

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : Génie de l'Environnement

Laboratoire : Sciences et Techniques de l'Environnement

Thèse de DOCTORAT en SCIENCES

**COMPOSITION MINERALE ET ORGANIQUE DES
AEROSOLS NATURELS ET ANTHROPIQUES ET
LEUR DISTRIBUTION DE TAILLE DANS
L'ATMOSPHERE**

MERABET Hamza

Directeur de thèse : M. KERBACHI Rabah, Professeur à L'ENP d'Alger

Co-Directeur de thèse : M. YASSAA Noureddine, Professeur à L'USTHB

Présentée et Soutenue publiquement le 14/10/2021 à l'ENP

Devant le jury :

Président	: Professeur BELHANACHE Naima, ENP
Rapporteur/Promoteur	: Professeur KERBACHI Rabah, ENP
Co-Promoteur	: Professeur YASSAA Noureddine, CDER
Examineurs	: Professeur BOUGHEDAOUI Ménouer, Université de Blida : Dr KERCHICH Yacine, ENP : DR HADJ-ARAB Amar, CDER
Invité	: Professeur MIHALOPOULOS Nikolaos, Université de Crète, Grèce

ENP 2021

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : Génie de l'Environnement

Laboratoire : Sciences et Techniques de l'Environnement

Thèse de DOCTORAT en SCIENCES

**COMPOSITION MINERALE ET ORGANIQUE DES
AEROSOLS NATURELS ET ANTHROPIQUES ET
LEUR DISTRIBUTION DE TAILLE DANS
L'ATMOSPHERE**

MERABET Hamza

Directeur de thèse : M. KERBACHI Rabah, Professeur à L'ENP d'Alger

Co-Directeur de thèse : M. YASSAA Noureddine, Professeur à L'USTHB

Présentée et Soutenue publiquement le 14/10/2021 à l'ENP

Devant le jury :

Président : Professeur BELHANACHE Naima, ENP
Rapporteur/Promoteur : Professeur KERBACHI Rabah, ENP
Co-Promoteur : Professeur YASSAA Noureddine, CDER
Examineurs : Professeur BOUGHEDAOUI Ménouer, Université de Blida
: Dr KERCHICH Yacine, ENP
: DR HADJ-ARAB Amar, CDER

Invité : Professeur MIHALOPOULOS Nikolaos, Université de Crète,
Grèce

ENP 2021

Laboratoire de Sciences et Techniques de l'Environnement
Ecole Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie
www.enp.edu.dz

ملخص: يتعلق هذا العمل بدراسة تلوث الهواء بواسطة الأهباء الطبيعية والبشرية المنشأ وتوزيع حجمها في الغلاف الجوي. تم التركيز بشكل خاص على دراسة السخام الكربوني (الكربون الأسود BC) وأجزائه الناتجة عن احتراق الوقود الأحفوري (BC_{ff}) واحتراق الخشب (BC_{wb}). تم قياس تركيزات BC لمدة عام في موقع شبه حضري في بوزريعة (الجزائر العاصمة) وخلال سبعة أشهر في موقع حضري بوسط الجزائر العاصمة بواسطة إيثالومتر. تم تقييم دورات اليوم وكذلك التغيرات الموسمية في تركيزات BC ونسبها إلى مصادر الانبعاثات الخاصة بها. في بوزريعة، بلغت معدلات التراكيز السنوية ل CB و BC_{ff} و BC_{wb} على التوالي 1.113؛ 1.064 و 0.049 ميكروغرام/م³. أظهرت دراسة مستويات BC وفق ثمان قطاعات من اتجاهات الرياح أن التلوث السائد في BC صادر من الشمال الغربي، مع تركيزات تصل إلى 5.000 ميكروغرام/م³. كما تم إجراء دراسة لتوزيع BC حسب مصدر الرياح للفترة الرطبة والجافة، تلاها تحليل مسارات الرجعية للنقل لمسافات طويلة وخرائط النمذجة. في وسط الجزائر العاصمة، بلغ متوسط تراكيز BC في الجو مستويات عالية جدا وهي أعلى تسعة أضعاف من المتوسط السنوي المقاس في بوزريعة. تظهر الدراسة أن أكثر من 93% من BC يتكون من BC_{ff} النابع من أنشطة النقل وغيرها من انبعاثات احتراق الوقود الأحفوري. بلغت مستويات التلوث ب PM1، PM2.5 و PM10 المقاسة في بوزريعة 7.82؛ 10.88 و 31.57 ميكروغرام/م³ على التوالي، مع متوسط درجات بلغت كل منها 8.71؛ 12.11 و 33.81 ميكروغرام/م³، كانت هذه التراكيز أعلى في الموقع الحضري بوسط الجزائر العاصمة. بالإضافة إلى ذلك، هذه الجزيئات الدقيقة مشحونة للغاية ب BC (أكثر من 50%). كشف تقييم أثر ال BC على الإشعاع الشمسي المباشر الطبيعي (DNI) والطاقة الشمسية المنتجة عن انخفاض أقصى قدره 30.2% ل DNI و 37% للطاقة الشمسية. تم في هذا العمل عرض أهباء أخرى مثل المواد العضوية، SO_4^- ، NH_4^+ ، و Cl^- التي تمت دراستها في جزيرة كريت (اليونان).

الكلمات الدالة: الهباء الجوي، السخام الكربوني، جسيمات 10PM و DNI، PM2,5، الجزائر العاصمة، بوزريعة، كريت، أثينا.

Abstract: This work focuses the study of air pollution by natural and anthropogenic aerosols and their size distribution in the atmosphere. Particular emphasis was placed on the study of soot carbon (Black carbon BC) and its fractions resulting from fossil fuels combustion (BC_{ff}) and wood burning (BC_{wb}). The concentrations of BC were measured over one year in a suburban site in Bouzaréah (Algiers) and for seven months in an urban site in Algiers center by an aethalometer. The diurnal cycles as well as seasonal variations of BC concentrations have been evaluated and attributed to their emission sources. In Bouzaréah, the annual average concentrations of BC, BC_{ff} and BC_{wb} were 1,113; 1,064 and 0,049 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectively. Segregating BC levels into eight wind sectors showed that the prevailing BC pollution with concentrations reaching up to 5,000 $\mu\text{g m}^{-3}$ originated from the North-West wind sector. A source apportionment of BC for the wet and dry period was also performed followed by a back trajectory cluster analysis for long-range transport. In central Algiers, the average atmospheric contents in BC reached very high levels which are nine times higher than the annual average measured in Bouzaréah. The study shows that more than 93% of the BC is made up of BC_{ff} from transport activities and other fossil fuel combustion emissions. The PM1, PM2,5 and PM10 pollution levels measured at Bouzaréah reached 7,82; 10,88 and 31,57 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectively, with respective average contents of 8,71; 12,11 and 33,81 $\mu\text{g m}^{-3}$. These levels are higher at the urban site of Algiers center. In addition, these fine particles are highly charged with BC (more than 50%). The impact assessment of BC on normal direct radiation (DNI) and solar energy produced revealed a maximum decrease of 30.2% for DNI and 37% for solar energy. Other aerosols such as organic matter, SO_4^- , NO_3^- , NH_4^+ , and Cl^- studied in Crete (Greece) are presented in this work.

