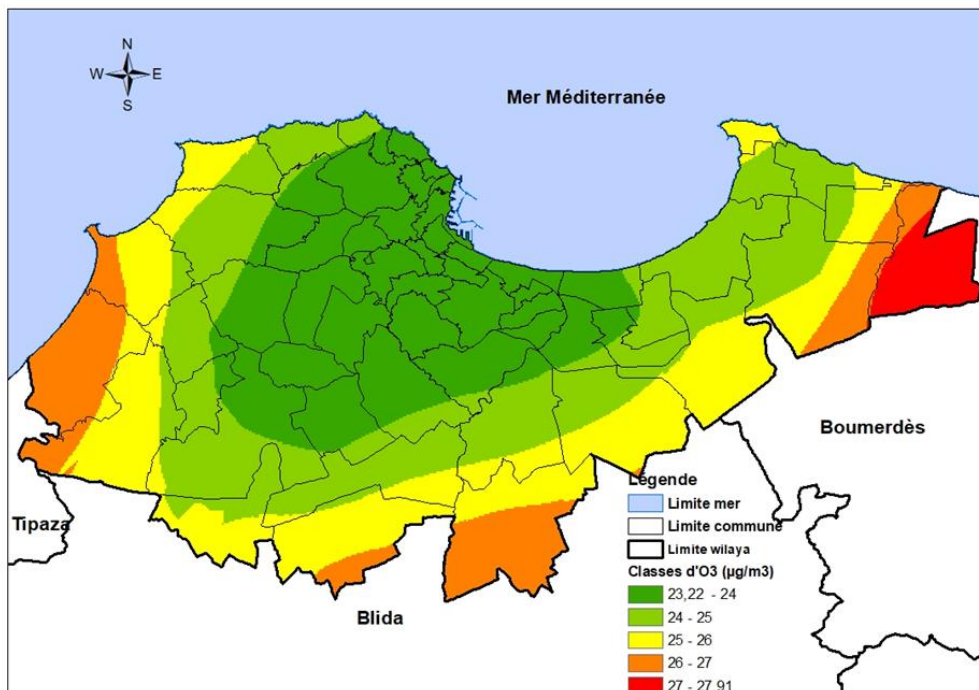


b) Cartographie de l'écart type de la moyenne d'ozone pour les saisons estivales

Figure 28 : Cartographie de la teneur moyenne en ozone (a) et cartographie des écarts-types des saisons estivales (b)



a) Cartographie de la teneur moyenne en ozone de toutes les campagnes de mesure



b) Cartographie de l'écart type de la moyenne d'ozone de toutes les campagnes de mesure

Figure 29 : Cartographie de la teneur moyenne en ozone de toutes les campagnes de mesure

(a) et cartographie des écarts-types (b)

La répartition des valeurs exprimée par l'écart type donné à la figure 30 (b) montre que les niveaux sont relativement homogènes dans la région centrale d'Alger (22,22 à 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et accusent des écarts plus ou moins élevés dans les extrémités Est et Ouest (27,91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Globalement, le nombre élevé de sites étudiés a permis d'avoir un bon lissage de la distribution spatiale de l'ozone.

Comme déjà mentionné, l'ozone est régi par le transport de ses polluants précurseurs (COV et NO_x). L'examen des données météorologiques montre que dans l'agglomération d'Alger, les vents dominants en été sont généralement (NE, ENE, N, W, NW) (ONM 2013). Ces considérations expliquent les niveaux élevés d'ozone mesurés à l'Est et à l'Ouest d'Alger dans les zones où les émissions de précurseurs sont à priori faibles.

Des études antérieures ont montré que le centre d'Alger fait l'objet d'une pollution intense due au trafic routier (Boughédaoui, Chikhi et al. 2009). En effet, le parc automobile algérien s'élevait à 5.123.705 véhicules à la fin 2013 avec 1.326.657 véhicules à Alger, soit 25,89% du parc automobile national. A Alger, les taux de propriété automobile sont de 400 véhicules/1000 habitants, soit plus du double de la moyenne nationale (ONS 2013).

Les données sur les précurseurs à Alger sont très limitées. Les niveaux de NO_x ont atteint des taux de l'ordre de 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (SAMASAFIA 2009). Les BTEX qui sont également un indicateur de pollution des véhicules atteignent souvent des niveaux très élevés d'environ 229,46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kerchich and Kerbach 2012). L'ampleur de ces polluants précurseurs de l'ozone et leur transport est sans doute à l'origine de la formation d'ozone en périphérie du centre-ville dans les zones où les émissions des véhicules sont plus faibles.

Ainsi, les cartes de distribution spatiale de l'ozone dans le grand Alger confirment ce qu'ont suggéré plusieurs auteurs (Kalabokas, Viras et al. 2000), (Jallad and Espada-Jallad 2010), (Carletti and Passerini 2014) sur le rôle du transport de ces polluants par les vents dominants qui sous l'influence des radiations solaires conduisent à la production d'ozone photochimique.

Comme déjà signalé, la formation d'ozone se produit à la suite de la photolyse du NO_2 à des longueurs d'onde inférieures à 424 nm. Une fois formé, O_3 réagit avec NO pour régénérer NO_2 (Voir réactions 10 à 12). En présence de COV, les radicaux OH oxydent le NO et permettent à l'ozone de s'accumuler.

Cette étude cartographique montre clairement quelles sont les zones les plus affectées par l'oxydant ozone et qui, par conséquent, doivent nécessiter une attention particulière (surveillance accrue des impacts, étude épidémiologique, etc.) de la part des décideurs et environnementalistes. Elle donne aussi des indications pour le choix des sites les plus adéquats pour l'implantation de stations de mesure pour un futur monitoring de la pollution par l'ozone.

III.5 Modélisation des résultats

Pour ce travail, nous avons pris en compte les données fournies par le réseau de surveillance de la qualité de l'air « SAMASAFIA » pour l'année 2002 (période du 21 au 24 juin). D'autre part, les émissions utilisées dans le modèle sont tirées de l'Inventaire national des émissions de gaz à effet de serre pour l'an 2000 (Rapport 00039149 / GEF / PNUD) comme seule source d'inventaire des émissions disponibles lors de notre étude. Les paramètres de modélisation RAMS de la période choisie sont présentés en Annexe 05.

Les variations diurnes des concentrations d'O₃ pendant la période de modélisation de quatre jours (du 21 au 24 juin 2002) sont présentées à la figure 30. Les résultats montrent que les concentrations d'ozone au cours de ces quatre jours suivent un cycle diurne caractéristique d'une région polluée avec des concentrations élevées en milieu ou en après-midi, et de faibles teneurs nocturnes ou en début de matinée.

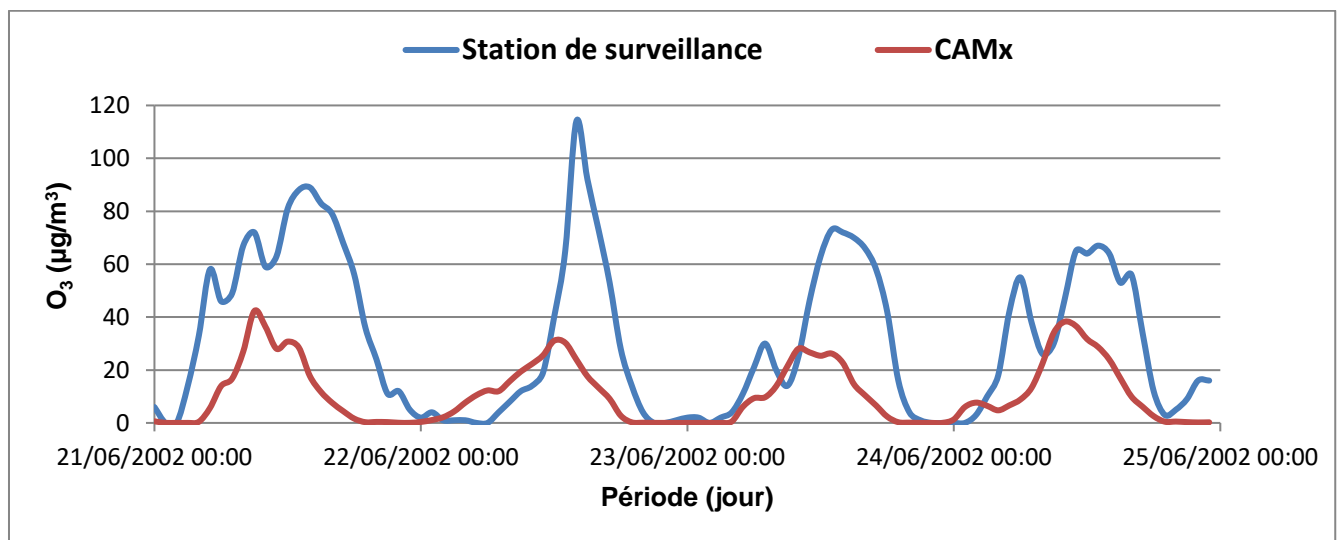


Figure 30 : Cycles diurnes (calculés et mesurés) des concentrations d'ozone

La figure 31 illustre par exemple la variation diurne typique de l'ozone le 23 juin 2002. Ce jour a présenté une valeur minimale à 1:00 du matin et 10:00, c'est-à-dire le minimum d'ozone avant le lever du soleil causé par la destruction de l'ozone au sol et celui coïncidant avec les fortes émissions début du trafic aux heures de pointe matinales. La valeur maximale quotidienne est apparue en début d'après-midi vers 13h00.

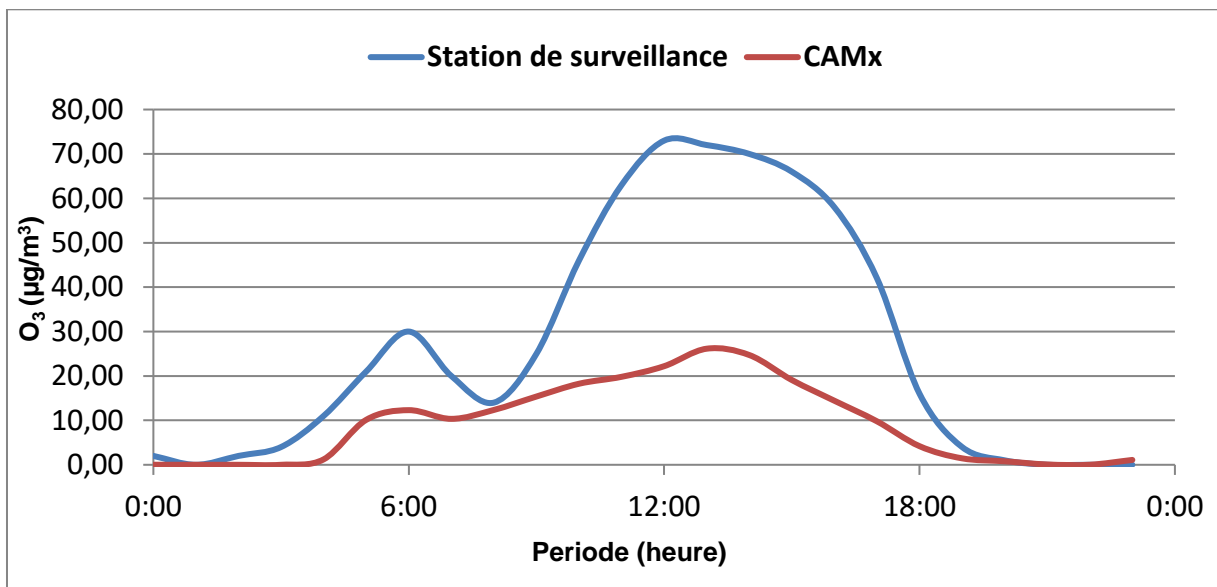


Figure 31 : Cycles diurnes (mesuré et calculé) de l'ozone pour la journée du 23 juin 2002

La comparaison des résultats donnés par le modèle avec les teneurs mesurées par la station de mesure fait ressortir les points suivants :

- Le modèle reproduit la tendance de l'évolution journalière de l'ozone. La nature du cycle diurne (courbe en forme de cloche) donnée par le modèle est plus ou moins conforme à celle résultant des valeurs mesurées.
- Les teneurs calculées sont en général très en dessous des valeurs mesurées par la station de mesure. En raison de l'autoréglage (le modèle a besoin d'au moins deux jours de simulation pour donner des résultats acceptables), les différences sont plus importantes dans les premiers jours de simulation, puis deviennent moindres (figure 30).

Globalement, et au vu de plusieurs incertitudes sur les inputs, on observe que le modèle sous-estime les valeurs réelles. Les inventaires d'émissions sont souvent la plus grande source d'incertitude dans les prédictions de modèles comme le RAMS-EPS3-CAMx.

Étant donné que la sensibilité aux précurseurs de l'ozone dépend de façon critique des taux d'émission des COV anthropiques et des NO_x. En outre, les stratégies de lutte établissent que les concentrations d'ozone sont difficiles à prévoir s'il n'existe pas de données fiables sur les émissions et les concentrations des précurseurs d'ozone, comme c'est le cas en Algérie. Sachant que l'Inventaire national des émissions de gaz à effet de serre pour l'an 2000 contient plusieurs approximations et hypothèses en raison du manque de données sur les émissions, en particulier dans les émissions fugitives. Ceci explique les différences entre les données mesurées et les données prédites. Le modèle reproduit toute fois la tendance mondiale de l'ozone diurne quotidien.

III.6 Comparaison des résultats de modélisation

L'approche utilisée consiste à normaliser relativement aux valeurs moyennes de l'ozone mesurées pour les deux campagnes estivales (sur tous les sites) puis les représenter par la moyenne illustrée en figure 32. De même, une normalisation par rapport à la moyenne des résultats de la modélisation "RAMS-EPS3-CAMx" répartie sur tous les sites de mesure a permis de calculer le taux de contribution à la pollution par l'ozone de l'ensemble des sites de mesure représentés par CAMx2002 (EEA 2015).

Par conséquent, une comparaison de l'évolution du taux de contribution de la pollution par l'ozone de l'ensemble des sites de mesure dans notre étude Figure 32 pour les techniques passives et actives ont été possibles. Cette comparaison montre un accord sur l'évolution de la contribution de pollution pour les deux techniques, à l'exception de certaines différences existantes, en particulier sur les sites 3, 14, 16, 30, 33 et 38 correspondants respectivement aux municipalités (Zeralda, Kouba, Saoula, Bad Ezzouar, Megharia et Ben Aknoun). En ces sites de type urbain nous avons déjà vu figure 26 (b) que, l'écart type par rapport à la pollution par l'ozone était relativement important dans ce type de site.

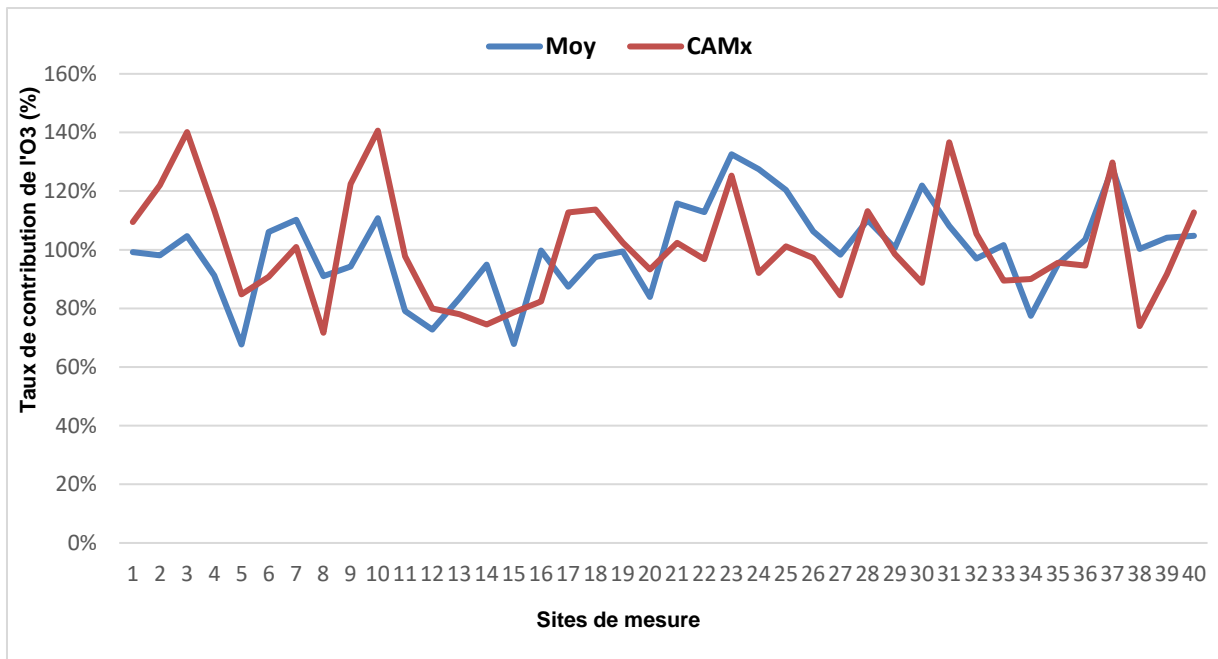


Figure 32 : Evolution du taux de contribution de la pollution par l'ozone

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude montre que la technique d'échantillonnage passif utilisant les tubes à diffusion Radiello, que nous avons introduits pour la première fois en Algérie, convient parfaitement à l'évaluation des niveaux moyens d'ozone troposphérique sur différents types de sites (sites urbains et suburbains). Cette technique nous a permis de déterminer l'ampleur de la pollution de l'air par l'ozone et sa répartition spatiale dans la vaste agglomération d'Alger. Quatre campagnes de mesures ont été réalisées sur une cinquantaine de sites répartis sur toutes les communes de la Wilaya d'Alger.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en ozone varient, selon le site et la période étudiés de 44,26 à 295,95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les teneurs atmosphériques moyennes en O_3 s'élèvent à 145 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 161,98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement pour les sites urbains et suburbains.

Les niveaux les plus élevés sont observés dans les zones suburbaines où l'ozone se forme sous l'effet du transport des précurseurs et les radiations solaires. Ce résultat qui est en accord avec les observations faites dans d'autres villes, semble être une caractéristique de la pollution photochimique.

L'étude des variations saisonnières montre que les teneurs les plus élevées sont enregistrées pendant la période estivale. Le rapport entre les teneurs estivales et teneurs hivernales est de l'ordre de 1,9. Ce résultat montre l'influence du rayonnement solaire et la haute réactivité photochimique des précurseurs de l'ozone qui sont principalement les NO_x et les COV. A Alger, ces précurseurs proviennent essentiellement des émissions du trafic routier du milieu urbain.

En raison des températures élevées et du fort ensoleillement, les niveaux d'ozone mesurés à Alger sont supérieurs à ceux relevés dans un grand nombre de villes du pourtour méditerranéen. L'étude montre également que les normes régissant l'ozone sont très souvent dépassées aussi bien en ce qui concerne la protection de la santé que celle de la végétation.

Le nombre et la variété des sites étudiés nous ont permis de développer la cartographie de la pollution de l'air par l'ozone dans le grand Alger. Cette cartographie élaborée par ArcGis en utilisant la technique du krigeage, visualise les zones de la ville qui sont le plus exposées à la pollution par l'ozone et qui doivent faire l'objet d'une attention particulière. Cette répartition spatiale de l'ozone montre que ce sont surtout la partie est d'Alger et à un moindre degré, la partie ouest qui font l'objet d'une intense pollution photochimique. Globalement, et pour toutes

Conclusion générale

les saisons, les niveaux augmentent progressivement à partir du centre d'Alger allant vers l'Est et l'Ouest de la ville.

L'application du modèle RAMS-EPS3-CAMx montre qu'il existe une bonne concordance entre les profils diurnes mesurés et prédits. Le modèle confirme que les concentrations d'ozone troposphérique suivent une distribution diurne caractéristique avec des concentrations élevées en début d'après-midi, lorsque le rayonnement et la température favorisent la formation d'ozone, et de faibles concentrations pendant la nuit. Cependant, le modèle abouti à une sous-estimation des valeurs réelles mesurées sur site. L'écart observé est dû, en particulier, au manque de données dans l'inventaire des émissions de précurseurs d'ozone. Les résultats du modèle dépendent directement de la qualité et de la précision des émissions introduites dans le modèle. En outre, la comparaison donne un accord global sur l'évolution du taux de contribution de la pollution par l'ozone de l'ensemble des sites de mesure.

Ainsi, le modèle testé peut être utilisé pour des études de prédiction et devrait permettre, lorsqu'on dispose de tous les imputs nécessaires, de simuler avec une bonne approximation les évolutions de l'ozone troposphérique.

Globalement et à la lumière de l'ensemble des résultats obtenus, nous pouvons conclure qu'à Alger, la pollution par l'ozone troposphérique dans les zones urbaines et suburbaines est préoccupante en raison de son ampleur et de son évolution future, sachant que les changements climatiques sont un facteur aggravant.

L'ampleur de cette pollution est également due à la forte croissance du trafic routier urbain ces dernières années, où Alger totalise désormais le quart du parc automobile national. En outre, l'étude a été en mesure de fournir des données importantes pouvant être utilisées pour aider les autorités et les décideurs à définir des plans locaux de gestion de la qualité de l'air et à mieux informer la population.

Enfin, les résultats de cette étude peuvent être considérés comme étant représentatifs des villes des pays du sud de la Méditerranée qui ont le même climat et un développement socio-économique similaire.

Bibliographie

Abbès Zineb. (2014). "Les importations de véhicules en recul en 2013." 2020, from <https://www.algerie1.com/economie/les-importations-de-vehicules-en-recul-en-2013>.

Abderrahim, H., M. R. Chellali and A. Hamou (2016). "Forecasting PM 10 in Algiers: Efficacy of multilayer perceptron networks." Environmental Science and Pollution Research **23**(2): 1634-1641.

Academie des Sciences (1993). Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère. Paris: p262.

Airparif, A. (2017). "Règlementation : Normes Européennes." Retrieved May, 2017, from www.airparif.asso.fr.

Alejo, D., M. C. Morales, V. Nuñez, L. Bencs, R. Van Grieken and P. Van Espen (2011). "Monitoring of tropospheric ozone in the ambient air with passive samplers." Microchemical Journal **99**(2): 383-387.

APRUE (Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie) (2012). Final report, "Consommation Energétique Finale de l'Algérie, Chiffres clés Année 2012".

Ashmore, M. (2005). "Assessing the future global impacts of ozone on vegetation." Plant, Cell & Environment **28**(8): 949-964.

Aubry, P. (2000). "Le traitement des variables régionalisées en écologie." Apports de la géomatique et de la géostatistique. These de doctorat. Université Lyon I, Lyon.

Bagard, M., D. Le Thiec, E. Delacote, M. P. Hasenfratz-Sauder, J. Banvoy, J. Gérard, P. Dizengremel and Y. Jolivet (2008). "Ozone-induced changes in photosynthesis and photorespiration of hybrid poplar in relation to the developmental stage of the leaves." Physiologia Plantarum **134**(4): 559-574.

Barnea, A. (1974). "Performance evaluation of New York stock exchange specialists." Journal of Financial and Quantitative Analysis **9**(4): 511-535.

Beck, J. P., C. E. Reeves, F. A. De Leeuw and S. A. Penkett (1992). "The effect of aircraft emissions on tropospheric ozone in the northern hemisphere." Atmospheric Environment. Part A. General Topics **26**(1): 17-29.

Belhocine, M. and N. Ait-Khaled (1991). "Prevalence of asthma in a region of Algeria." Bulletin of the International Union against Tuberculosis and Lung Disease **66**(2-3): 91-93.

Bernhardt-Römermann, M., M. Kirchner, T. Kudernatsch, G. Jakobi and A. Fischer (2006). "Changed vegetation composition in coniferous forests near to motorways in Southern Germany: the effects of traffic-born pollution." Environmental pollution **143**(3): 572-581.

Boivin, P., D. Brunet and J.-O. Job (1988). "Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés: une méthode rapide et fiable." Cahiers ORSTOM. Série Pédologie **24**(1): 39-48.

Boughédaoui, M., S. Chikhi, N. Driassa, R. Kerbach and R. Joumard (2009). Caractérisation du parc de véhicule algérien et son usage. Colloque international Environnement et transports dans des contextes différents, ENP ed.

Bibliographie

- Boughédaoui, M., R. Joumard and R. Kerbachi (2008). "On-board emission measurement of high-loaded light-duty vehicles in Algeria." Journal of the Air & Waste Management Association **58**(1): 45-54.
- Britz, S. J. and J. M. Robinson (2001). "Chronic ozone exposure and photosynthate partitioning into starch in soybean leaves." International Journal of Plant Sciences **162**(1): 111-117.
- Buchard, V., P. Helfer, P. Mattle and C. et Muller (2000). Etude de la Pollution Atmosphérique Transfrontalière (EPAT) Rapport de campagne d'étude. Lausanne.
- BUCHARD, V., P. HELFER, P. MATTLE and C. MULLER (2000). « Etude de la Pollution Atmosphérique Transfrontalière (EPAT), rapport de campagne d'étude ». . Lausanne, .
- Butler, J. D. (1979). Air pollution chemistry, Academic Press.
- Caballero, S., N. Galindo, C. Pastor, M. Varea and J. Crespo (2007). "Estimated tropospheric ozone levels on the southeast Spanish Mediterranean coast." Atmospheric Environment **41**(13): 2881-2886.
- Carletti, S. and G. Passerini (2014). "Tropospheric ozone behaviour as a function of precursor emissions." WIT Transactions on Ecology and the Environment **181**: 3-14.
- Carter, W. P. (2000). "ADDITIONS AND CORRECTIONS TO THE SAPRC-99 MAXIMUM INCREMENTAL REACTIVITY (MIR) SCALE."
- Castagna, A. and A. Ranieri (2009). "Detoxification and repair process of ozone injury: from O₃ uptake to gene expression adjustment." Environmental Pollution **157**(5): 1461-1469.
- CDER, (Centre de Développement des Energies Renouvelables) (2013). 'Réseau CHEMS'. Service Réseau et Instrumentation.
- Cesaroni, G., F. Forastiere, M. Stafoggia, Z. J. Andersen, C. Badaloni, R. Beelen, B. Caracciolo, U. de Faire, R. Erbel and K. T. Eriksen (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.
- Chaxel, E. (2001). Mise en place d'une méthodologie pour la cartographie de l'ozone à l'échelle du département de l'Isère, ASCOPARG.
- Chen, T. Y., T. Tse and Y.-T. Yu (2001). "Proportional sampling strategy: a compendium and some insights." Journal of Systems and Software **58**(1): 65-81.
- Chikhi, R. and P. Medvedev (2014). "Informed and automated k-mer size selection for genome assembly." Bioinformatics **30**(1): 31-37.
- Cooper, S. and D. Peterson (2000). "Spatial distribution of tropospheric ozone in western Washington, USA." Environmental Pollution **107**(3): 339-347.
- Delhomme, J. (1976). "Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau (variabilité spatiale des grandeurs hydroclimatiques et hydrogéologiques & précision de leur connaissance)." These de docteur Ingénieur, université Pierre et Marie Curie, Paris-6.
- Delmas, R., G. Mégie and V.-H. Peuch (2005). Physique et chimie de l'atmosphère, Belin.
- Deraisme, J. and M. Bobbia (2003). "L 'apport de la géostatistique à l 'étude des risques liés à la pollution atmosphérique." Environnement, Risques & Santé **2**(3): 168-175.

Bibliographie

- Derwent, R. G., M. E. Jenkin, S. M. Saunders and M. J. Pilling (1998). "Photochemical ozone creation potentials for organic compounds in northwest Europe calculated with a master chemical mechanism." Atmospheric environment **32**(14-15): 2429-2441.
- Derwent, R. G., M. E. Jenkin, S. M. Saunders and M. J. Pilling (2001). "Characterization of the reactivities of volatile organic compounds using a master chemical mechanism." Journal of the Air & Waste Management Association **51**(5): 699-707.
- Douaoui, A. (1993). "Contribution à l'étude des sols des plaines du Chélif: Variabilité spatiale es quelques propriétés physico-chimiques des sols du moyen Chélif, indices cartographiques." Mém. Mag., INA, Alger, 129p.
- Douaoui, A. (2005). Variabilité spatiale de la salinité en relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chélif. Apport de la géostatistique et de la télédétection, Thèse Doct. d'Etat, INA-Alger.
- Droesbeke, J.-J., M. Lejeune and G. Saporta (2006). Analyse statistique des données spatiales, Editions TECHNIP.
- Dueñas, C., M. Fernández, S. Canete, J. Carretero and E. Liger (2004). "Analyses of ozone in urban and rural sites in Málaga (Spain)." Chemosphere **56**(6): 631-639.
- EEA, E. E. A. (2015). "'Air pollutant concentrations at station level (statistics)'. " Data Prod-ID: DAT-150-en(Created 26 Nov 2015 Published 12 Oct 2017).
- ENVIRON, I. C. (2010). USER'S GUIDE "CAMx : Ozone, Particulates, Toxics". California. VERSION 5.30.
- Felzer, B. S., T. Cronin, J. M. Reilly, J. M. Melillo and X. Wang (2007). "Impacts of ozone on trees and crops." Comptes Rendus Geoscience **339**(11-12): 784-798.
- Feng, Z. and K. Kobayashi (2009). "Assessing the impacts of current and future concentrations of surface ozone on crop yield with meta-analysis." Atmospheric Environment **43**(8): 1510-1519.
- Fiscus, E. L., F. L. Booker and K. O. Burkey (2005). "Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning." Plant, Cell & Environment **28**(8): 997-1011.
- Fondazione Salvatoremaugeri-Irccs (2004). Manuel Radiello. C. d. R. Environnementales. PADOVA, Italie.
- Gagne, M. (1999). Etude géostatistique de la conductivité hydraulique en milieu stratifié, application aux résidus miniers. Thèse DEA, Ecole polytechnique, Montréal.
- Garrec, J.-P. and C. Delzenne-Van Haluwyn (2002). Biosurveillance végétale de la qualité de l'air: concepts, méthodes et applications, Éditions Tec & Doc.
- Gascuel-Odoux, C. and P. Boivin (1994). "Variability of variograms and spatial estimates due to soil sampling: a case study." Geoderma **62**(1-3): 165-182.
- Gery, M. W., G. Z. Whitten, J. P. Killus and M. C. Dodge (1989). "A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **94**(D10): 12925-12956.

Bibliographie

- Gómez-Mendikute, A., A. Etxebarria, I. Olabarrieta and M. P. Cajaraville (2002). "Oxygen radicals production and actin filament disruption in bivalve haemocytes treated with benzo (a) pyrene." Marine environmental research **54**(3-5): 431-436.
- Guicherit, R. and M. Roemer (2000). "Tropospheric ozone trends." Chemosphere-Global Change Science **2**(2): 167-183.
- Haagen-Smit, A., E. F. Darley, M. Zaitlin, H. Hull and W. Noble (1952). "Investigation on injury to plants from air pollution in the Los Angeles area." Plant Physiology **27**(1): 18.
- Hsu, K.-J. (2007). "Relationships between ten-year trends of tropospheric ozone and temperature over Taiwan." Science of the total environment **374**(1): 135-142.
- INSPQ (2012). Bilan de la qualité de l'air au Québec en lien avec la santé, 1975-2009, Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Institut National de Santé Publique du Québec.
- IPCC (1999). Emission Inventory Guidbook : Part B "IPCC96 vs SNAP97".
- Jallad, K. N. and C. Espada-Jallad (2010). "Analysis of ambient ozone and precursor monitoring data in a densely populated residential area of Kuwait." Journal of Saudi Chemical Society **14**(4): 363-372.
- Jenkin, M. E. and K. C. Clemitshaw (2000). "Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer." Atmospheric environment **34**(16): 2499-2527.
- JORA (Journal Officiel de la République Algérienne) (2006). Les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique. N°01.
- Joumard, R. (1989). "Pollution de l'air due au trafic dans les pays en développement." RECHERCHE TRANSPORT SECURITE(22).
- Journel, A. G. (1977). "Kriging in terms of projections." Journal of the International Association for Mathematical Geology **9**(6): 563-586.
- Kalabokas, P. and C. Repapis (2004). "A climatological study of rural surface ozone in central Greece."
- Kalabokas, P. D., L. G. Viras, J. G. Bartzis and C. C. Repapis (2000). "Mediterranean rural ozone characteristics around the urban area of Athens." Atmospheric Environment **34**(29-30): 5199-5208.
- Kerbachi, R., M. Boughedaoui, L. Bounoua and M. Keddou (2006). "Ambient air pollution by aromatic hydrocarbons in Algiers." Atmospheric Environment **40**(21): 3995-4003.
- Kerbachi, R., M. Boughedaoui and N. Koutai (1996). Etude de l'ozone troposphérique et de ses précurseurs, les oxydes d'azotes, à Alger. Actes de la deuxième conférence maghrébine de génie des procédés (COMAGEP 2). 2ème partie, L'environnement, ENIG. **Volume 1**.
- Kerbachi, R., N. Koutai, T. Lakki and M. Boughedaoui (1998). "The nitrogen oxides and ozone pollution in Algiers; La pollution par les oxydes d'azote et l'ozone a Alger."
- Kerchich, Y. and R. Kerbachi (2012). "Measurement of BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene) levels at urban and semirural areas of Algiers City using passive air samplers." Journal of the Air & Waste Management Association **62**(12): 1370-1379.