Key words: Aerosols, black carbon, particles PM10 and PM2,5, DNI, Algiers, Bouzaréah, Crete, Athens.

Résumé : Ce travail porte sur l'étude de la pollution de l'air par les aérosols naturels et anthropiques et leur distribution de taille dans l'atmosphère. C'est ainsi que nous nous sommes intéressés, particulièrement, à l'étude du carbone suie (Black carbon BC) et ses fractions issues de la combustion des hydrocarbures fossiles (BC_{ff}) et combustion du bois (BC_{wb}). Les concentrations de BC ont été mesurées sur une année en un site semi urbain à Bouzaréah (Alger) et pendant sept mois en un site urbain à Alger centre par un aéthalomètre. Les cycles diurnes ainsi que les variations saisonnières des concentrations de BC ont été évalués et attribués à leurs sources d'émission. A Bouzaréah, les concentrations moyennes annuelles de BC, BC_{ff} et BC_{wb} s'élevaient respectivement à 1,113 ; 1,064 et 0,049 $\mu\text{g m}^{-3}$. L'étude du BC selon huit secteurs des directions de vents a montré que la pollution dominante en BC, avec des concentrations atteignant 5,000 $\mu\text{g m}^{-3}$, provenait du Nord-Ouest. Une étude de répartition de BC par source de vent pour la période humide et sèche a également été effectuée, suivie d'une analyse par rétro trajectoires pour le transport à longue distance et des cartes de modélisation. A Alger centre, les teneurs atmosphériques moyennes en BC ont atteint des niveaux très élevés qui sont neuf fois plus élevées que la moyenne annuelle mesurée à Bouzaréah. L'étude montre que le BC est constitué à plus de 93 % de BC_{ff} issu des activités de transport et autres émissions de combustion d'hydrocarbures fossiles. Les taux de pollution par les particules PM1, PM2.5 et PM10 mesurés à Bouzaréah ont atteint respectivement 7,82 ; 10,88 et 31,57 $\mu\text{g m}^{-3}$, avec des teneurs moyennes respectives de 8,71 ; 12,11 et 33,81 $\mu\text{g m}^{-3}$. Ces niveaux sont plus élevés au site urbain d'Alger centre. De plus, ces particules fines sont fortement chargées en BC (plus de 50%). L'évaluation de l'impact du BC sur le rayonnement direct normal (DNI) et l'énergie solaire produite a révélé une diminution maximale de 30.2% pour le DNI et de 37% pour l'énergie solaire. D'autres aérosols tels que les matières organiques, SO_4^- , NO_3^- , NH_4^+ , et Cl^- étudiés à Crète (Grèce) sont présentés dans ce travail.

Mots clés : Aérosol, carbone suie, particules PM10 et PM2.5, DNI, Alger, Bouzaréah, Crète, Athènes.

DEDICACES

A l'âme de mon père Mohand-Amokrane, qui aurait été fier d'assister à ma soutenance

A ma mère, qui est ma première école et qui me soutenait depuis mon premier souffle

A mon épouse, qui est à mes côtés dans toutes les situations

A ma fille Malak 'ma lumière'

A mes frères et sœurs, qui me sont très chers

A mes neveux et nièces

A la famille MERABET de Bejaia

A ma belle famille

A tous mes amis et collègues

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le Professeur Rabah KERBACHI qui m'a honoré par son encadrement, et pour tous ses conseils, sa confiance et son aide précieuse.

Mes remerciements s'adressent, également, au Professeur Noureddine YASSAA pour son co-encadrement, son aide précieuse durant la réalisation de la partie pratique au Centre de Développement des Energies Renouvelables et de m'avoir fait confiance et donné chance de participer à des événements qui m'ont permis de rencontrer les pionniers du domaine de la Recherche.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance au Professeur Nikolaos MIHALOPOULOS qui m'a accueilli au laboratoire de Chimie de l'Atmosphère de l'Université de Crète en Grèce, où j'ai pu réaliser une partie de mon travail de recherche, tout en me familiarisant avec des appareils de pointe, utilisés dans la mesure des polluants atmosphériques. Son encadrement durant mon stage ainsi que l'implication des chercheurs de son équipe m'ont été très utiles.

Ma gratitude s'adresse également au Professeur Maria KANAKIDOU, Directrice du Département de Chimie à l'Université de Crète pour son soutien durant mon séjour de bourse PNE et son aide scientifique précieuse dans le domaine de la modélisation atmosphérique.

Je remercie infiniment le Professeur Jean SCIARE pour son aide durant mon stage au Cyprus INSTITUTE à Chypre.

Mes remerciements particulières s'adressent au Professeur Naima BELHANECHÉ de m'avoir honoré en acceptant de présider le jury de ma soutenance de Doctorat.

Je tiens aussi à remercier les membres du Jury ; le Pr Ménouer BOUGHEDAOUÏ, le Dr Amar HADJ-ARAB et le Dr Yacine KERCHICH d'avoir accepté à examiner ma thèse de Doctorat.

Ma gratitude est adressée au personnel de l'Ecole Nationale Polytechnique, où, j'ai pu avoir une formation de qualité depuis 2003 à ce jour.

Je remercie le personnel et Chercheurs du Centre de Développement des Energies Renouvelables qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements s'adressent à la Direction de la Coopération et des Echanges Interuniversitaires au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique pour leur aide précieuse durant la mise en œuvre de la procédure de Bourse PNE.

Je présente mes remerciements aux Docteurs et Chercheurs du département de Chimie de l'Université de Crète : Pavlos ZARMPAS, Georgos KOUVARAKIS, Dimitris, Nikos KALAVITIS, Maria Tsakaraki et Elini pour leur aide et leur sympathie.

Je remercie le personnel de l'Office Nationale de la Météorologie quant à la partie relative à l'acquisition des données atmosphériques, spécialement M. Mohamed MIMOUNI.

Mes remerciements s'adressent aussi à la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) pour avoir mis en ligne le modèle HYSPLIT, qui permet de suivre la trajectoire des masses d'air.

Je remercie, également, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) pour avoir mis en ligne le model MODIS, qui permet d'avoir les caractéristiques du ciel (nuages, aérosols, température,...), qui sont très utiles pour l'interprétation des données de la pollution atmosphérique.

Je présente aussi ma gratitude aux responsables et personnels du CHU Mustapha Bacha qui nous ont permis d'installer la station de la qualité de l'air NESMA au sein de leur établissement, particulièrement, le Pr Rachid BELHADJ.