Bibliographie

- Khatraoui, H. (2009). Contribution à l'étude de la pollution de l'air par les composés aromatiques BTX cartographie de la pollution à Alger Mémoire de Magister, Département Génie de l'Environnement, Ecole Nationale Polytechnique.
- Khedidji, S., R. Ladji and N. Yassaa (2013). "A wintertime study of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in indoor and outdoor air in a big student residence in Algiers, Algeria." Environmental Science and Pollution Research **20**(7): 4906-4919.
- Kiros, F., K. M. Shakya, M. Rupakheti, R. P. Regmi, R. Maharjan, R. M. Byanju, M. Naja, K. Mahata, B. Kathayat and R. E. Peltier (2016). "Variability of anthropogenic gases: Nitrogen oxides, sulfur dioxide, ozone and ammonia in Kathmandu Valley, Nepal." Aerosol Air Qual. Res **16**: 3088-3101.
- Korek, M. J., T. D. Bellander, T. Lind, M. Bottai, K. M. Eneroth, B. Caracciolo, U. H. De Faire, L. Fratiglioni, A. Hilding and K. Leander (2015). "Traffic-related air pollution exposure and incidence of stroke in four cohorts from Stockholm." Journal of exposure science & environmental epidemiology **25**(5): 517-523.
- Krzyscin, J., P. Krizan and J. Jarosławski (2007). "Long-term changes in the tropospheric column ozone from the ozone soundings over Europe." Atmospheric environment **41**(3): 606-616.
- Kulkarni, P. S., D. Bortoli, R. Salgado, M. Antón, M. J. Costa and A. M. Silva (2011). "Tropospheric ozone variability over the Iberian Peninsula." Atmospheric Environment **45**(1): 174-182.
- Ladji, R., N. Yassaa, C. Balducci and A. Cecinato (2014). "Particle size distribution of n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHS) in urban and industrial aerosol of Algiers, Algeria." Environmental Science and Pollution Research **21**(3): 1819-1832.
- Laïd, Y., M. Atek, R. Oudjehane, L. Filleul, L. Baough, N. Zidouni, M. Boughedaoui and J. Tessier (2006). "Impact sanitaire de la pollution de l'air par les PM10 dans une ville du sud: le cas d'Alger." Int J Tuberc Lung Dis **10**(12): 1406-1411.
- Leighton, A. H. and J. M. Hughes (1961). "Cultures as a causative of mental disorder." The Milbank Memorial Fund Quarterly **39**(3): 446-488.
- Lin, C.-Y. C., D. J. Jacob and A. M. Fiore (2001). "Trends in exceedances of the ozone air quality standard in the continental United States, 1980–1998." Atmospheric Environment **35**(19): 3217-3228.
- LISA (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques) (2017). from [http://www.lisa,u-pec.fr](http://www.lisa.u-pec.fr).
- Liu, L., A. Liu, Y. Li, L. Zhang, G. Zhang and Y. Guan (2016). "Polycyclic aromatic hydrocarbons associated with road deposited solid and their ecological risk: Implications for road stormwater reuse." Science of the Total Environment **563**: 190-198.
- Liu, S., D. Kley, M. McFarland, J. Mahlman and H. Levy (1980). "On the origin of tropospheric ozone." Journal of Geophysical Research: Oceans **85**(C12): 7546-7552.
- Maltby, L., D. M. Forrow, A. B. Boxall, P. Calow and C. I. Betton (1995). "The effects of motorway runoff on freshwater ecosystems: 1. Field study." Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal **14**(6): 1079-1092.
- Marenco, A. (1986). "Variations of CO and O3 in the troposphere: evidence of O3 photochemistry." Atmospheric Environment (1967) **20**(5): 911-918.

Bibliographie

- Martin, D. P., P. Lemey, M. Lott, V. Moulton, D. Posada and P. Lefevre (2010). "RDP3: a flexible and fast computer program for analyzing recombination." Bioinformatics **26**(19): 2462-2463.
- Masclat, P. (2005). Pollution atmosphérique: causes, conséquences, solutions, perspectives, Ellipses.
- Masclat, P. (2005). Pollution atmosphérique: causes, conséquences, solutions, perspectives: environnement, Ellipses.
- MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement) (2000). Rapport National sur l'Etat de l'Environnement, RNE. Alger, Algérie.
- Matheron, G. (1965). Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature, Masson et CIE.
- MEGIE, G. (1988). "Les modifications chimiques de l'atmosphère et leurs effets sur l'environnement." Pollution atmosphérique **30**(117): 5-11.
- Mills, G., A. Buse, B. Gimeno, V. Bermejo, M. Holland, L. Emberson and H. Pleijel (2007). "A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops." Atmospheric Environment **41**(12): 2630-2643.
- Moncef, T., D. M. Reda and B. Houria (2016). "Influence of climatic parameters on the distribution of air pollutants and public health in Annaba (East of Algeria)." International Journal of Medical Research & Health Sciences **5**(7): 118-124.
- 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 **72**: 38-42.
- Mourad, T. and N. Noureddine (2016). Evaluation de l'impact sanitaire des facteurs de risque sur la pathologie respiratoire vue en urgence Cas de la pollution urbaine.
- Oltmans, S., A. Lefohn, J. Harris, I. Galbally, H. Scheel, G. Bodeker, E. Brunke, H. Claude, D. Tarasick and B. Johnson (2006). "Long-term changes in tropospheric ozone." Atmospheric Environment **40**(17): 3156-3173.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2016). Ambient Air Pollution : A global assessment of exposure and burden of disease. W. H. Organ: 1-131.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2017). "Recommandations de l'OMS." Retrieved Mai 2017, 2017, from www.respire-asso.org.
- ONM (Office National de la Météorologie) (2013). "Données météorologiques d'Alger". Service commercial.
- ONS (Office National des Statistiques) (2011). "Annuaire Statistique de la Wilaya d'Alger." Retrieved Avril 2011, 2011, from <http://www.ons.dz>
- ONS (Office National des Statistiques) (2013). Retrieved 30 Mars 2013, 2013 from <http://www.ons.dz>
- ONS (Office National des Statistiques) (2017). Retrieved December 2017, 2017, from <http://www.ons.dz>

Bibliographie

- Özbay, B., G. A. Keskin, Ş. Ç. Doğruparmak and S. Ayberk (2011). "Predicting tropospheric ozone concentrations in different temporal scales by using multilayer perceptron models." Ecological informatics **6**(3-4): 242-247.
- Pehnec, G., V. Vadić, I. Bešlić and S. Žužul (2009). "Summer Ozone Concentrations in Zagreb Area." Arhiv za higijenu rada i toksikologiju **60**(1): 35-42.
- SAMASAFIA (2009). Billan Annuel 2009, Réseau de Surveillance de La Qualité de l'Air d'Alger. Algérie.
- Säumel, I., I. Kotsyuk, M. Hölscher, C. Lenkerei, F. Weber and I. Kowarik (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." Environmental Pollution **165**: 124-132.
- Seinfeld, J. H. and S. N. Pandis (2016). Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, John Wiley & Sons.
- Singh, M. G. and A. Titli (1978). Systems: decomposition, optimisation, and control, Pergamon.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor and H. Miller (2007). "IPCC fourth assessment report (AR4)." Climate change.
- Song, C., L. Wu, Y. Xie, J. He, X. Chen, T. Wang, Y. Lin, T. Jin, A. Wang and Y. Liu (2017). "Air pollution in China: status and spatiotemporal variations." Environmental pollution **227**: 334-347.
- Talbi, A., Y. Kerchich, R. Kerbachi and M. Boughedaoui (2018). "Assessment of annual air pollution levels with PM1, PM2. 5, PM10 and associated heavy metals in Algiers, Algeria." Environmental Pollution **232**: 252-263.
- Tarasova, O. and A. Y. Karpetchko (2003). "Accounting for local meteorological effects in the ozone time-series of Lovozero (Kola Peninsula)."
- Terniche, M. (2016). Evaluation de l'impact sanitaire des facteurs de risque sur la pathologie Thèse de Doctorat en Sciences Médicales, Université Benyoucef Benkhedda.
- TwoBeTechnologies (2005). Mode d'emploi "Analyseur d'ozone modèle 202". Manuel
- U.S. EPA, U. S. E. A. A. (2006). Air quality criteria for ozone and other photochemical oxidants: p93.
- Voltz, M. (1986). Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en milieu alluvial: essai de cartographie quantitative des paramètres hydrodynamiques.
- Wackernagel, H. (1993). "Cours de géostatistique multivariée." ENSMP, Fontainebleau, France.
- Walter, C. (1990). Estimation des propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle : Cartographie pédologique et géostatistique dans le sud de l'Île et vilaine (France). Thèse Doctorat Université de Paris VI.
- Walter, C. (2002). Cours de géostatistique, -. ENSA. Rennes, France INRA
- Webster, R. (1985). Quantitative spatial analysis of soil in the field. Advances in soil science, Springer: 1-70.
- Wittig, V. E., E. A. Ainsworth and S. P. Long (2007). "To what extent do current and projected increases in surface ozone affect photosynthesis and stomatal conductance of trees? A meta-analytic review of the last 3 decades of experiments." Plant, cell & environment **30**(9): 1150-1162.

Bibliographie

Wroblewski, A., V. Riffault and e. al (2007). Adaptation des plans d'échantillonnage aux objectifs des compagnes d'échantillonnage spatial. Guide de recommandation, Ecole d'Ingénieur Centre de Recherche, Mines de Douai

Yaiche, M. R. and A. Bouhanik (2013). " 'Atlas Solaire Algerien' ." (EISSN/ISSN 1112-3850.).

Yarwood, G., S. Rao, M. Yocke and G. Whitten (2005). "Updates to the carbon bond mechanism: CB05." Report to the US Environmental Protection Agency. RT-04 **675**.

Zanobetti, A., M.-A. C. Bind and J. Schwartz (2008). "Particulate air pollution and survival in a COPD cohort." Environmental Health **7**(1): 48.

Zhao, H., Y. Zheng, T. Li, L. Wei and Q. Guan (2018). "Temporal and spatial variation in, and population exposure to, summertime ground-level ozone in Beijing." International journal of environmental research and public health **15**(4): 628.

Annexes

Annexe 01 : Rappel théorique sur l'analyse géostatistique

❖ Introduction

La diffusion dans un espace géographique donné d'un polluant, quel qu'il soit, est un phénomène dont les caractéristiques peuvent se résumer par les traits suivants :

- Il est régi par des lois physico-chimiques complexes dépendant d'une multitude de paramètres locaux d'environnement ;
- Il se déploie dans un espace à deux ou trois dimensions ;
- Il est par nature dynamique.

Par opposition à la modélisation déterministe (très lourde à mettre en œuvre), la géostatistique choisit délibérément un cadre probabiliste en proposant un modèle que l'on peut résumer de la façon suivante : le phénomène d'observation est considéré comme une réalisation d'un processus aléatoire. Ce processus est représenté par une fonction aléatoire $Z(x, y, t)$ où x et y sont les coordonnées géographiques et où t est le temps.

La fonction aléatoire $Z(x, y)$ doit être davantage spécifiée si on veut à la fois la caractériser à partir des observations (mesures) et l'utiliser pour répondre à des questions comme :

- Quelle est la valeur probable de la concentration en polluant en un point de l'espace dépourvu de mesure ?
- Quelle est la probabilité pour qu'un seuil de pollution soit dépassé ?

Parmi l'ensemble des fonctions aléatoires possibles, la géostatistique se restreint à des fonctions qui sont stationnaires, au moins pour ce qui concerne leurs moyenne et variance (Deraieme and Bobbia 2003). Ce qui fait l'originalité du modèle géostatistique par rapport à d'autres modèles, en particulier statistiques, c'est le fait que l'on ne suppose pas à priori que les mesures en deux points sont non corrélées. C'est la caractérisation de cette corrélation par une fonction de la distance qui est ainsi au cœur de la démarche géostatistique.

Etymologiquement, le terme géostatistique désigne l'étude des phénomènes naturels (Journal 1977). La géostatistique est née en début des années 60 (Matheron 1965), avec comme unique objet initial l'estimation minière. Il s'agissait d'évaluer le tonnage de métal en place, dans un

gisement reconnu par sondage, en fonction des teneurs observées sur les échantillons. Une approche similaire à celle de Matheron est développée par l'école Russe (Gagne 1999) et appliquée en hydrométéorologie, à l'estimation des précipitations. Mais Delhomme (1976) (Delhomme 1976) est le premier à introduire et à utiliser la géostatistique en hydrologie de surface et souterraine, et à montrer que bon nombre de champs de variables hydrologiques possèdent une structure spatiale et relèvent donc des méthodes géostatistiques (Charges, transmissivité, épaisseur de couches aquifères, lame d'eau précipitée etc.) (Delhomme 1976).

La géostatistique présente deux phases :

- La première est l'analyse spatiale de la variable étudiée grâce au variogramme (variographie) ;
- La seconde emploie une technique de prédiction spatiale utilisant comme outil le krigeage.

❖ Analyse de la structure spatiale (Variographie)

La caractérisation des structures de la variabilité spatiale ou l'analyse structurale est la première étape indispensable à toute étude géostatistique (Journel 1977) ; (Walter 2002) ; (Douaoui 2005).

En général, on étudie le corrélogramme ; graphe d'autocorrélation $\rho(h)$ ou le variogramme, graphe de la fonction $\gamma(h)$ qui permettent de résumer et de quantifier toute l'information structurale sur le phénomène étudié (Journel 1977).

Il est préférable de calculer le variogramme que le corrélogramme vu que ce dernier suppose l'existence d'une variance finie, qui n'est pas toujours le cas dans la science de la terre (Gascuel-Odoux and Boivin 1994).

➤ Rappel Statistique de base

A. Notion de variable régionalisée :

Beaucoup de phénomènes peuvent être représentés par des répartitions spatiales ou régionalisation de la variable caractéristique appelée variable régionalisée (VR) (Journel 1977) ; (Aubry 2000).

Selon Journel (1977) (Journel 1977) la variable régionalisée présente deux aspects contradictoires :

- Un aspect aléatoire : la variable étudiée présente des irrégularités dans l'espace, imprévisibles d'un point à l'autre.
- Un aspect structuré : ce qui caractérise un phénomène régionalisé qui fait appel à une certaine organisation de la variable dans l'espace.

B. Hypothèse Stationnaire d'ordre II

Une fonction aléatoire est dite stationnaire d'ordre II (Wackernagel 1993) si :

- L'espérance mathématique existe et elle est constante.

$$E(Z(x)) = m, \forall x \dots\dots\dots(a)$$

- La covariance pour chaque couple existe et ne dépend que de l'interdistance (h).

$$Cov(h) = E(Z(x), Z(x+h)) - m^2, \forall x \dots\dots\dots(b)$$

L'existence de la stationnarité de la covariance et du variogramme implique alors l'existence de la stationnarité de la variance et du variogramme.

C. Hypothèse intrinsèque :

Une fonction Z(x) est dite intrinsèque si :

- L'espérance mathématique existe et ne dépend pas du point d'implantation x.

$$E(Z(x)) = m, \forall x \dots\dots\dots(c)$$

- Pour tout vecteur h, l'accroissement [Z(x+h) - Z(x)] a une variance finie qui ne dépend pas de x.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} Var[Z(x+h) - Z(x)] = \frac{1}{2} E[(x+h) - Z(x)]^2$$

$$\dots\dots\dots(d)$$

Cependant, dans le cas du corrélogramme, l'hypothèse stationnarité d'ordre II est supposée vérifiée (variance finie), alors que dans le cas du variogramme, les accroissements $Z(x+h) - Z(x)$ seulement sont stationnaires d'ordre II. Cette hypothèse est appelée hypothèse intrinsèque (Gascuel-Odoux and Boivin 1994).

➤ **Le Variogramme**

A. Notion de Variogramme :

Considérons une propriété notée Z connue en « n » points de l'espace géographique, chacun de ces points étant repéré par le vecteur x de ses coordonnées géographiques (longitude, latitude). De la sorte, la notation « $Z(x_i)$ » représente la valeur observée de la propriété Z au i -ème point d'échantillonnage de la coordonnée x_i . Prenons deux valeurs « $Z(x)$ » et « $Z(x + h)$ » de la propriété Z distant du vecteur « h ». On cherche à comparer ces deux valeurs. Une façon simple est d'utiliser la variance entre les observations de ces deux sites, notée S^2 . Elle est par définition égale à :

$$S^2 = [Z(x) - \bar{Z}]^2 + [Z(x+h) - \bar{Z}]^2 \dots\dots\dots(e)$$

Avec : \bar{Z} est la moyenne entre les deux observations.

La variance (S^2) traduit l'importance des écarts à la moyenne, elle est d'autant plus grande que les observations sont différentes. Si on développe l'équation (5), on peut obtenir une autre expression de S^2 tel que :

$$S^2 = \frac{1}{2} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \dots\dots\dots(f)$$

Si on considère maintenant "n" couples distants de la même distance "h", la moyenne de ces "n" variances s'écrit :

$$\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x) - Z(x+h)]^2 \dots\dots\dots(g)$$

Pour une distance "h" séparant deux points d'observation, S^2 rend compte de la ressemblance des observations faites en ces deux points : il sera d'autant plus grand que ces observations sont

différentes. La variance (S^2) est qualifiée de "semi-variance" (Journel 1977) ; (Aubry 2000) ; (Wackernagel 1993).

B. Intérêt du variogramme

L'intérêt de cette notion simple et les conditions de sa généralisation ont été définis par la théorie des variables régionalisées (Matheron 1965). Cette théorie montre que la généralisation de l'équation (g) suppose deux conditions, regroupées sous le terme d'hypothèse intrinsèque tel quelle a été définie plus haut :

- L'espérance de Z est constante quelle que soit la position géographique " x " ;
- Pour toute distance " h ", la différence $[Z(x) - Z(x+h)]$ à une variance finie, qui ne dépend que de la distance h séparant les points.

Quand ces deux conditions sont vérifiées, la valeur S^2 définie dans l'équation (g) constitue un estimateur non biaisé de la fonction $\gamma(h)$ définie en (d). Cette fonction $\gamma(h)$ est nommée variogramme.

En étudiant l'évolution du variogramme $\gamma(h)$ en fonction de la distance " h " séparant des couples d'observation, on va analyser la façon dont se détériore l'information acquise en un point au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ce point (Journel 1977) ; (Delhomme 1976) ; (Douaoui 1993).

C. Des définitions

Un certain nombre de termes sont utilisés pour décrire un variogramme (Figure A).

- L'effet de pépite (nugget effect) : il s'agit de la valeur de la semi variance pour une distance nulle.

En théorie, on devrait avoir un $\gamma(h) > 0$ pour un $h > 0$, mais fréquemment, le variogramme présente une ordonnée à l'origine non nulle (figure A). Cet écart est qualifié "d'effet de pépite". Il est interprété comme le résultat d'erreurs de mesure ou d'une variabilité spatiale qui est présente à une distance inférieure au pas d'échantillonnage.

- Le palier (Sill) : valeur de la semi – variance à partir de laquelle le variogramme ne croît plus.
- La portée (range) : distance à partir de laquelle le palier est atteint (figure A).

La portée est la distance à partir de laquelle les valeurs de la variable entre deux points sont indépendantes (non corrélées) (Walter 2002) ; (Douaoui 1993).

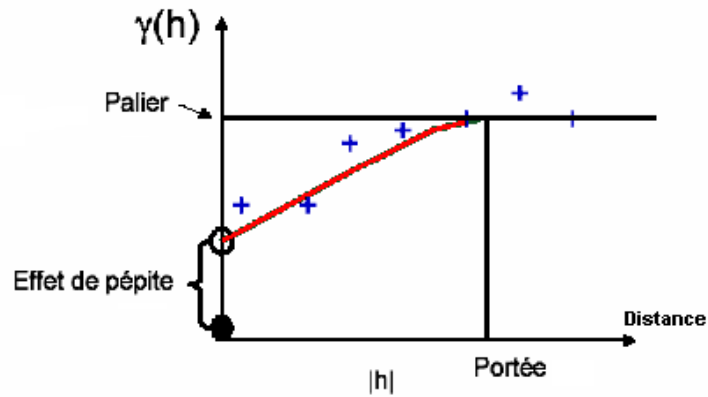


Figure A : Le variogramme expérimental

D. Forme du variogramme

L'analyse du variogramme cherche une fonction caractéristique de la structure de la variable étudiée. En premier lieu, on étudie quelques caractéristiques du variogramme :

✓ Comportement au voisinage de l'origine

La continuité et la régularité dans l'espace de la fonction aléatoire et donc la variable régionalisée qu'elle présente sont liées au comportement à l'origine du variogramme (Journel 1977).

Delhomme (1976) (Delhomme 1976) distingue 04 types :

- **Allure parabolique** : comportement dérivable à l'origine, ceci est la caractéristique d'une variabilité spatiale hautement régulière (Figure B-a) ;
- **Allure linéaire** : $\gamma(h)$ reste continue à l'origine mais n'est plus dérivable, donc moins régulière (Figure B-b) ;
- **Discontinuité à l'origine** : $\gamma(h)$ ne tend pas vers (0) lorsque h tend vers (0), cette discontinuité en $h = 0$ du variogramme est appelée effet de pépité (fig.3.2-c) qui est dû

: soit à la présence d'une structure dont l'échelle est très inférieure à l'espacement des données et on parle de micro régionalisation des données (Gascuel-Oudoux and Boivin 1994) ; (Douaoui 1993) soit à la présence d'erreurs de mesures (Douaoui 1993) ; (Voltz 1986) soit au nombre insuffisant de couples de mesures à faible distance induisant éventuellement une incertitude sur la détermination de l'effet de pépite (Boivin, Brunet et al. 1988) ;

- **Effet de pépite pur (Aléatoire pur)** : c'est le cas limite du cas précédent quand $\gamma(h)$ ne traduit plus que la seule discontinuité à l'origine (Fig. D-d) :

$$\gamma(h) = 0 \text{ est } (h) = C_0 \text{ dès que } h > 0$$

Cela indique que $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont sans corrélation quelle que soit leur distance (h) non nulle (Delhomme 1976), ce type de modèle s'explique généralement par l'absence d'une structure spatiale, plus fréquemment, par l'existence d'une structure marquée par des erreurs expérimentales ou inférieures au plus petit intervalle d'observation (Douaoui 1993) ; (Voltz 1986).

✓ **Comportement du graphe à l'infini :**

Qui pourra être borné ou non borné autour d'une valeur du palier, égale à la variance sur l'ensemble des données.

Dans ce cas, la stationnarité d'ordre II de la variance est vérifiée. Cette longueur est interprétée comme la distance maximale pour laquelle un point présentera une influence sur son entourage (Voltz 1986).

Cette valeur donne la distance au-delà de laquelle elles sont indépendantes (Figure C a-b-c).

Dans le variogramme non borné (Figure C-d), la stationnarité d'ordre II n'est pas vérifiée et le variogramme continu à croître sans atteindre un palier. Selon Voltz (1986) (Voltz 1986), trois interprétations peuvent être attribuées :

- Le palier n'a pas atteint la portée à l'échelle de notre travail ;
- La variance infinie représentative de la variable régionalisée respectant l'hypothèse intrinsèque ;
- La présence d'une dérive pourrait être aussi une explication à ce type de variogramme.

✓ **Autres types de variogrammes:**

Il existe d'autres variogrammes hors de ceux déjà cités. Ces variogrammes peuvent présenter certaines hypothèses telles que les variogrammes à périodicité ou à structure gigogne (superposition de variation d'échelles différentes) ainsi que ceux à effet de trou (existence de corrélation négative dues à la présence de zones riches entourées de zones pauvres) (Douaoui 1993).

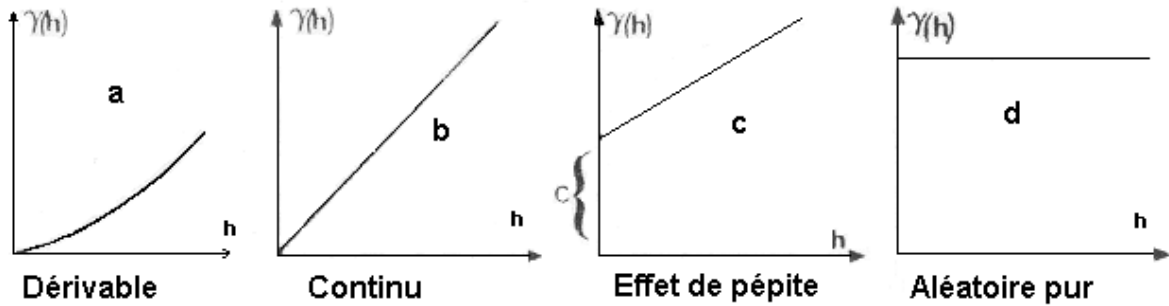


Figure B : Comportement à l'origine des différents variogrammes

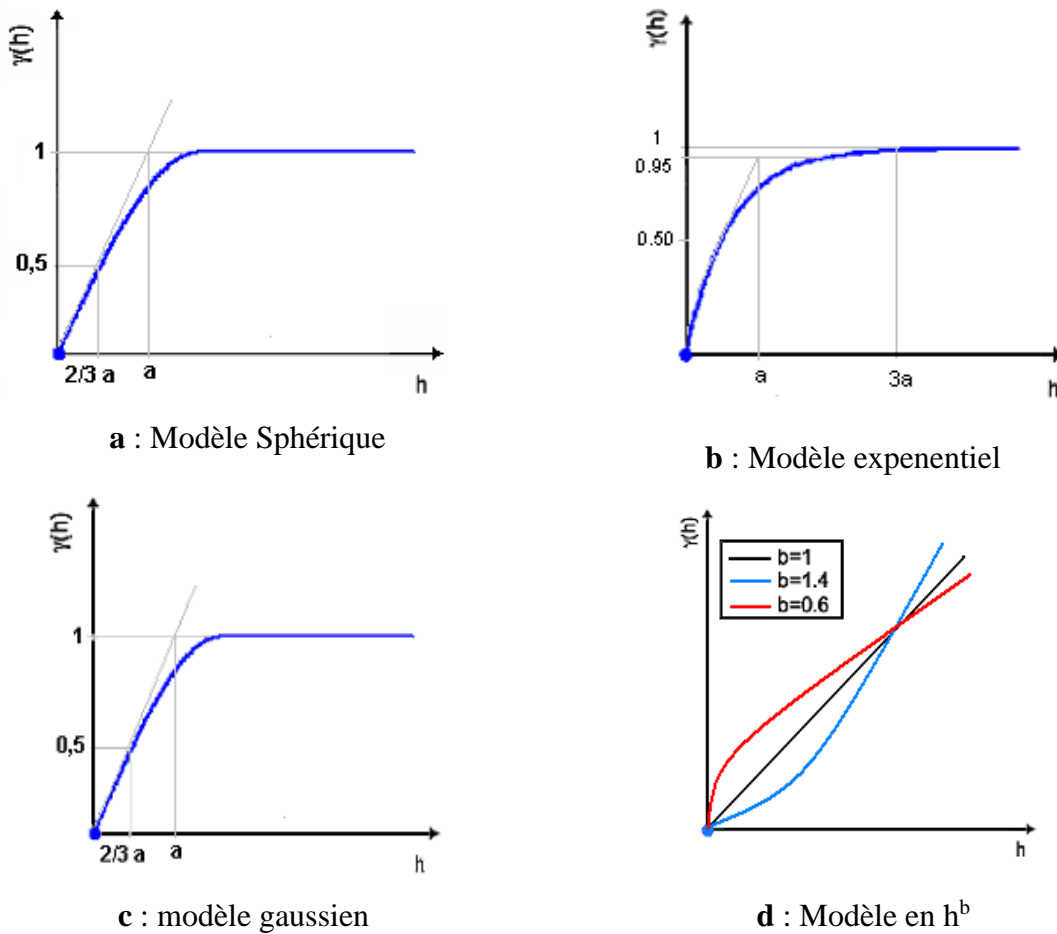


Figure C : Principaux modèles de variogrammes utilisés (Delhomme 1976)

E. Ajustement d'un variogramme

Pour tenir compte des caractéristiques du variogramme dans la démarche géostatistique, il est indispensable d'ajuster une fonction au variogramme expérimental, ce qui permet d'en résumer les principales caractéristiques.

Ces fonctions doivent présenter deux qualités (Walter 2002) :

- Rendre compte le mieux possible de l'information du variogramme expérimental.
- Satisfaire les conditions théoriques : elles doivent être "Semi-Positives"

L'ajustement se fait par l'emploi d'un certain nombre de modèles autorisant essentiellement deux types (Delhomme 1976) ; (Walter 2002) ; (Voltz 1986) :

✓ **Modèles croissants non bornés (Figure D) :**

- Modèle linéaire :

$$\gamma(h) = C_0 + bh \dots \dots \dots (h)$$

Avec : C_0 : L'ordre à l'origine

b : la pente de la droite

h : distance séparant les points

- cas particulier du linéaire :

$$\gamma(h) = C_0 \dots \dots \dots (i)$$

C'est le cas d'un variogramme plat appelé pépitique.

Fonction puissance : $\gamma(h) = C_0 + bh^\alpha \dots \dots \dots 0 < \alpha < 2 (j)$

Avec : b : la pente de la droite

α : un coefficient fixant la forme de la courbe

✓ **Modèles croissants bornés (Figure E) :**

- Modèle Sphérique :

$$\gamma(h) = C_0 + C[3h/2a - 1/2(h/a)^3] \dots \dots \dots \text{si } h \leq a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \dots \dots \dots \text{si } h > a (k)$$

Avec : C_0 : l'ordre à l'origine

C : est le palier moins l'ordonnée à l'origine

a : la portée

- Modèle Exponentiel :

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp(-h/r)] \dots \dots \dots (1)$$

Avec : C_0 : l'ordre à l'origine

r : paramètre de la distance égale environ le tier de la portée

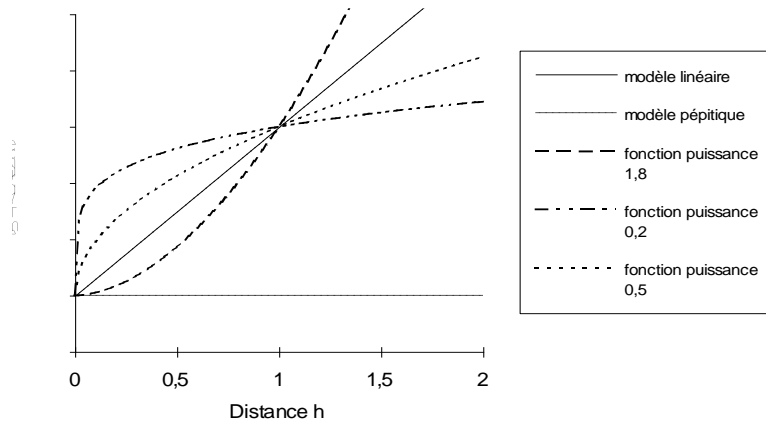


Figure D : Modèles croissants d'ajustement à des variogrammes : linéaire, pépitique et fonction puissance de l'ordre 1.8, 0.5 et 0.2

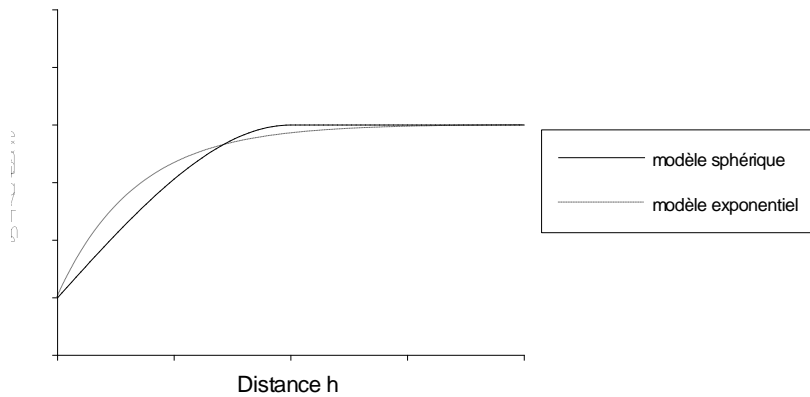


Figure E : Modèle d'ajustement aux variogrammes bornés : Modèle expérimental et sphérique

F. Validation du modèle

Pour s'assurer du meilleur choix d'ajustement qui satisfait l'utilisation du krigeage (2^{ème} étape), on peut procéder de deux manières :

- Soit en retirant la fonction qui donne le meilleur résultat dans un test de validation croisée ; dans ce cas, on supprime un des points, on calcule l'estimation en ce point de

mesure. Le travail se fait pour tous les points de mesure. On peut alors vérifier qu'en moyenne les valeurs estimées sont proches des valeurs expérimentales et les comparer à leur variance d'estimation respective (Aubry 2000) ; (Walter 1990) ; (Douaoui 1993) ; (Voltz 1986).