Table des matières

LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES SYMBOLES	
INTRODUCTION GENERALE.....	15
I.GENERALITES SUR LES AEROSOLS ATMOSPHERIQUES	19
I.1. Aérosols et sources.....	19
I.1.1. Les aérosols primaires.....	19
I.1.2. Les aérosols secondaires	19
I.2. Propriétés des aérosols	21
I.2.1. Propriétés chimiques	21
I.2.2. Propriétés physiques.....	22
I.2.3. Propriétés optiques.....	23
I.3. Formation des aérosols.....	24
I.3.1. Nucléation des gaz	24
I.3.2. Condensation des gaz sur l'aérosol	24
I.3.3. Coagulation d'aérosol	24
I.4. Transport et dépôt des aérosols	26
I.5. Impact des aérosols sur l'environnement	27
I.5.1. Impact sur la santé.....	27
I.5.2. Impact sur le rayonnement	28
I.5.3. Impact sur la couche d'ozone.....	29
I.5.4. Impact sur les cycles biogéochimiques.....	30
I.5.5. Impact sur les secteurs de transport	30
I.6. Carbone suie (black carbon BC)	31
I.6.1. Sources d'émission.....	31
I.6.2. Caractéristiques du BC.....	31
I.6.3. Impact du BC sur la santé	32
I.6.4. Impact sur le climat.....	32
I.7. Modélisation des aérosols atmosphériques	33
I.7.1. Modèle Hysplit (NOAA).....	34
I.7.2. MODELE MODIS (NASA).....	34
I.7.3. Modèle TM4-ECPL (Université de Crète).....	35
II.METHODOLOGIE EXPERIMENTALE	37
II.1. Techniques analytiques.....	37
II.1.1. Mesure du Black Carbon (Aéthalomètre AE33).....	37
II.1.2. Mesure d'autres aérosols (ACSM).....	40
II.1.3. Mesure des particules PM _i (FIDAS 200).....	41
II.2. Description des sites de mesure	45
II.2.1. Site de Bouzaréah	45
II.2.2. Site de Sidi M'hamed d'Alger-centre	46
II.2.3. Site de l'Askrem, Tamanrasset	46
II.2.4. Site de Crète, Grèce	46
II.2.5. Site d'Athènes, Grèce	46
II.3. Campagnes de mesures	47
III. Résultats et discussions	49
III.1. Etude du black carbon	49
III.1.1. Carte des vents.....	49
III.1.2. Etude du black carbon à Bouzaréah	65
III.2. Variation des niveaux de BC à Alger-centre.....	105

III.2.1. Variation instantannée des niveaux de BC à Alger-centre	105
III.2.2. Variation journalière des teneurs en BC à Alger-centre.....	106
III.2.3. Teneurs annuelles moyennes, journalières et extrême du BC à Alger-centre	107
III.2.4. Cycle diurne des BC mesurés à Alger-centre.....	107
III.2.5. Variation des teneurs mensuelles en BC à Alger-centre	108
III.2.6. Variation hebdomadaire - Effet du week-end à Alger-centre.....	110
III.2.7. Variation des teneurs en BC durant les heures de pointe à Alger-centre	111
III.2.8. Comparaison des niveaux de BC mesuré à Alger et à Tamanrasset.....	112
III.2.9. Le black carbon et le rayonnement solaire	113
III.2.10. Le BC et les énergies renouvelables.....	121
III.3. Evolution des particules PMi.....	123
III.3.1. PMi à Alger-centre	123
III.4. Autres aérosols analysés par l'ACSM.....	133
III.4.1. Variabilité horaire des aérosols mesurés par l'ACSM	133
III.4.2. Variabilité journalière des aérosols mesurés par l'ACSM	135
III.4.3. Variabilité mensuelle des aérosols mesurés par l'ACSM.....	136
III.5. Modélisation.....	136
III.5.1. Modèle TM4-ECPL de l'Université de Crète.....	136
CONCLUSION GENERALE	141
Bibliographie	144
Annexes.....	153
Annexe 1 : Cartes des vents annuelles.	153
Annexe 2 : Cartes des vents mensuelles.....	161
Annexe 3 : Evolution mensuelle des teneurs en BC à Bouzaréah.....	169

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Sources des aérosols naturels et anthropiques (Airparif, 2008).....	21
Figure 2. La forme des aérosols atmosphériques (Heintzenberg et al., 2002).....	23
Figure 3. Effet climatique des aérosols atmosphériques (IGSD, 2009)	24
Figure 4. Distribution granulométrique des aérosols et leurs mécanismes de formation et de déposition (BORGIE, 2014)	25
Figure 5. Circulation globale des vents au niveau de la troposphère	26
Figure 6. Effet des particules sur le système respiratoire	28
Figure 7. Forçage radiatif des aérosols atmosphériques (GIEC, 2021).....	29
Figure 8. Eléments d'un modèle mathématique de transport chimique atmosphérique.....	33
Figure 9. Station NESMA du CDER, installée au CHU Mustapha Bacha.....	37
Figure 10. Principe de fonctionnement de l'aéthalomètre AE33 (Drinovec et al., 2013).....	39
Figure 11. Aéthalomètre AE33 utilisé pour la mesure du black carbon à Alger.....	39
Figure 12. Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM) utilisé à Crète pour la mesure de cinq aérosols.....	40
Figure 13. Analyseur de particules dans l'air (FIDAS 200).....	41
Figure 14. Schéma de la cellule de mesure du FIDAS 200.....	42
Figure 15. Courbe de calibration de la détection à 90° d'une source de lumière monochromatique (courbe rouge) et d'une lumière polychromatique (courbe noire FIDAS 200).....	43
Figure 16. Etapes de mesure des particules par le FIDAS 200	44
Figure 17. Schéma détaillé du FIDAS 200 équipé d'une station météorologique et d'un abri.....	45
Fig. 18. Sites de mesure des aérosols dans la présente étude	46
Figure 19. Sources des masses d'air utilisées pour la réalisation des cartes des vents.....	50
Figure 20. Carte des vents de la zone d'étude en 2005	52
Figure 21. Carte des vents de la zone d'étude en 2010	53
Figure 22. Carte des vents de la zone d'étude en 2015	54
Figure 23. Carte des vents annuelle moyenne de la zone d'étude de 2005 à 2015.....	55
Figure 24. Carte des vents de la zone d'étude durant l'hiver entre 2005 et 2015	56
Figure 25. Carte des vents de la zone d'étude durant le printemps entre 2005 et 2015	57
Figure 26. Carte des vents de la zone d'étude durant l'été entre 2005 et 2015	58
Figure 27. Carte des vents de la zone d'étude durant l'automne entre 2005 et 2015.....	59
Figure 28. Carte des vents moyenne de la zone d'étude durant les quatre saisons entre 2005 et 2015.....	59
Figure 29. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Janvier de 2005 à 2015	60
Figure 30. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois d'Avril de 2005 à 2015.....	61
Figure 31. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Juillet de 2005 à 2015	62
Figure 32. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois d'Octobre de 2005 à 2015.....	63
Figure 33. Carte des vents moyenne de la zone d'étude par mois entre 2005 et 2015.....	64
Figure 34. Carte des vents de l'année de mesure	65
Figure 35. Variation des concentrations du BC, BC _{ff} et BC _{wb} sur une année de mesure	66
Figure 36. Variation des concentrations journalières du BC, BC _{ff} et BC _{wb} sur une année de mesure... ..	66
Figure 37. Fraction de BC _{ff} et BC _{wb} dans le Black carbon.....	67
Figure 38. Teneurs moyennes en BC, BC _{ff} et BC _{wb} des jours de la semaine durant l'année de mesure.....	70
Figure 39. Teneurs moyennes en BC, BC _{ff} et BC _{wb} des jours de la semaine durant l'année de mesure.....	70
Figure 40. Variation des concentrations du BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le mois de Juillet 2014	71
Figure 41. Rétro-trajectoires des masses d'air du 18 Juillet 2014.....	72
Figure 42. Variation des concentrations du BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le mois d'Août 2014	72
Figure 43. Rétrotrajectoires des masses d'air du 4 Août 2014.....	73