- Soit par la fonction qui s'ajuste le mieux aux points expérimentaux du variogramme (Webster 1985). Pour cela, on procède par le calcul des écarts entre les points expérimentaux du variogramme et les fonctions d'ajustement. L'importance de ces écarts peut être quantifiée par leur moyenne quadratique (Walter 1990) ; (Douaoui 1993).

❖ **Le Krigeage :**

➤ **Notions générales**

Le Krigeage est une technique de prédiction prenant en compte l'information fournie par le variogramme et permettant ainsi une estimation avec précision connue des propriétés de la variable étudiée en des sites non échantillonnés (Chen, Tse et al. 2001) ; (Walter 2002) ; (Aubry 2000) ; (Wackernagel 1993).

C'est une méthode probabiliste d'interpolation spatiale, elle est probabiliste dans la mesure où elle considère que le champ spatial de la variable étudiée est une réalisation d'une fonction aléatoire (Aubry 2000) ; (Voltz 1986).

Il définit un estimateur Z^* d'une propriété Z en un point quelconque de l'espace géographique. Cette estimation est faite à partir des observations effectives $Z(x)$ de la propriété étudiée.

Il fournit ensuite un indicateur de la précision de l'estimation faite à travers une variance d'estimation (Walter 2002) ; (Aubry 2000).

➤ **Différents types de Krigeage**

✓ **Le krigeage ordinaire**

La forme la plus simple et la plus employée de cette technique est celle du krigeage linéaire.

L'estimation de $Z^*(x_0)$ faite en un point x_0 par le krigeage linéaire est :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \dots \dots \dots (m)$$

Où : n : est le nombre de points expérimentaux pris en compte dans l'estimation

λ_i : est le poids affecté au point expérimental x_i

Pour résoudre le système d'équations induit par la recherche des poids λ_i , il faut introduire des conditions d'optimisation (Walter 2002) ; (Aubry 2000).

Ces conditions sont :

- Non biaisée : c'est un choix selon lequel l'erreur moyenne doit être nulle

$$E[Z^*(x) - Z_0(x)] = 0 \dots \dots \dots (n)$$

- Variance d'estimation minimale

$$\text{Var} [Z^*(x) - Z_0(x)] \text{ minimale} \dots \dots \dots (o)$$

Il faut noter que la variance d'estimation est indicatrice de la précision des estimations faites : d'autant qu'elle soit grande, l'estimation est moins précise (Douaoui 2005) ; (Walter 1990).

Aussi, Walter en 2002 précise que le calcul du poids affecté à un point observé ne dépend pas de la valeur de la variable étudiée en ce point. Il dépend uniquement de :

- De la structure spatiale de la variable relevée par le variogramme ;
- De la distance géographique du point observé au point estimé.

➤ **Le krigeage en bloc :**

Il est considéré comme une simple extension du krigeage ordinaire. Au lieu de faire une estimation en un point, l'estimation porte sur la valeur moyenne d'une propriété sur une surface. Cette technique est utilisée pour obtenir des cartes plus lissées ou pour estimer des stocks (Walter 2002).

➤ **Le Krigeage disjonctif**

L'estimation d'un point à estimer se fait par une fonction plus générale qu'une simple combinaison linéaire des valeurs aux points observés. Cette technique permet de tracer des cartes de probabilité qui ne dépassent un seuil donné. Elle est souvent utilisée pour cartographier un polluant (Aubry 2000).

➤ **Le Co-Krigeage**

Dans cette technique de krigeage, on exploite la corrélation entre deux variables. En effet, lorsqu'une corrélation existe entre deux variables, le co-krigeage est employé. Chose qui peut être difficile (par exemple mesure physique au laboratoire) ou facile (observation de terrain).

Le co-krigeage permet de cartographier une variable peu échantillonnée en utilisant les observations plus nombreuses d'une variable facile d'accès (Douaoui 2005) ; (Aubry 2000) ; (Wackernagel 1993).

➤ **Le Krigeage d'indicatrice**

Il permet de traiter des variables nominales ou qualitatives ordonnées. C'est une approche non paramétrique reposant sur une transformation préalable de la variable étudiée en indicatrice prenant la valeur 0 et 1 selon des seuils choisis de la variable (Walter 2002) ; (Douaoui 2005).

L'idée de base repose sur le fait que l'analyse spatiale par ce type de krigeage se fait non pas sur la variable elle-même mais sur la transformée de cette variable par codage binaire dite fonction indicatrice (Douaoui 2005) ; (Wackernagel 1993).

Soit Z la variable étudiée avec des réalisations $Z(x_i)$ en des points de coordonnées x_i , si on considère un seuil donné « c » de cette variable, on peut définir une fonction binaire "I" appelée fonction indicatrice [$I(x_i, c)$] prenant la valeur 0 ou 1 pour tout point échantillonné $Z(x_i)$ (Douaoui 2005) telle que :

$$\begin{aligned} I(x_i, c) &= 1 && \text{si } Z(x_i) \leq c \\ I(x_i, c) &= 0 && \text{si } Z(x_i) > c \end{aligned}$$

Cette approche est bien adaptée dans le cas où on étudie les valeurs extrêmes d'une variable qui ont tendance à être éliminées par krigeage ordinaire (Walter 2002).

❖ La cartographie

La cartographie est l'aboutissement final de la géostatistique. Ainsi, après avoir estimé la valeur d'une propriété en tout point d'un domaine, l'obtention d'une carte est aisée.

En général, on procède à l'estimation de la propriété étudiée aux nœuds d'une fine grille carrée couvrant le domaine d'étude. Les résultats obtenus sont alors visualisés :

- Soit en traçant des courbes d'iso valeurs entre les points de la grille ;
- Soit en construisant un bloc-diagramme ;
- Soit en construisant une carte en maillée en niveaux grille ou en couleur.

En plus de la carte d'estimation de la propriété, on peut représenter la carte de la variance d'estimation pour visualiser les secteurs où les estimations sont précises de ceux où elles le sont moins (Walter 2002) ; (Aubry 2000).

Annexe 02 : Rappel théorique sur le model CAMx (ENVIRON 2010)

Tableau A : Résumé des modèles et méthodes CAMx pour les processus physiques clés

Process	Physical Models	Numerical Methods
<u>Horizontal advection</u>	<u>Eulerian continuity equation</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Bott (1989) • PPM (Colella and Woodward, 1984)
<u>Horizontal diffusion</u>	<u>K-theory 1st order closure</u>	Explicit simultaneous 2-D solver
<u>Vertical advection</u>	<u>Eulerian continuity equation</u>	Implicit backward-Euler (time) hybrid centered/upstream (space) solver
<u>Vertical diffusion</u>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>K-theory 1st order closure</u> • <u>Non-local mixing</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • Implicit backwards-Euler (time) centered (space) solver • Explicit ACM2 non-local convection/diffusion (Pleim, 2007)
<u>Gas-Phase Chemistry</u>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Carbon Bond IV</u> (Gery et al., 1989) • <u>Carbon Bond 2005</u> (Yarwood et al., 2005b) • <u>SAPRC99</u> (Carter, 2000) • <u>Inorganic/organic aerosol precursors</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>EBI</u> (Hertel et al., 1993) • <u>IEH</u> (Sun et al., 1994) • <u>LSODE</u> (Hindmarsh, 1983)
<u>Aerosol Chemistry</u>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Aqueous inorganic chemistry</u> • <u>Inorganic thermodynamics/partitioning</u> • <u>Organic thermodynamics/partitioning</u> • <u>Static 2-mode or multi-section size models</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>RADM-AQ</u> (Chang et al., 1987) • <u>ISORROPIA</u> (Nenes et al., 1998) • <u>SOAP</u> (Strader et al., 1999) • <u>CMU</u> (Pandis et al., 1993)
<u>Dry deposition</u>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Resistance model for gases (Wesely, 1989) and aerosols (Slinn and Slinn, 1980)</u> • <u>Resistance model for gases (Zhang et al., 2003) and aerosols (Zhang et al., 2001)</u> 	Deposition velocity as surface boundary condition in vertical diffusion solver
<u>Wet deposition</u>	<u>Scavenging model for gases and aerosols (Seinfeld and Pandis, 1998)</u>	Exponential decay as a function of scavenging coefficient

Tableau B : Mécanismes chimiques en phase gazeuse actuellement mis en œuvre dans CAMx.

Mechanism ID	Description
6	CB05, the 2005 version of the Carbon Bond mechanism developed for use in EPA atmospheric modeling studies (Yarwood et al., 2005b). This mechanism optionally includes the same <u>aerosol</u> and <u>mercury chemistry</u> as Mechanism 4. 156 reactions and up to 89 species (<u>54 state gases</u> , up to <u>22 state particulates</u> , and <u>13 radicals</u>).
5	The fixed parameter version of the SAPRC99 gas-phase mechanism (Carter, 2000). This mechanism optionally includes the same <u>aerosol</u> and <u>mercury chemistry</u> as Mechanism 4. 217 reactions and up to 114 species (<u>76 state gases</u> , up to <u>22 state particulates</u> , and <u>16 radicals</u>).
3	CB4 (Gery et al., 1989) gas-phase chemistry with revised <u>PAN chemistry</u> , <u>additional radical-radical termination reactions</u> and <u>updated isoprene chemistry</u> (Carter 1996; Whitten et al., 1996). 96 reactions and 36 species (<u>26 state gases</u> and <u>10 radicals</u>).
4	Mechanism 3 with additional <u>inorganic gas-phase reactions</u> important for regional modeling (Yarwood et al., 2005a). This mechanism optionally includes <u>aerosol</u> and <u>mercury chemistry</u> including: secondary organic aerosol formation from condensable gases, aqueous PM chemistry, inorganic PM thermodynamics, and aerosol size evolution. 113 reactions and up to 76 species (up to <u>44 state gases</u> , up to <u>22 state particulates</u> , and <u>10 radicals</u>).
10	A user-defined simple chemistry mechanism can be developed for any gas and/or particulate species, which is defined by a "Mechanism 10" parameters file and solved within a user-supplied subroutine called "chem10.f."

Tableau C : les espèces dans le mécanisme CB4 (mécanisme 3)

Species Name	Description
NO2	Nitrogen dioxide
NO	Nitric oxide
O	Oxygen atom in the O ³ (P) electronic state
O3	Ozone
NO3	Nitrate radical
O1D	Oxygen atom in the O ¹ (D) electronic state
OH	Hydroxyl radical
HO2	Hydroperoxy radical
N2O5	Dinitrogen pentoxide
HNO3	Nitric acid
HONO	Nitrous acid
PNA	Peroxynitric acid (HNO ₄)
H2O2	Hydrogen peroxide
CO	Carbon monoxide
FORM	Formaldehyde
ALD2	Higher aldehyde (based on acetaldehyde)
C2O3	Acylperoxy radical (based on acetylperoxy)
XO2	NO to NO2 conversion from alkylperoxy (RO ₂) radical
PAN	Peroxyacyl nitrate (based on peroxyacetyl nitrate)
PAR	Paraffin carbon bond (C-C)
XO2N	NO to organic nitrate conversion from alkylperoxy (RO ₂) radical
ROR	Secondary alkoxy radical
NTR	Organic nitrate (RNO ₃)
OLE	Olefin carbon bond (C=C)
ETH	Ethene
TOL	Toluene and other monoalkyl aromatics
CRES	Cresol and higher molecular weight phenols
TO2	Toluene-hydroxyl radical adduct
OPEN	Aromatic ring opening product
CRO	Methylphenoxy radical
MGLY	Methylglyoxal and other aromatic products
XYL	Xylene and other polyalkyl aromatics
ISOP	Isoprene
ISPD	Isoprene product (lumped methacrolein, methyl vinyl ketone, etc.)
SO2	Sulfur dioxide
SULF	Sulfuric acid (gaseous)
MEOH	Methanol
ETOH	Ethanol

Tableau D : Exigences de données de CAMx

Data Types	Data Fields
<p>Meteorology Supplied by a Meteorological Model</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>3-Dimensional Gridded Fields:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Vertical Grid Structure - Horizontal Wind Components - Temperature - Pressure - Water Vapor - Vertical Diffusivity - Clouds/Precipitation
<p>Air Quality Obtained from Measured Ambient Data</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Gridded Initial Concentrations</u> • <u>Gridded Boundary Concentrations</u>
<p>Emissions Supplied by an Emissions Model</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Elevated Point Sources</u> • <u>Combined Gridded Sources</u> <ul style="list-style-type: none"> - Low-level Point - Mobile - Area/Non-road Mobile - Biogenic
<p>Geographic Developed from Terrain and Landuse/Landcover Maps, Drought Index Maps, Modeled or Satellite-derived Snow Cover, Satellite-derived LAI</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Gridded Surface Characteristics</u> <ul style="list-style-type: none"> - Land Use Category - UV Albedo - Snow Cover - Leaf area index (LAI) - Land/Water Mask - Roughness Length - Drought Stress - Terrain Elevation
<p>Photolysis Derived from Satellite Measurements and Radiative Transfer Models</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Atmospheric Radiative Properties</u> <ul style="list-style-type: none"> - Gridded Haze Opacity Codes - Gridded Ozone Column Codes - Photolysis Rates Lookup Table

Annexe 03 : Correspondance entre les catégories de sources du GIEC de 1996 et SNAP 97 (IPCC 1999)

IPCC classification	CORINAIR / SNAP classification
---------------------	--------------------------------

1 ENERGY

1 A FUEL COMBUSTION ACTIVITIES

1 A 1 Energy Industries		
1 A 1 a Public Electricity and Heat Production	01 01	Public power (01.01.01 to 01.01.05)
	01 02	District heating plants (01.02.01 to 01.02.05)
1 A 1 b Petroleum refining	01 03	Petroleum refining plants (01.03.01 to 01.03.06)
1 A 1 c Manufacture of Solid fuels and Other Energy Industries	01 04	Solid fuel transformation plants (01.04.01 to 01.04.07)
	01 05	Coal mining, oil / gas extraction, pipeline compressors (01.05.01 to 01.05.05)

1 A 2 Manufacturing Industries and Construction		
1 A 2 a Iron and Steel	03 01 (b)	Manuf. indus. combust. in boilers, gas turbines and stationary engines (03.01.01 to 03.01.06)
	03 02 03	Blast furnace cowpers
	03 03 01	Sinter and pelletizing plants
	03 03 02	Reheating furnaces steel and iron
	03 03 03	Gray iron foundries
1 A 2 b Non-ferrous Metals	03 01 (b)	Manuf. indus. combust. in boilers, gas turbines and stationary engines (03.01.01 to 03.01.06)
	03 03 04 to 03 03 09	Primary and secondary Pb/Zn/Cu production
	03 03 10	Secondary Aluminium production
1 A 2 c Chemicals	03 03 22 to 03 03 24	Alumina, Magnesium and Nickel production
	03 01 (b)	Manuf. indus. combust. in boilers, gas turbines and stationary engines (03.01.01 to 03.01.06)
1 A 2 d Pulp, Paper and Print	03 01 (b)	Manuf. indus. combust. in boilers, gas turbines and stationary engines (03.01.01 to 03.01.06)
	03 03 21	Paper-mill industry (drying processes)
1 A 2 e Food Processing, Beverages and Tobacco	03 01 (b)	Manuf. indus. combust. in boilers, gas turbines and stationary engines (03.01.01 to 03.01.06)
1 A 2 f Other	03 01 (b)	Manuf. indus. combust. in boilers, gas turbines and stationary engines (03.01.01 to 03.01.06)
	03 02 04	Plaster furnaces
	03 02 05	Other furnaces
	03 03 11 to 03 03 20	Cement, Lime, Asphalt concrete, Glass, Mineral wool, Bricks and Tiles, Fine Ceramic materials
	03 03 25	Enamel production
	03 03 26	Other process with contact
	08 08	Other mobile and machinery/Industry

(b) When relevant economic sector split data are available in CORINAIR/NAD module, data can be allocated to sub-categories a to f.

Annexes

IPCC classification	CORINAIR / SNAP classification	
1 A 3 Transport		
1 A 3 a Civil Aviation		
i International (c)	08 05 02	Internat. airport traffic (LTO cycles - <1000 m)
	08 05 04	International cruise traffic (>1000 m)
ii Domestic	08 05 01	Domestic airport traffic (LTO cycles - <1000 m)
	08 05 03	National cruise traffic (>1000 m)
1 A 3 b Road Transportation	07 01	Passenger cars (07.01.01 to 07.01.03)
	07 02	Light duty vehicles < 3.5 t (07.02.01 to 07.02.03)
	07 03	Heavy duty vehicles > 3.5 t and buses (07.03.01 to 07.03.03)
	07 04	Mopeds and Motorcycles < 50 cm ³
	07 05	Motorcycles > 50 cm ³ (07.05.01 to 07.05.03)
	07 06	Gasoline evaporation
1 A 3 c Railways	08 02	Railways (08.02.01 to 08.02.03)
1 A 3 d Navigation		
i International Marine (c)	08 04 04	International sea traffic (internat. bunkers)
ii National navigation	08 04 02	National sea traffic within EMEP area
	08 03 01 to 08 03 04	Inland waterways
1 A 3 e Other	08 10	Other mobile sources and machinery
	01 05 06	Pipeline compressors
1 A 4 Other Sectors		
1 A 4 a Commercial / Institutional	02 01	Commercial and institutional plants (02.01.01 to 02.01.06)
1 A 4 b Residential	02 02	Residential plants (02.02.01 to 02.02.05)
	08 09	Household and gardening
1 A 4 c Agriculture / Forestry / Fishing	02 03	Plants in agriculture, forestry and aquaculture (02.03.01 to 02.03.05)
	08 04 03	National fishing
	08 06	Agriculture
	08 07	Forestry
1 A 5 Other		
1 A 5 a Stationary	02 01	Commercial and institutional plants (02.01.01 to 02.01.06) (military only)
1 A 5 b Mobile	08 01	Military

1 B FUGITIVE EMISSIONS FROM FUELS

1 B 1 Solid fuels		
1 B 1 a Coal Mining	05 01	Extraction and 1st treatment of solid fossil fuels (05.01.01 to 05.01.03)
1 B 1 b Solid fuel transformation	04.02.01	Coke oven (door leakage and extinction)
	04 02 04	Solid smokeless fuel
1 B 1 c Other		
1 B 2 Oil and natural gas		
1 B 2 a Oil	04 01	Processes in petrol. indust. (04.01.01 to 04.01.05)
	05 02	Extraction, 1st treatment and loading of liquid fossil fuels (05.02.01 to 05.02.02)
	05 04	Liquid fuel distribution (except gasoline distribution) (05.04.01 to 05.04.02)
	05 05	Gasoline distribution (05.05.01 to 05.05.03)
1 B 2 b Natural gas	05 03	Extraction, 1st treat. and loading of gaseous gaseous fossil fuels (05.03.01 to 05.03.03)
	05 06	Gas distribution networks (05.06.01 to 05.06.02)
1 B 2 c Venting and flaring	09.02.03	Flaring in oil refinery
	09.02.06	Flaring in oil and gas extraction

(c) not to be included in national total, but to be reported separately

Annexes

IPCC classification	CORINAIR / SNAP classification
---------------------	--------------------------------

2 INDUSTRIAL PROCESSES

2 A MINERAL PRODUCTS

2 A 1 Cement Production	04 06 12	Cement (decarbonizing)
2 A 2 Lime Production	04 06 14	Lime (decarbonizing)
2 A 3 Limestone and Dolomite Use	04 06 18	Limestone and Dolomite Use
2 A 4 Soda Ash Production and use	04 06 19	Soda Ash Production and Use
2 A 5 Asphalt Roofing	04 06 10	Roof covering with asphalt materials
2 A 6 Road Paving with Asphalt	04 06 11	Road paving with asphalt
2 A 7 Other	04 06 13	Glass (decarbonizing)
	04 06 15	Batteries manufacturing
	04 06 16	Extraction of mineral ores
	04 06 17	Other (includ. asbestos products manufacturing)

2 B CHEMICAL INDUSTRY

2 B 1 Ammonia Production	04 04 03	Ammonia
2 B 2 Nitric Acid Production	04 04 02	Nitric acid
2 B 3 Adipic Acid Production	04 05 21	Adipic acid
2 B 4 Carbide Production	04 04 12	Calcium carbide production
2 B 5 Other	04 04 01	Sulfuric acid
	04 04 04 to 04 04 06	Ammonium sulphate / nitrate / phosphate
	04 04 07 and 04 04 08	NPK fertilisers, Urea
	04 04 09 to 04 04 11	Carbon black, Titanium dioxide, Graphite
	04 04 14	Phosphate fertilisers
	04 04 15	Storage and handling of inorganic products
	04 04 16	Other process in inorganic chemical industry
	04 05	Processes in organic chemical industry except adipic acid (04.05.01 to 04.05.20, 04.05.22 to 04.05.26 and 04.05.34)

2 C METAL PRODUCTION

2 C 1 Iron and Steel Production	04 02 02	Blast furnace charging
	04 02 03	Pig iron tapping
	04 02 05 to 04 02 10	Furnace steel plant, Rolling mills, Sinter and pelletizing plants (except combustion), Other
2 C 2 Ferroalloys Production	04 03 02	Ferro alloys
2 C 3 Aluminium production	04 03 01	Aluminium production (electrolysis)-except SF6
2 C 4 SF6 Used in Aluminium and Magnesium Foundries	03 03 10	Secondary aluminium production
	04 03 01	Aluminium production (electrolysis)-SF6 only
	04 03 04	Magnesium production - SF6 only
2 C 5 Other	04 03 03 to 04 03 05	Silicium, Magnesium, Nickel production
	04 03 06	Allied metal manufacturing
	04 03 07	Galvanizing
	04 03 08	Electroplating
	04 03 09	Other processes in non-ferrous industries

2 D OTHER PRODUCTION

2 D 1 Pulp and Paper	04 06 01	Chipboard
	04 06 02 to 04 06 04	Paper pulp
2 D 2 Food and Drink	04 06 05 to 04 06 08	Bread, Wine, Beer and spirits

Annexes

IPCC classification	CORINAIR / SNAP classification
---------------------	--------------------------------

2 E PRODUCTION OF HALOCARBONS AND SULPHUR HEXAFLUORIDE

2 E 1 By-Product Emissions	04 08 01	Halogenated hydrocarbons production - By-products
	04 08 04	Sulphur hexafluoride production - By-products
2 E 2 Fugitive Emissions	04 08 02	Halogenated hydrocarbons production - Fugitive
	04 08 05	Sulphur hexafluoride production - Fugitive
2 E 3 Other	04 08 03	Halogenated hydrocarbons production - Other
	04 08 06	Sulphur hexafluoride production - Other

2 F CONSUMPTION OF HALOCARBONS AND SULPHUR HEXAFLUORIDE

2 F 1 Refrigeration and Air Conditioning Equipment	06 05 02	Refrigeration and air conditioning equipment using halocarbons
2 F 2 Foam Blowing	06 05 04	Foam Blowing
2 F 3 Fire Extinguishers	06 05 05	Fire Extinguishers
2 F 4 Aerosols	06 05 06	Aerosol cans
2 F 5 Solvents	06 01 to 06 04	Solvents concerning halocarbons
2 F 6 Other	06 01 to 06 04	Sources concerning SF6
	06 05 07	Electrical equipment
	06 05 08	Other

2 G OTHER

	06 05 03	Refrigeration and air conditioning equipment using other products
--	----------	---

3 SOLVENT AND OTHER PRODUCT USE

3 A PAINT APPLICATION

	06 01	Paint application (06.01.01 to 06.01.09)
--	-------	--

3 B DEGREASING AND DRY CLEANING

	06 02	Degreasing, dry cleaning and electronics (06.02.01 to 06.02.04)
--	-------	---

3 C CHEMICAL PRODUCTS, MANUFACTURE AND PROCESSING

	06 03	Chemical products manufacturing or processing (06.03.01 to 06.03.14)
--	-------	--

3 D OTHER

	06 04	Other use of solvents and related activities (06.04.01 to 06.04.12)
	06 05 01	Anaesthesia
	06 05 08	Other except for halocarbons and SF6

4 AGRICULTURE

4 A ENTERIC FERMENTATION

4 A 1 Cattle		
4 A 1 a Dairy	10 04 01	Dairy cows
4 A 1 b Non-Dairy	10 04 02	Other cattle
4 A 2 Buffalo	10 04 14	Buffalos
4 A 3 Sheep	10 04 03	Ovines
4 A 4 Goats	10 04 07	Goats
4 A 5 Camels and Llamas	10 04 13	Camels
4 A 6 Horses	10 04 05	Horses
4 A 7 Mules and Asses	10 04 06	Mules and asses
4 A 8 Swine	10 04 04 and 10 04 12	Fattening pigs, Sows
4 A 9 Poultry	10 04 08 to 10 04 10	Laying hens, Broilers, Other poultry
4 A 10 Other	10 04 11 and 10 04 15	Fur animals, Other animals

Annexes

IPCC classification	CORINAIR / SNAP classification
---------------------	--------------------------------

4 B MANURE MANAGEMENT

4 B 1 Cattle		
4 B 1 a Dairy	10 05 01	Manure management of organic compounds - Dairy cows
4 B 1 b Non-Dairy	10 05 02	Manure management of organic compounds - Other cattle
4 B 2 Buffalo	10 05 14	Manure management of organic compounds - Buffalos
4 B 3 Sheep	10 05 05	Manure management of organic compounds - Sheep
4 B 4 Goats	10 05 11	Manure management of organic compounds - Goats
4 B 5 Camels and Llamas	10 05 13	Manure management of organic compounds - Camels
4 B 6 Horses	10 05 06	Manure management of organic compounds - Horses
4 B 7 Mules and Asses	10 05 12	Manure management of organic compounds - Mules and asses
4 B 8 Swine	10 05 03 and 10 05 04	Manure management of organic compounds - Fattening pigs, Sows
4 B 9 Poultry	10 05 07 to 10 05 09	Manure management of organic compounds - Laying hens, Broilers, Other
4 B 10 Anaerobic	10 09 01	Manure management of nitrogen compounds - Anaerobic
4 B 11 Liquid Systems	10 09 02	Manure management of nitrogen compounds - Liquid Systems
4 B 12 Solid Storage and Dry Lot	10 09 03	Manure management of nitrogen compounds - Solid Storage and Dry Lot
4 B 13 Other	10 09 04	Manure management of nitrogen compounds - Other Management
	10 05 10 and 10 05 15	Manure management of nitrogen compounds - Fur animals, Other animals

4 C RICE CULTIVATION

4 C 1 Irrigated	10 01 03 and 10 02 03	Rice field with/without fertilisers (e)
4 C 2 Rainfed	10 01 03 and 10 02 03	Rice field with/without fertilisers (e)
4 C 3 Deep Water	10 01 03 and 10 02 03	Rice field with/without fertilisers (e)
4 C 4 Other	10 01 03 and 10 02 03	Rice field with/without fertilisers (e)

(e) Low emissions are expected for European countries and deals mainly with continuously flooded process.

4 D AGRICULTURAL SOILS

	10 01	Cultures with fertilizers
	except 10 01 03	(10.01.01, 10.01.02 and 10.01.04 to 10.01.06)
	10 02	Cultures without fertilizers
	except 10 02 03	(10.02.01, 10.02.02 and 10.02.04 to 10.02.06)
	11 05	N ₂ O from leakage of N into Wetlands
	11 06	N ₂ O from leakage of N into Waters

4 E PRESCRIBED BURNING OF SAVANNAS

	No item allocated here (not relevant for Europe)
--	--

Annexes

IPCC classification	CORINAIR / SNAP classification
---------------------	--------------------------------

4 F FIELD BURNING OF AGRICULTURAL WASTES

4 F 1 Cereals	10 03 01	Cereals
4 F 2 Pulse	10 03 02	Pulse
4 F 3 Tuber and Root	10 03 03	Tuber and Root
4 F 4 Sugar Cane	10 03 04	Sugar Cane
4 F 5 Other	10 03 05	Other

4 G OTHER

	10 06 01 to 10 06 04	Use of pesticides and limestone (except CO ₂)
--	----------------------	---

5 LAND USE CHANGE AND FORESTRY

5 A CHANGES IN FOREST AND OTHER WOODY BIOMASS STOCKS

5 A 1 Tropical Forests	11 21 01	Tropical Forests
5 A 2 Temperate Forests	11 21 02	Temperate Forests
5 A 3 Boreal Forests	11 21 03	Boreal Forests
5 A 4 Grasslands/Tundra	11 21 04	Grasslands/Tundra
5 A 5 Other	11 21 05	Other

5 B FOREST AND GRASSLAND CONVERSION

5 B 1 Tropical Forests	11 22 01	Tropical Forests
5 B 2 Temperate Forests	11 22 02	Temperate Forests
5 B 3 Boreal Forests	11 22 03	Boreal Forests
5 B 4 Grasslands/Tundra	11 22 04	Grasslands/Tundra
5 B 5 Other	11 22 05	Other

5 C ABANDONMENT OF MANAGED LANDS

5 C 1 Tropical Forests	11 23 01	Tropical Forests
5 C 2 Temperate Forests	11 23 02	Temperate Forests
5 C 3 Boreal Forests	11 23 03	Boreal Forests
5 C 4 Grasslands/Tundra	11 23 04	Grasslands/Tundra
5 C 5 Other	11 23 05	Other

5 D CO₂ Emissions and Removals from Soil

	10 06 01 to 10 06 04	Use of pesticides and limestone (CO ₂ only)
	11 24	CO ₂ Emissions from / or removals into soils (except 10.06)

5 E OTHER

	11 11 04 to 11 11 17	Managed broadleaf forests
	11 12 04 to 11 12 16	Managed coniferous forests
	11 25	Other

Annexes

6 WASTE

6 A SOLID WASTE DISPOSAL ON LAND

6 A 1	Managed Waste disposal	09 04 01	Managed Waste disposal
6 A 2	Unmanaged Waste Disposal	09 04 02	Unmanaged Waste Disposal
6 A 3	Other	09 04 03	Other

6 B WASTEWATER HANDLING

6 B 1	Industrial Wastewater	09 10 01	Waste water treatment in industry
6 B 2	Domestic and Commercial Wastewater	09 10 02	Waste water treatment in residential and commercial sectors
		09 10 07	Latrines
6 B 3	Other		

IPCC classification	CORINAIR / SNAP classification
---------------------	--------------------------------

6 C WASTE INCINERATION

	09 02 01 and 09 02 02	Incineration of municipal/industrial wastes
	09 02 04	Flaring in chemical industry
	09 02 05	Incineration of sludges from wastewater
	09 02 07	Incineration of hospital wastes
	09 02 08	Incineration of waste oil
	09 07	Open burning of agricultural wastes (not on field)
	09 09	Cremation (09.09.01 to 09.09.02)

6 D OTHER WASTE

	09 10 03	Sludge spreading
	09 10 05	Compost production from waste
	09 10 06	Biogas production
	09 10 08	Other production of fuel (refuse derived fuel,...)