Figure 44. Variation des concentrations des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le mois de Novembre 2014.....	74
Figure 45. Rétrotrajectoires des masses d'air du 24 Novembre 2014.....	74
Figure 46. Variation des concentrations des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le mois de Décembre 2014.....	75
Figure 47. Variation des concentrations des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le mois de Mars 2015.....	75
Figure 48. Rétrotrajectoires des masses d'air du 10 March 2015.....	76
Figure 49. Variation des concentrations des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le mois d'Avril 2015.....	76
Figure 50. Rétro trajectoires des masses d'air du 18 Avril 2015.....	77
Figure 51. Comparaison saisonnière des concentrations des BC, BC _{ff} et BC _{wb}	77
Figure 52. Moyenne du BC, BC _{ff} et BC _{wb} pendant le jour, la nuit et les heures de pointe.....	79
Figure 53. Cycle diurne moyen des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant l'année de mesures.....	80
Figure 54. Moyennes horaires mensuelles en BC durant l'année de mesure.....	81
Figure 55. Variabilité du BC avec la vitesse du vent et la pluviométrie.....	82
Figure 56. Variation des teneurs en BC en fonction de la vitesse des vents.....	82
Figure 57. Variation des BC, BC _{ff} et BC _{wb} le 18 Mai 2014.....	83
Figure 58. Rétro-trajectoires des masses d'air du 18 Mai 2015.....	84
Figure 59. Variation des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le 27 Juin 2014.....	84
Figure 60. Variation des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le 29 Août 2014.....	85
Figure 61. Rétrotrajectoires des masses d'air du 29 Août 2014.....	85
Figure 62. Variation des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le 7 Septembre 2014.....	86
Figure 63. Rétro-trajectoires des masses d'air du 7 Septembre 2014.....	86
Figure. 64. Comparaison des variations du BC durant les deux dernières célébrations de la fête du Mawlid Enabawi.....	87
Figure 65. Variation des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant la célébration de la fête de l'Aid El Adha le 24 septembre 2014.....	88
Figure 66. Comparaison des variations du BC entre une journée sans voitures et la moyenne annuelle.....	88
Figure 67. Comparaison des variations du BC _{ff} entre une journée sans voitures et la moyenne annuelle.....	89
Figure 68. Variation journalière de l'exposant Angstrom durant l'année de mesure.....	90
Figure 69. Variation du BC avec la vitesse et la direction du vent.....	91
Figure 70. Variation des moyennes des BC, BC _{ff} et BC _{wb} avec l'analyse des ensembles de rétro-trajectoires.....	93
Figure 71. Carte de fréquence des rétro-trajectoires en été (juillet-août) 2014.....	94
Figure 72. Carte de fréquences des rétro-trajectoires en automne (septembre-octobre) 2014.....	95
Figure 73. Carte de fréquences des rétro-trajectoires en hiver (décembre 2014-janvier 2015).....	96
Figure 74. Carte de fréquence des rétro-trajectoires au printemps (mars-avril) 2015.....	97
Figure 75. Distribution des niveaux de BC selon la direction des vents.....	98
Figure 76. Distribution des sources de BC durant la période humide.....	99
Figure 77. Distribution des sources de BC durant la période sèche.....	100
Figure 78. Comparaison des moyennes journalières de BC à Alger et Athènes (Grèce).....	101
Figure 79. Comparaison des niveaux mensuels de BC à Alger et Athènes (Grèce).....	102
Figure 80. Site de la station de la qualité de l'air de Finokalia (Crète).....	102
Figure 81. Variation horaire des niveaux de BC à Alger et Crète (Grèce).....	103
Figure 82. Variation journalière des niveaux de BC à Alger et Crète (Grèce).....	104
Figure 83. Variation des moyennes mensuelles du BC à Alger et Crète.....	105
Figure 84. Variation des concentrations du BC mesuré à Alger-centre en site urbain.....	106
Figure 85. Evolution des moyennes journalières du BC en site urbain à Alger-centre.....	106
Figure 86. Cycle diurne des BC mesurés à Alger-centre en site urbain.....	107

Figure 87. Evolution des concentrations moyennes mensuelles des BC, BC _{ff} et BC _{wb} à Alger-centre	109
Figure 88. Rétro trajectoires des masses d'air du 03 Août 2017 réalisées par le modèle Hysplit.....	109
Figure 89. Rétro trajectoires des masses d'air du 11 Septembre 2017 réalisées par le modèle Hysplit	110
Figure 90. Teneurs moyennes en BC, BC _{ff} et BC _{wb} des jours de la semaine durant l'année de mesure	111
Figure 91. Teneurs moyennes en BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant les heures de pointe à Alger-centre (7h-9h)	112
Figure 92. Comparaison des niveaux de BC mesurés à Alger et à Tamanrasset.....	113
Figure 93. Variation des niveaux de BC et DNI durant l'année de mesure	114
Figure 94. Etat du ciel dans la semaine incluant la journée du 9 Juin 2014.....	115
Figure 95. Etat du ciel dans la semaine incluant la journée du 25 Août 2014.....	115
Figure 96. Epaisseur optique des aérosols durant la semaine incluant le 9 Juin 2014	116
Figure 97. Epaisseur optique des aérosols durant la semaine incluant le 25 Août 2014.....	116
Figure 98. Pourcentage des particules fines durant la semaine du 9 Juin 2014.....	117
Figure 99. Pourcentage des particules fines durant la semaine du 25 Août 2014	117
Figure 100. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 07/06/2014.....	118
Figure 101. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 09/06/2014.....	118
Figure 102. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 05/07/2014.....	119
Figure 103. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 17/07/2014.....	119
Figure 104. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 31/7/2014.....	120
Figure 105. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 01/08/2014.....	120
Figure 106. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 25/08/2014.....	121
Figure 107. Comparaison de l'éclairement horizontal global avec la variation de la puissance maximale des panneaux propre et poussiéreux.	122
Figure 108. Evolution des teneurs journalières des PM _i mesurées à Alger-centre en site urbain.....	123
Figure 109. Rétro-trajectoire des masses d'air du 6 Janvier 2018 suivant le Modèle Hysplit	125
Figure 110. Evolution des moyennes mensuelles en PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₄ , PM ₁₀ et PM _{tot}	126
Figure 111. Evolution des moyennes saisonnières en PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₄ , PM ₁₀ et PM _{tot}	127
Figure 112. Evolution hebdomadaire des PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₄ , PM ₁₀ et PM _{tot}	128
Figure 113. Evolution des moyennes mensuelles de la température et l'humidité à Alger-centre.....	129
Figure 114. Variation de la pollution particulaire à Mustapha Bacha en fonction des conditions météorologiques durant le mois de mai 2017	131
Figure 115. Contribution en % des classes granulométriques PM ₁ , PM _{2,5} et PM ₄ aux PM ₁₀	131
Figure 116. Corrélation entre les PM _i à Alger-centre	133
Figure 117 . Variation des niveaux de cinq aérosols en Crète (Grèce)	134
Figure 118. Variation journalière des niveaux d'aérosols en Crète.....	135
Figure 119 : Moyennes annuelles des concentrations d'aérosols en Crète (Grèce)	136
Figure 120. Carte de la moyenne mensuelle du BC _{ins} et BC _{sol} durant les mois de juillet et octobre 2014	137
Figure 121. Carte de la moyenne mensuelle du BC _{sol} et BC _{sol} durant les mois de janvier et avril... ..	2015
Figure 122. Variation du BC _{ins} et BC _{sol} en juillet et octobre 2015	138
Figure 123. Variation du BC _{ins} et BC _{sol} en janvier et avril 2015	139
Figure 124. Carte des vents de la zone d'étude en 2006	153
Figure 125. Carte des vents de la zone d'étude en 2007	154
Figure 126. Carte des vents de la zone d'étude en 2008	155

Figure 127. Carte des vents de la zone d'étude en 2009	156
Figure 128. Carte des vents de la zone d'étude en 2011	157
Figure 129. Carte des vents de la zone d'étude en 2012	158
Figure 130. Carte des vents de la zone d'étude en 2013	159
Figure 131. Carte des vents de la zone d'étude en 2014	160
Figure 132. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Février de 2005 à 2015.....	161
Figure 133. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Mars de 2005 à 2015.....	162
Figure 134. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Mai de 2005 à 2015.....	163
Figure 135. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Juin de 2005 à 2015	164
Figure 136. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois d'Août de 2005 à 2015.....	165
Figure 137. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Septembre de 2005 à 2015	166
Figure 138. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Novembre de 2005 à 2015	167
Figure 139. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Décembre de 2005 à 2015.....	168
Figure 140. Variation des concentrations des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le mois de Juin 2014	169
Figure 141. Rétrotrajectoires des masses d'air du 8 Juin 2014	169
Figure 142. Variation des concentrations du BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le mois de Septembre 2014...	170
Figure 143. Rétro trajectoires des masses d'air du 12 Septembre 2014.....	171
Figure 144. Variation des concentrations des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le mois d'Octobre 2014	172
Figure 145. Rétro trajectoires des masses d'air du 9 Octobre 2014	172
Figure 146. Rétro trajectoires des masses d'air du 10 Octobre 2014.....	173
Figure 147. Variation des concentrations des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le mois de Janvier 2015	174
Figure 148. Rétro trajectoires des masses d'air du 9 Janvier 2015	174
Figure 149. Variation des concentrations des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le mois de Février 2015	175
Figure 150. Rétro trajectoires des masses d'air du 13 Février 2015	175
Figure 151. Variation des concentrations des BC, BC _{ff} et BC _{wb} durant le mois de Mai 2015	176
Figure 152. Rétro trajectoires des masses d'air du 13 Mai 2015	176

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Teneurs annuelles, journalières moyennes et extrêmes des trois types de black carbon à Bouzaréah.....	67
Tableau 2. Evolution du BC avec le niveau de la couche limite atmosphérique.....	83
Tableau 3. Teneurs annuelles moyennes et extrêmes des trois types de black carbon à Alger-centre	107
Tableau 4. Comparaison des niveaux de pollution par le BC selon la nature du site.....	113
Tableau 5. Variation de la baisse des taux d'énergie lors de deux journées à ciel clair (les 18 avril 2017 et 10 mars 2017) due au BC	121
Tableau 6. Variation de la baisse des taux d'énergie lors de deux journées à ciel clair (les 18 avril 2017 et 10 mars 2017) due au BC	122
Tableau 7. Teneurs moyennes des PMi mesurées à Alger-centre en 2017/2018	123
Tableau 8. Variation des moyennes mensuelles en PM1, PM2,5, PM4, PM10 et PMtot	125
Tableau 9. Variation des moyennes saisonnières en PM1, PM2,5, PM4, PM10 et PMtot.....	126
Tableau 10. Teneurs des PM1 et PM2,5 en black carbon	133

LISTE DES SYMBOLES

BC : Black carbon

BC_{ff}: Black carbon fossil fuel

BC_{wb}: Black carbon wood burning

CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables

DNI : Irradiation normale directe

HYSPLIT: Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model

K : Paramètre de compensation du chargement

NOA : National Observatory of Athens

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

ONM : Office Nationale de Météorologie

PCBs : Polychlorobiphényles

PCDDs : Polychlorinated dibenzo-p-dioxins

α : Exposant Angström

λ : Longueur d'onde

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

La problématique de la pollution atmosphérique a suscité ces dernières décennies l'intérêt de la communauté scientifique, des décideurs et de la société civile, vu son impact direct sur la santé humaine et le réchauffement climatique. C'est le cas, notamment, des taux élevés en particules d'aérosols. Celles-ci sont, généralement, produites par émission directe ou condensation de gaz, et leur nature, est infiniment, plus complexe que celles des polluants gazeux. La régulation des teneurs en particules d'aérosol nécessite, donc, une bonne connaissance des émissions gazeuses, des processus de transformation et des mécanismes de lessivage de l'atmosphère (Delmas et al., 2005).

En plus des effets sur la santé, des rapports scientifiques alarmants du panel des Nations Unies sur les changements climatiques, le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat) ont tiré la sonnette d'alarme sur l'impact des aérosols sur les changements climatiques. A cet effet, le GIEC a élargi, en mai 2019, la liste des gaz et d'aérosols ayant un effet de serre par d'autres éléments qui ont le même effet, malgré leurs courtes durées de vie, dont les particules fines et le carbone suie (connu sous le nom de « noir de carbone » ou « carbone noir »).

En Algérie, des études antérieures (Yassaa et al., 2001, Kerbachi et al., 2006, Oucher and Kerbachi, 2012, Kerchich and Kerbachi, 2012, Talbi et al., 2017 and Belhout et al., 2018) ont montré que les centres urbains font l'objet d'une intense pollution de l'air par les particules fines et la pollution photochimique. En matière de surveillance en continu de la qualité de l'air, le réseau de surveillance Samasafia, installé à Alger en 2002, est à l'arrêt depuis 2009.

Une étude récente, élaborée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), a révélé que l'Algérie fait partie des zones les plus polluées par les particules atmosphériques, dues aux activités humaines et aux vents de sables menaçant la santé des citoyens sous diverses maladies cardiovasculaires.