7 OTHER

	05 07	Geothermal energy extraction
--	-------	------------------------------

SNAP ITEMS NOT ALLOCATED IN IPCC

07 07	Automobile tyre and brake wear
04 04 13	Chlorine
11 01	Non-managed broadleaf forests (11.01.04 to 11.01.11 and 11.01.15 to 11.01.17)
11 02	Non-managed coniferous forests (11.02.04 to 11.02.12 and 11.02.15 to 11.02.16)
11 03	Forest fires (11.03.01 and 11.03.02)
11 04	Natural grassland (11.04.01 to 11.04.05)
11 05	Wetlands (marshes - swamps) (11.05.01 to 11.05.06) except for N ₂ O from leakage of N into wetlands
11 06	Waters (11.06.01 to 11.06.07) except for N ₂ O from leakage of N into waters
11 07	Animals (11.07.01 to 11.07.03)
11 08	Volcanoes
11 09	Gas seeps
11 10	Lightning

Annexe 04 : Relation entre les valeurs de l'ozone mesurés et estimés par krigeage ordinaire

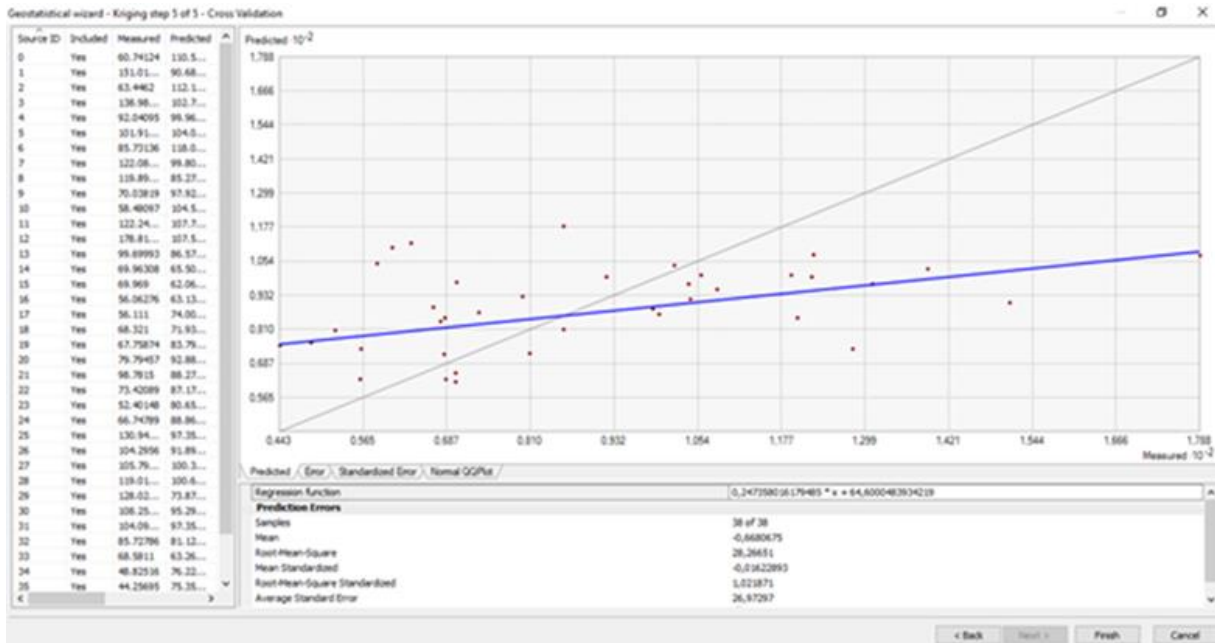


Figure a) : Graphe de corrélation des valeurs mesurées et estimées par krigeage ordinaire de l'ozone pour l'hiver

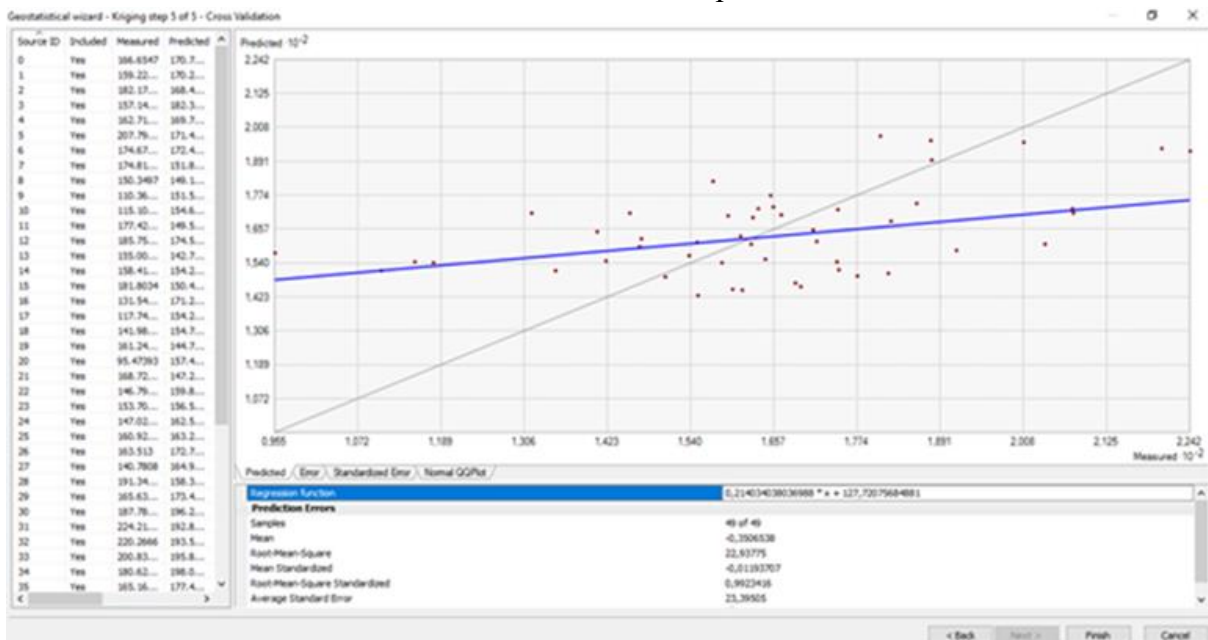


Figure b) : Graphe de corrélation des valeurs mesurées et estimées par krigeage ordinaire de l'ozone pour les deux étés

Annexes

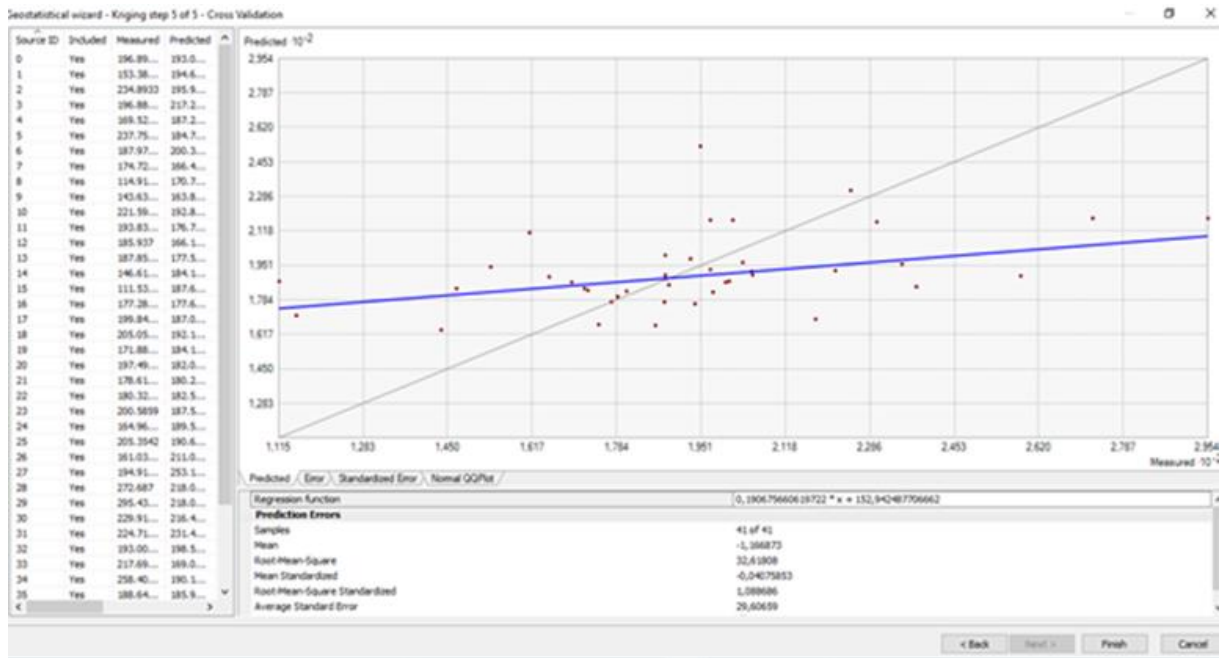


Figure c) : Graphe de corrélation des valeurs mesurées et estimées par krigeage ordinaire de l’ozone pour l’été 2013

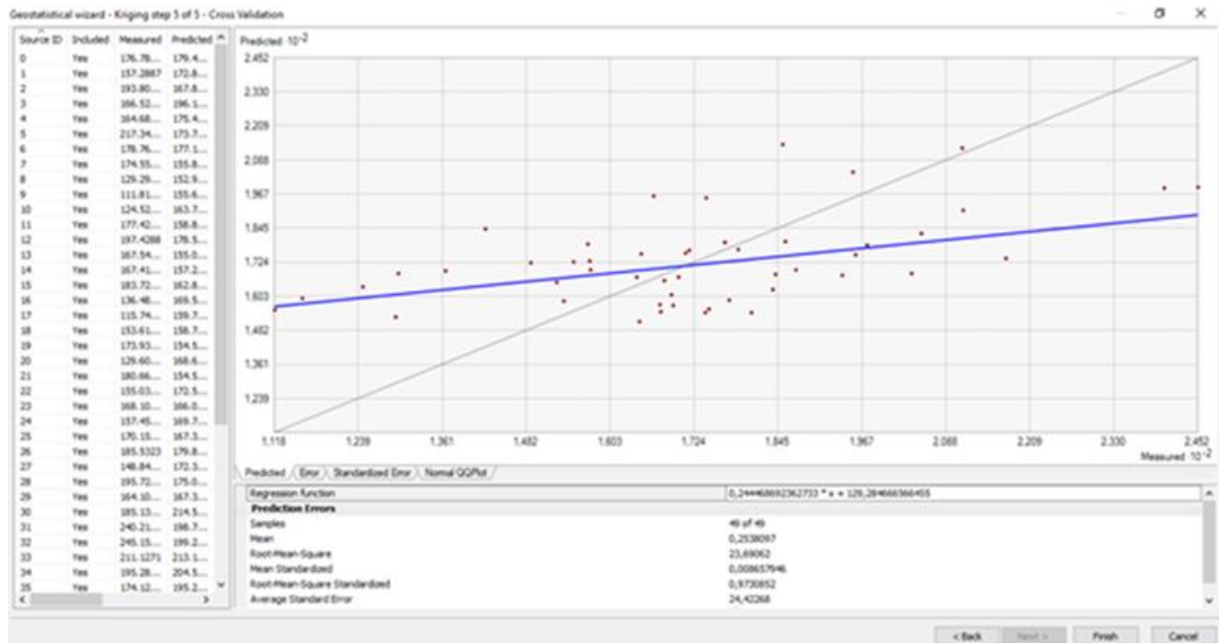


Figure d) : Graphe de corrélation des valeurs mesurées et estimées par krigeage ordinaire de l’ozone pour tous les étés

Annexes

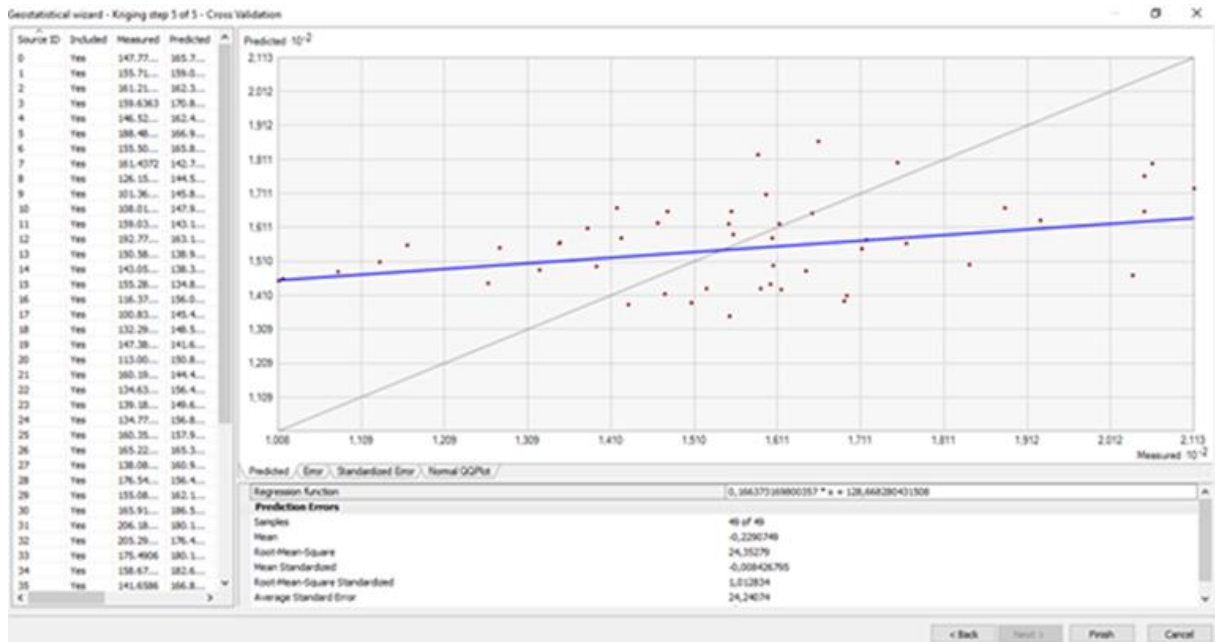
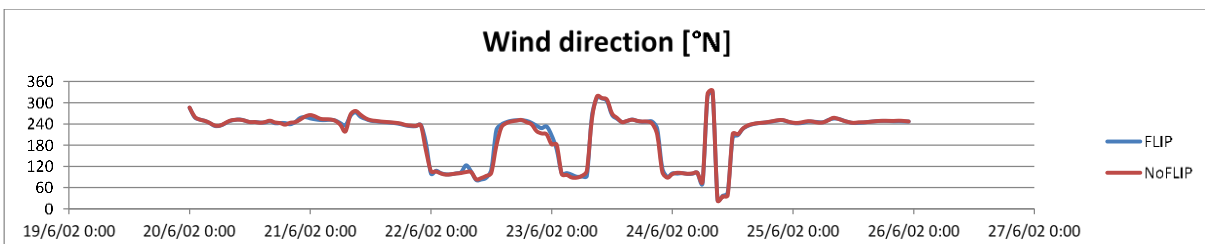
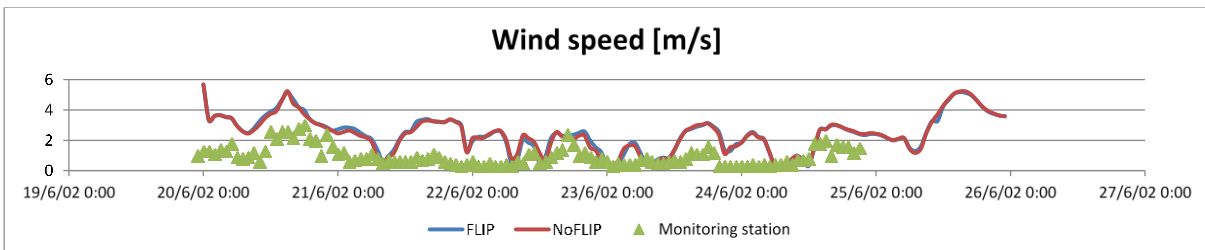
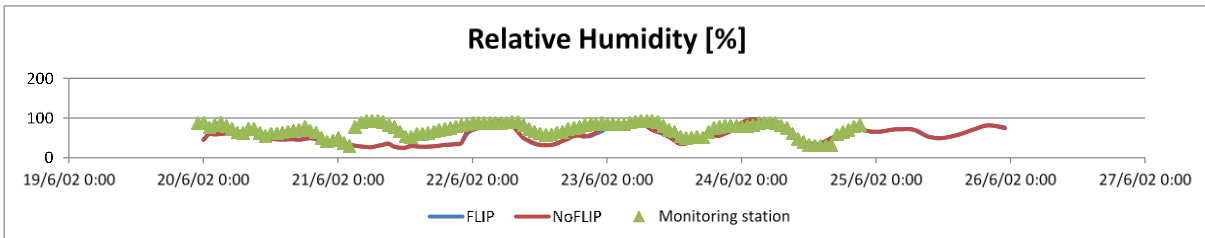
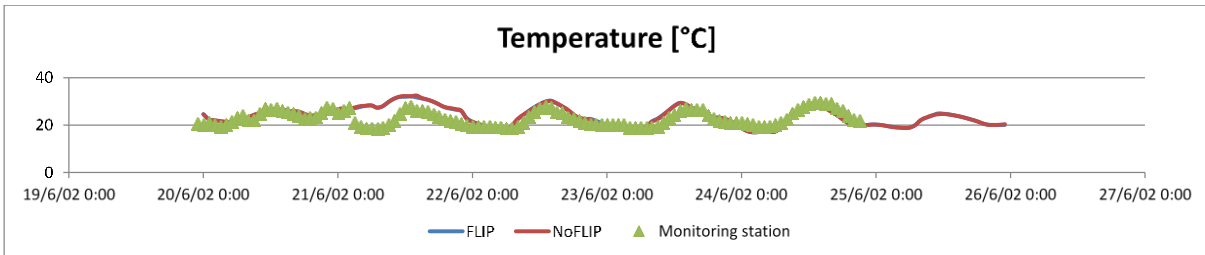
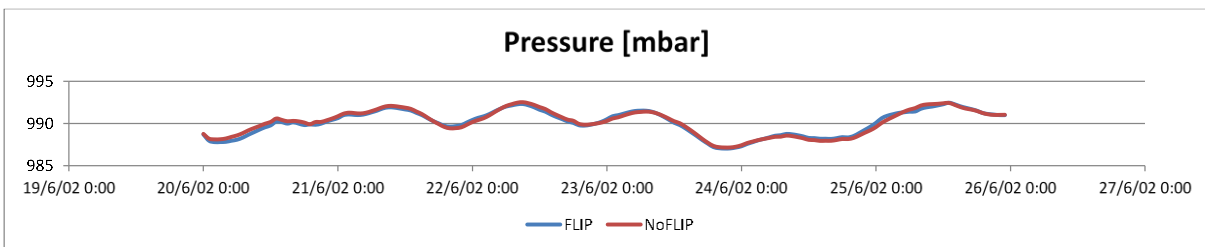
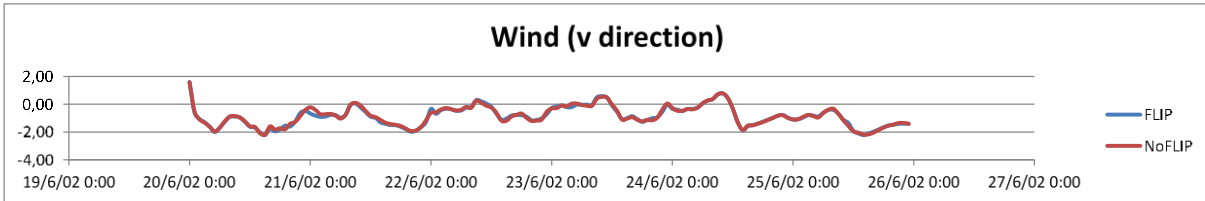
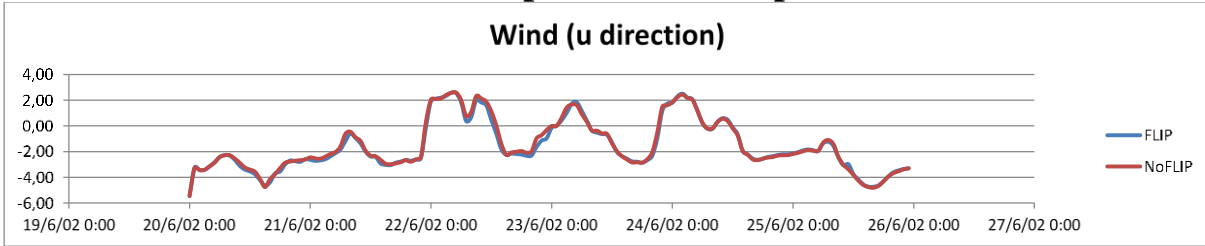