Les particules, les plus incriminées, sont des particules fines « PM_{2,5} » (particules de diamètre inférieur à 2,5 µm), et particulièrement, les PM₁ (diamètre inférieur à 1µm), appelées, également, "particules Diesel".

Ces particules fines proviennent, essentiellement, des processus de combustion incomplète (trafic routier, etc.) et sont riches en suies ou imbrulés.

Ces suies se composent de carbone élémentaire, non fonctionnalisés, et de carbone organique. De par leur finesse et les composés toxiques qu'elles véhiculent (Hydrocarbures aromatiques polycycliques, HAP), les suies pénètrent profondément dans le système respiratoire où elles exercent des effets très nocifs. C'est la raison pour laquelle, plusieurs pays accordent une attention particulière à la pollution par le carbone suie, plus connu par le terme "black carbon".

Plusieurs auteurs ont montré que les teneurs en black carbon atteignent des niveaux inquiétant en milieu urbain (Yang et al., 2007; Sun et al., 2014 ; Wang et al., 2018). Wang et al., (2018) ont indiqué que le BC joue un rôle crucial dans la détérioration de la qualité de l'air, dépendant de plusieurs facteurs tels que la distribution verticale, la charge de masse, et le processus de vieillissement du BC. Des études menées par Yang et al., 2007 et Sun et al., 2014 dans des mégacités en Chine, ont révélé que les niveaux de BC enregistrés sont les plus élevés à travers le monde, avec une moyenne de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces pics élevés en BC ont été attribués à l'utilisation massive du charbon pour le chauffage et dans les autres utilisations énergétiques. D'autres travaux élaborés en Europe ont obtenu des concentrations moyennes en BC variant de 1.2 à $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dans des milieux urbains (Crilley et al., 2015; Birmili et al., 2016; Becerril-Valle et al., 2017; Diapouli et al., 2017).

L'impact de ce black carbon, qui est lié directement aux émissions des véhicules Diesel, a fait en sorte que ce type de véhicules est de plus en plus interdit à la circulation dans les grands centres urbains (Londres et Paris) (Font et al., 2019) et que la tendance vers les voitures électriques s'accélère.

En Algérie, la problématique du black carbon est, relativement, méconnue, et il n'existe, à ce jour, aucune étude sur l'état des lieux de la pollution atmosphérique par le BC, ni sur son ampleur, excepté, quelques mémoires de fin d'études encadrés dans le cadre de la présente thèse de Doctorat.

Les sources qui y contribuent ne manquent pourtant pas pour un pays pétrolier et gazier, d'une activité agricole basée principalement sur les moteurs à diesel, une production d'électricité dominée par le gaz (96%) et un parc automobile âgé et à une grande part dieselisé.

A Alger, par exemple, le parc automobile compte plus de 1.5 million de véhicules dont plus du tiers sont diésélisés, et le taux de diésélisation ne cesse d'augmenter¹. Ce parc automobile est, par ailleurs, âgé et mal entretenu, ce qui accentue ces émissions nocives.

Cette thèse permettra d'appréhender la pollution atmosphérique par les aérosols et de comprendre les phénomènes qui régissent son transport, son accumulation et son impact sur le rayonnement (absorption et/ou diffusion par le carbone suie) et les énergies renouvelables. Elle se propose d'améliorer nos connaissances sur les sources minérales et organiques des aérosols atmosphériques, liés aux émissions naturelles (érosion, vents de sable, feux de forêts, pollen...) et anthropiques (industrie, parc automobile, résidentiel, ...). Un accent particulier est porté à l'étude du carbone suie ou black carbone (BC), qui est mesuré pour la première fois à Alger par l'utilisation de l'aéthalomètre AE33 qui est un appareil de mesure en continu des différentes espèces de carbone en suspension dans l'air. La connaissance de la pollution de l'air par le BC nous permettra d'enrichir les données existantes sur la qualité de l'air et mettra à la disposition des décideurs un ensemble d'informations qui les aideront dans le choix des mesures à mettre en œuvre pour une meilleure qualité de l'air en Algérie.

Pour des raisons de comparaison, nous avons retenu deux types de sites de mesure, un site semi-urbain à Bouzaréah sur les hauteurs d'Alger et un site urbain à Alger centre.

¹ (<http://www.ons.dz/-Au-31-12-2014-.html>).

Toutes les mesures des polluants étudiés sont effectuées en continu sur des analyseurs automatiques équipant la station de surveillance mise en place par le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER).

Une comparaison des niveaux de pollution atmosphérique par le BC et les particules est présentée également dans ce travail entre Bouzaréah et Alger d'une part, et Athènes et Crète (Grèce), d'autre part. Les résultats des études en Grèce sont le fruit de notre travail réalisé dans le cadre d'une bourse PNE à l'Université de Crète (Grèce).

Le travail envisagé fera appel à l'élaboration de cartes des sources des vents basées sur les cartes de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), et couvrant la zone d'Alger et des villes limitrophes.

L'interprétation des résultats sera renforcée par des modèles développés par la NOAA, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et l'Université de Crète.

Les résultats de la présente étude seront d'un grand apport pour les décideurs et les épidémiologistes qui disposeront de données réelles sur la pollution atmosphérique.

Dans ce manuscrit nous présentons un résumé des travaux effectués et les résultats déduits au cours de nos investigations.

Ainsi, nous articulons le contenu de cette thèse comme suit :

- ✚ Introduction générale ;
- ✚ Généralités sur les aérosols ;
- ✚ Méthodologie expérimentale ;
- ✚ Résultats et discussions ;
- ✚ Conclusion générale.

Chapitre I.

**Généralités sur les aérosols
atmosphériques**

I.GENERALITES SUR LES AEROSOLS ATMOSPHERIQUES

Au cours des dernières décennies, les émissions anthropiques d'aérosols dans l'atmosphère ont augmenté de façon spectaculaire, induisant divers effets sur la santé humaine (Seinfeld et PANDIS, 2006). Il a été rapporté dans plusieurs études que l'exposition sur le long terme aux particules fines, liées à la combustion, est un important facteur de risque environnemental provoquant la mortalité par le cancer cardio-pulmonaire et pulmonaire (Sandradewi et al, 2008).

Dans ce chapitre, nous présentons un bref rappel théorique de notre thématique indispensable à la compréhension des phénomènes liés à la formation des aérosols, leur transport et leurs interactions avec l'environnement.

I.1. Aérosols et sources

Les aérosols, particules en suspension dans l'atmosphère, découlent directement des émissions de particules et de la conversion de certains gaz en particules atmosphériques. Les aérosols atmosphériques proviennent de sources naturelles, telles que l'érosion éolienne, les embruns marins, les volcans, et les activités anthropiques, comme, par exemple, le trafic routier et l'industrie des matériaux (Seinfeld and Pandis, 2006).

I.1.1. Les aérosols primaires

Les aérosols primaires sont ceux qui sont émis directement par les sources naturelles (Erosion éolienne, embruns marins, volcans, etc.) ou anthropiques comme, par exemple, le trafic routier et l'industrie des matériaux.