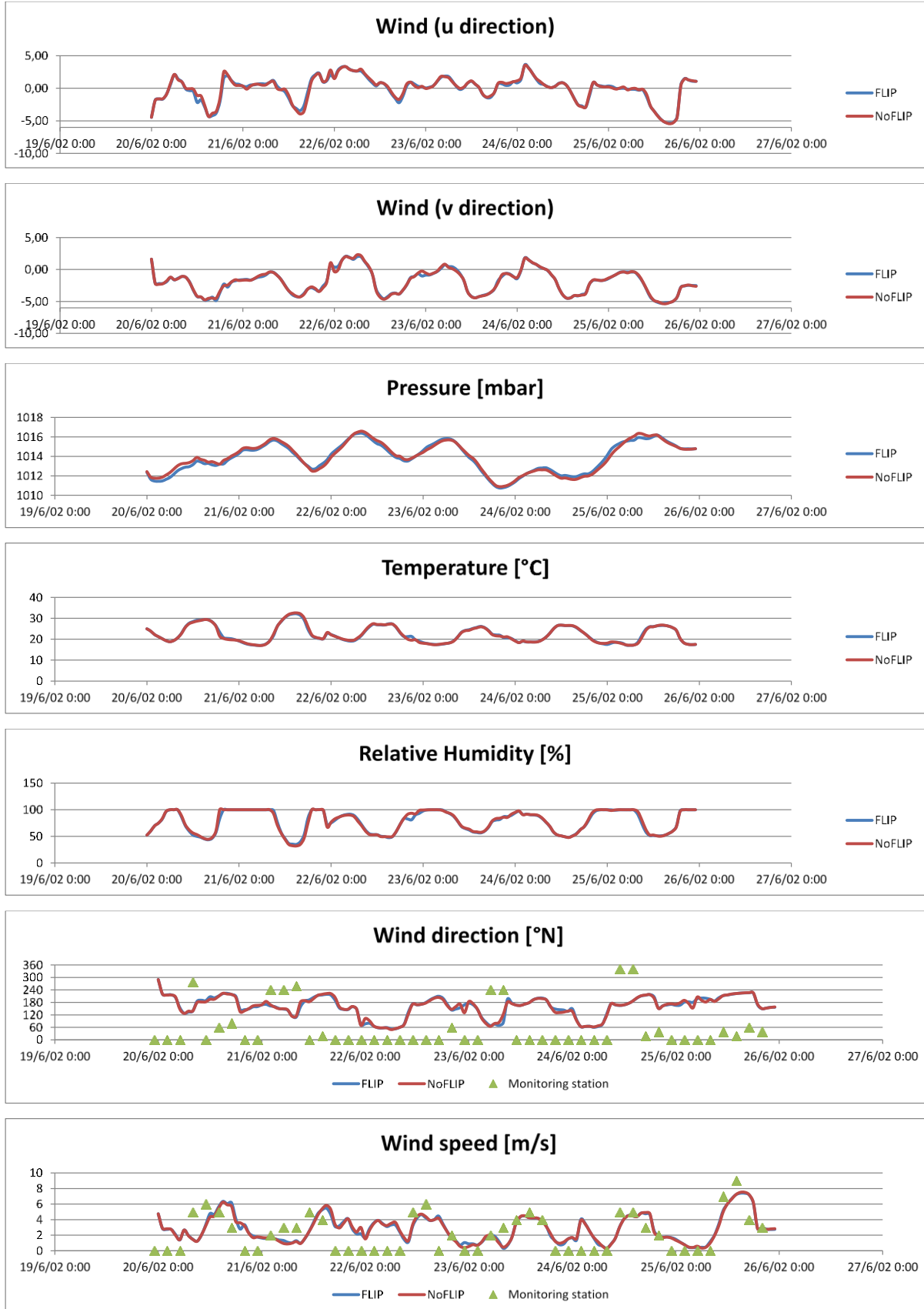
Figure e) : Graphe de corrélation des valeurs mesurées et estimées par krigeage ordinaire de l’ozone pour toutes les campagnes

Figures a) à e) : Graphes de corrélation des valeurs mesurées et estimées par krigeage ordinaire de l’ozone pour les différentes campagnes étudiées

Annexe 05 : Résultat de compilation RAMS pour les stations météo



Annexes



NB : la compilation RAMS a été réalisée pour les paramètres météorologiques de la station météo de la station de mesure de Ben Aknoun ainsi que pour la station météo de Dar El Bieda à titre de comparaison.

Production scientifique

PUBLICATIONS INTERNATIONALES

1. **Oucher N.**, Kerchich Y. and Kerbachi R., Assessment of annual tropospheric ozone using passive samplers in northern Algeria., Res. J. Chem. Environ, Vol. 23 (5), pp46-55, (2019).
2. A. Ghezloun, A. Saidane, **N. Oucher** and H. Merabet, Contribution of the conferences of the parties and the renewable energy role for the fight against climate change, AIP Conf. Proc. 1758, 030030 (2016).
3. **Nassima Oucher**, Rabah Kerbachi, Anissa Ghezloun, Hamza Merabet, “Magnitude of Air Pollution by Heavy Metals Associated with Aerosols Particles in Algiers”, Energy Procedia 74 (2015) 51 – 58, (Elsevier-Science-Direct).
4. A.Ghezloun, A.Saidane, **N.Oucher**, H.Merabet,”Actual case of Energy strategy in Algeria and Tunisia”, Energy Procedia 74 (2015) 1561 – 1570, (Elsevier-Science-Direct).
5. A. Ghezlouna, A. Saidane, **N. Oucher**, Energy policy in the context of sustainable development: Case of Morocco and Algeria, Energy Procedia 50 (2014) 536 – 543, (Elsevier-Science-Direct).
6. A. Ghezlouna , A. Saidane, **N. Oucher** and S. Cherguia, “The Post-Kyoto”. Energy Procedia 36, pp 1 – 8, 2013
7. A. Ghezloun ; **N. Oucher**; S. Chergui. “Energy policy in the context of sustainable development: Case of Algeria and Tunisia”. TERRAGREEN 2012- Clean Energy Solutions for Sustainable Environment. February 16-19, 2012-Beirut, Lebanon, will be published in The Journal Energy Procedia (Elsevier – Science Direct).
8. A. Ghezloun ; S. Chergui; **N. Oucher**. “CDM projects of renewable energy (case study) “. TERRAGREEN 2012- Clean Energy Solutions for Sustainable Environment. February 16-19, 2012-Beirut, Lebanon, will be published in The Journal Energy Procedia (Elsevier – Science Direct).
9. A. Ghezloun ; S. Chergui; **N. Oucher**. “Algerian energy strategy in the context of sustainable development (Legal framework)”. Energy Procedia 6, pp. 319-324, 2011 (Elsevier – Science Direct)
10. **Nassima Oucher** and Rabeh Kerbachi, “Evaluation of Air Pollution by Aerosol Particles Due to Road Traffic: A Case Study from Algeria”, Procedia Engineering, Volume 33, 2012, pp. 415–423, ISWEE'11.
11. Rabah Kerbachi, **N Oucher**, A Bitouche, N Berkouki, B Demri, Ménouer Boughédaoui, Robert Joumard, « 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, pp. 31-40, 2009.

COMMUNICATIONS INTERNATIONALES

- 1. 27th International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution 2019**
Theme: "Ozone photochemical pollution over the northern of Algeria: Cartography and Modelling"
- 2. 4th International Conference on Advances in Mechanical Engineering, ICAM, Istanbul 2018**
Theme: "Foliar damage caused by tropospheric ozone pollution on tomato in Algiers"
- 3. Premier Séminaire sur les Energies Renouvelables et l'Environnement, Institut des Sciences et Technologie (IST-CUTAM), 2018 à Tamanrasset**
*Theme : 'Effets des teneurs d'ozone troposphérique sur la tomate *Lycopersicon esculentum* Mill.cv. Martez : Evaluation des dommages foliaire'*
- 4. Young Scientists' Conference 2015, Academy of Science of South Africa**
Theme: "Gender equality in science and technology in Algeria".
- 5. International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15, Beirut**
Theme: "Magnitude of Air Pollution by Heavy Metals Associated with Aerosols Particles in Algiers".
- 6. International Symposium on Catalysis and Specialty Chemicals «ISCSC2012»**
Theme: "Sampling Techniques of Air Pollutants in Ambient Air".
- 7. International Conference on Energy and Sustainable Development**
Thème: "Technologie solaire pour le traitement de l'eau".
- 8. The First International Seminar on Water, Energy and Environment "ISWEE"**
Theme: "Evaluation of Air Pollution by Aerosol Particles in Algiers".
- 9. 5ème Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement «CERE 2010».**
Thème: «Évolution de la pollution de l'air par les particules d'aérosol et les métaux lourds qui leur sont associés sur un site de proximité à Alger».
- 10. Colloque International sur l'Environnement et les Transports dans Différents Contextes**
Thème: «Pollution par particules fines dans l'agglomération d'Alger».
- 11. Congrès International sur l'Environnement**
Thème: «Évolution annuelle des particules fines et des aéro-contaminants qui leur sont associés dans l'agglomération d'Alger (1999-2003)».
- 12. World Environment Seminar**
Thème: «Influence des émissions du trafic routier sur les aérosols atmosphériques».
- 13. 1er Séminaire International sur l'Environnement et les Problèmes Connexes**
Thème: «Étude de la pollution de l'air par les particules fines et les métaux lourds qui leur sont associés à Alger».
- 14. 2ème Journées Scientifiques «ANDRS»**
Thème: "Etude de la biodégradabilité de l'insecticide organochloré" lindane "par des procédés d'épuration biologique".

Assessment of annual tropospheric ozone using passive samplers in northern Algeria

Oucher Nassima^{1,2*}, Kerchich Yacine³ and Kerbachi Rabah²

1. Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, BP 62 Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340, Algiers, ALGERIA

2. Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement, Ecole Nationale Polytechnique, ENP, 10 Avenue Hassen Badi, B.P. 182, El Harrach, Algiers, ALGERIA

3. Materials and Environmental Laboratory, University of Medea, Ain d'Heb, 26001 Medea, ALGERIA *n.oucher@cder.dz

Abstract

This study presents tropospheric ozone (O₃) pollution levels measured at fifty (50) different sites (urban and suburban) over two-year period (2012 and 2013) in Algiers. During this period, four weekly sampling campaigns were carried out using the Radiello passive diffusive tubes. The total number of the collected samples was 177. These samples underwent a UV-VIS spectrophotometry analysis.

The results obtained showed that the average O₃ measured concentrations on all sites for the set of campaigns carried out ranged from 44.26 to 213.18 μg m⁻³ and the annual O₃ average during the study period was 156.60 μg m⁻³ with minimum and maximum average values of 100.80 and 211.25 μg m⁻³ respectively. These values are lower than the limit value of 200 μg m⁻³ and higher than the objective air quality value of 110 μg m⁻³, set by Algerian Executive Decree. In addition, ozone pollution levels over a period of 8h and 24h were measured on urban site. The study of seasonal variations showed high levels of ozone concentrations during the summer period compared to the winter period. A mapping of the spatial distribution of the mean O₃ mean concentrations was performed using the ArcGIS software.

Keywords: Tropospheric, ozone, passive samplers, seasonal variations, ArcGIS.

Introduction

Tropospheric ozone is one of the most important pollutant in the atmosphere causing several effects on human health. According to the 2015 European Environment Agency (EEA) report on air quality in Europe, exposure to ozone was found to be responsible for 17,000 premature deaths⁸. In addition to its effect on health, this pollutant also has significant adverse effects on vegetation, ecosystems and materials³². Ozone also exerts a significant influence on the radiation budget of the atmosphere owing to its properties as a greenhouse gas⁷. This pollutant called secondary is formed at ground level when primary pollutants (called precursors) such as nitrogen oxides and volatile organic compounds, which come from natural and anthropogenic sources, are transformed in the atmosphere by action of solar rays^{4,30}.

In urban areas, several studies have shown that the emission of these precursors comes mainly from by anthropogenic processes such as industry, power plants, domestic heating systems and mobile sources, mainly from vehicular sources on road networks in urbanised area.⁹

The high concentrations of this atmospheric pollution rich in ozone, also known as "smog", on the presence in the air of high concentrations of ozone precursors and the high intensity of the solar radiation. This is specific to different climates, in particular the Mediterranean climate, of which Algeria is part, characterized by high temperature, high insulation and the frequent occurrence of stagnant air masses.¹³

Several studies have shown that tropospheric ozone pollution increases with the growth of urban agglomerations and economic development³⁵. The North of Algeria is no exception and is now experiencing a rapid development of urbanization and road networks, which have contributed greatly to the degradation of the ambient air quality. At present, only some occasional data collected by scientists and researchers are available to give an idea of the air quality in Algiers²⁰.

According to the different studies carried out, it has been shown that concentrations of ground-level ozone in the atmosphere have decreased overall in the world, especially in the countries of the European Union and in North America^{14,21} and have been steadily increasing for a decade¹⁰. Countries such as France, Germany, the Czech Republic, Greece, Italy and Australia recorded a decrease in their ozone concentrations in 2010 compared to 2001.^{14,22}

Therefore, ozone is one of the six criteria pollutants regulated by the US Environmental Protection Agency (EPA) through National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)²³. WHO's health protection threshold of O₃ is estimated at 160 μg m⁻³ on one hour.³⁶

Currently, among the methods used for measuring ozone, the passive sampling technique is often used. This technique makes it possible unlike continuous measurement stations, to cover at a lower cost a large geographical area and to obtain a high level of information on the spatial distribution of a pollutant in the study area^{29,26}. Thus, from the obtained results of analysis, a cartography of the spatial distribution of the pollutant can be achieved by the application of geostatistical technics using Kriging measured