La fraction grossière des particules primaires est, essentiellement, formée par des procédés mécaniques, tels que l'érosion. Toutefois, les plus fines sont émises soit, directement, sous forme solide, soit sous forme de vapeurs qui se condensent très rapidement pour former des particules très fines.

La méditerranée est bordée sur sa rive nord par les pays européens industrialisés, agissant comme une source continue d'émissions anthropiques dans l'atmosphère, et sur la rive sud par les régions arides et désertiques d'Afrique du Nord (Sahara) et le Désert Arabe, qui sont considérées comme une source de poussières naturelles de l'écorce terrestre (Martin et al., 1989; Chester et al., 1999; Guerzoni et al., 1999a).

Les principales activités humaines, qui émettent des particules primaires dans l'atmosphère, sont l'industrie de fabrication des matériaux (cimenteries, carrières, etc.), le BTP, l'agriculture, le secteur résidentiel/tertiaire (essentiellement la combustion du bois, charbon et fioul), les transports, en particulier routier et aérien, et la transformation d'énergie.

I.1.2. Les aérosols secondaires

Les aérosols secondaires sont ceux qui ne sont pas directement émis dans l'atmosphère, mais résultent des processus de conversion « gaz-particule ». Il existe trois principales espèces d'aérosols secondaires :

- a. **Les sulfates** : Ils proviennent de l'oxydation du SO_2 en acide sulfurique (H_2SO_4). Il s'agit de sulfates marins (sea-sulphates, SS), issus de l'oxydation du diméthylsulfure produit par les vagues (éclatement des bulles d'air), et de sulfates, dus à la conversion et à l'oxydation du SO_2 anthropique émis par l'industrie et les centrales thermiques (non-sea sulphates, NSS) (Airparif, 2008).

- b. Les nitrates :** Issus de l'oxydation du dioxyde d'azote NO_2 en acide nitrique (HNO_3). Cette réaction peut se produire en phase gazeuse, où le nitrate est associé à l'ammonium quaternaire (NH_4^+) ou encore s'effectuer dans la fraction grossière, lorsque le nitrate est associé à des sels marins (Na^+) ou des poussières calcaires (Ca^{2+}).
- c. Les composés organiques secondaires :** provenant de réactions chimiques à partir des COV (Composés Organiques Volatils), issus des sources anthropiques et biogéniques comme les terpènes.

On retrouve, également, les aérosols ruraux, qui sont, principalement, d'origine naturelle, mais avec une influence modérée des sources anthropiques (Hobbs et al., 1985). La distribution en nombre est caractérisée par deux modes à des diamètres d'environ 0,02 et 0,08 μm , respectivement (Jaenicke, 1993), tandis que la distribution de masse est dominée par le mode grossier à environ 7 μm (Seinfeld and Pandis, 2006).

Les particules, existant au-dessus des océans, sont en grande partie d'origine marine (Savoie et Prospero 1989). La distribution de taille des aérosols marins se trouve sous trois modes : celui d'Aitken ($D_p < 0.1\mu\text{m}$), d'accumulation ($0.1 < D_p < 0.6\mu\text{m}$), et grossiers $D_p > 0.6\mu\text{m}$ (qui représente 95% de la masse totale des aérosols), (Fitzgerald, 1991).

Les aérosols désertiques, sont, bien sûr, présents au Sahara, mais s'étendent, considérablement, sur les régions adjacentes telles que les océans (Rijkenberg et al., 2012). Leur distribution de taille est similaire à celle des aérosols continentaux. Toutefois, elle dépend fortement de la vitesse du vent. Leur distribution en nombre a tendance à présenter trois modes qui se chevauchent à des diamètres de 0,01 μm ou moins, 0,05 μm , et 10 μm , respectivement (Jaenicke, 1993).

Nous présentons à la figure 1 les différentes sources d'émission d'aérosols dans l'air.

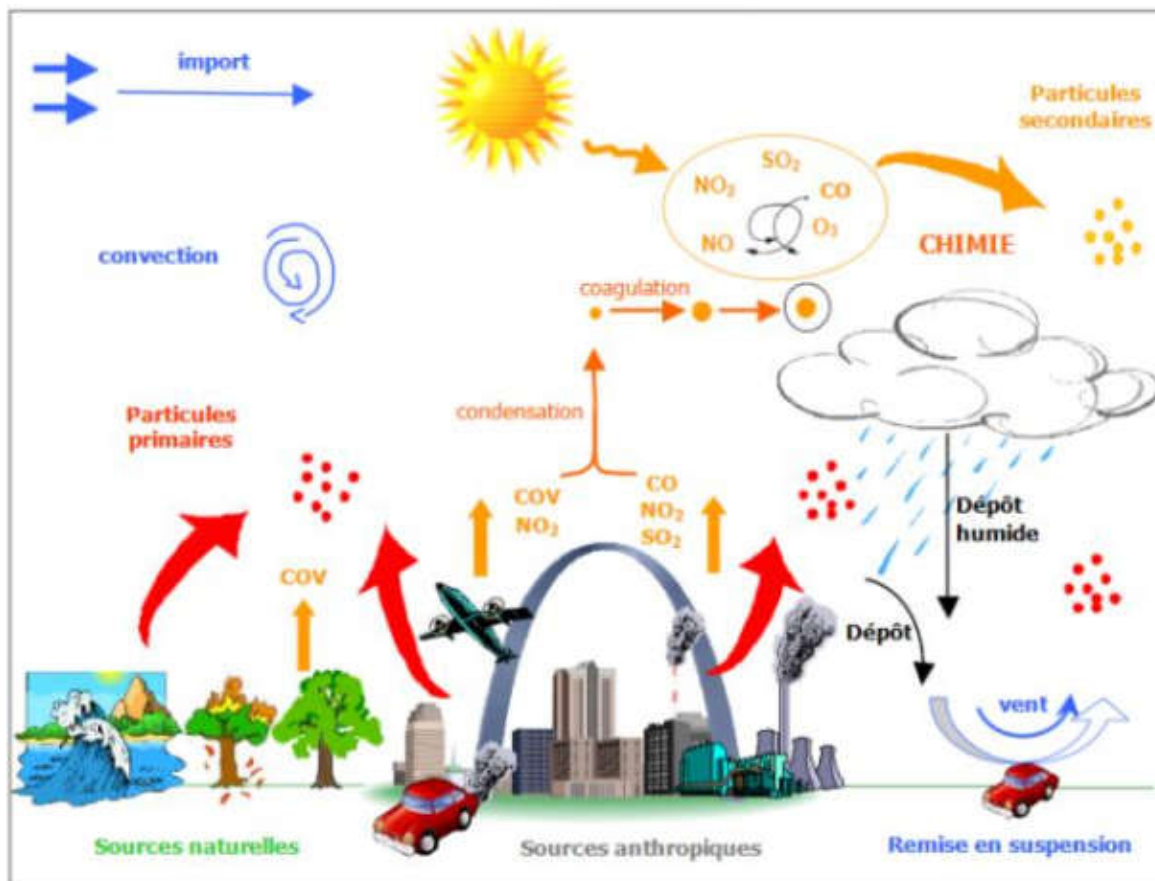


Figure 1. Sources des aérosols naturels et anthropiques (Airparif, 2008)

I.2. Propriétés des aérosols

I.2.1. Propriétés chimiques

Les éléments produits par combustion se trouvent, généralement, sous forme d'oxydes (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Al_2O_3 , etc). Toutefois, leur forme chimique est, généralement, incertaine. Les aérosols marins sont riches en matières organiques (stéroïdes, alcools gras et acides gras), ainsi qu'en sels marins.

La réaction des sels marins modifie leur composition chimique, par exemple, le chlorure de sodium réagit avec la vapeur d'acide sulfurique pour donner du sulfate de sodium et de la vapeur de l'acide chlorydrique, ce qui crée un déficit en chlore dans les aérosols marins.

La production photochimique d'aérosols organiques secondaires contribue significativement à l'augmentation des concentrations des aérosols organiques en été. L'ammoniac est transféré dans la phase particulaire pour neutraliser les composants acides constituant le sulfate d'ammonium et le nitrate d'ammonium (Seinfeld and Pandis, 2006).

I.2.2. Propriétés physiques

Les diamètres des particules d'aérosols varient entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. A partir de leurs diamètres aérodynamiques, les aérosols se classent comme suit :

- a. **Les PM₁₀** : ce sont des particules ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 10 μm , regroupant les particules biologiques (spore, pollen, bactéries...), qui sont retenues au niveau du nez. L'ensemble des particules qui restent en suspension dans l'air (diamètre jusqu'à environ 60 μm) sont appelés particules totales en suspension (TSP).
- b. **Les PM_{2,5}** : regroupent les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 μm . constituées de particules générées par l'activité industrielle et urbaine mais aussi de particules biogéniques. Ces Particules représentent la part la plus importante en nombre d'aérosols, mais aussi une masse peu importante en raison de leur taille extrêmement faible.
- c. **Les PM₁** : sont des particules de diamètre aérodynamique inférieur à 1 μm , issues de la conversion à partir de la phase gazeuse, d'effluents de combustion, de vapeurs organiques ou métalliques recondensées (processus de nucléation, condensation et coagulation), atteignent en plus grand nombre les alvéoles pulmonaires. Les particules Diesel riches en HAP appartiennent également au PM₁.

Le mélange du BC avec les aérosols poussiéreux, lors des événements de poussière, change de manière significative les propriétés physiques et optiques des aérosols (Ramanathan et al., 2001a ; Mc Kendry et al., 2008 ; Fu et al., 2009 ; Zhou et al., 2013 ; Wang et al., 2015).

Bien que le BC ne soit pas hygroscopique, ses particules peuvent être réduites par balayage humide lors des précipitations impliquant une condensation des aérosols inorganiques secondaires sur les particules de BC et les rendre hygroscopiques et entrainer leur lessivage par précipitation en raison de l'humidité (Gadhavi et Jayaraman, 2010). La figure 2 présente les différentes formes d'aérosols atmosphériques.

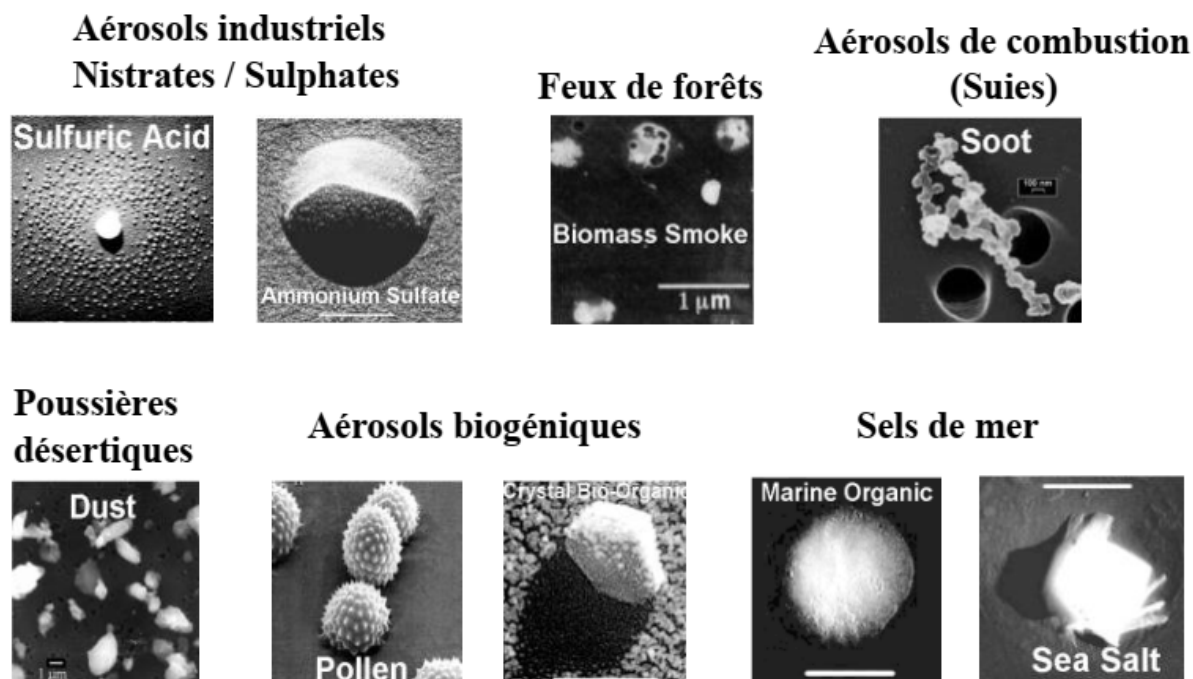


Fig. 2. La forme des aérosols atmosphériques (Heintzenberg et al., 2002)

I.2.3. Propriétés optiques

Les aérosols atmosphériques peuvent avoir soit un effet d'absorption ou de diffusion du rayonnement solaire. Ces deux effets peuvent impacter le bilan radiatif terrestre.

☛ Effet direct

L'effet direct des aérosols peut se présenter sous forme d'absorption du rayonnement solaire (le cas du carbone suie ou BC), ou de sa diffusion (les sulfates). Jose et al., (2016) révèle que l'effet d'absorption du rayonnement solaire par du BC est prépondérant sur le rôle de diffusion.

La fumée de bois contient des matières organiques abondantes telles que les aromatiques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des substances humiques-like (HULIS), qui absorbent la lumière dans la gamme de l'ultraviolet. Par contre, l'absorption au niveau de la bande poche infrarouge est dominée par le BC (Sandradewi et al., 2008).

Une fois que le BC est mélangé avec les nuages de gouttelettes, les propriétés optiques des aérosols changent (Zhuang et al., 2010). Des études antérieures ont montré que l'apport des aérosols de poussière à l'absorption optique est d'environ 30% (Jennings et al., 1996 ; Coen et coll., 2003).

☛ Effet semi-direct

Les aérosols augmentent le rayonnement absorbé dans leur couche de résidence, ce qui induit une modification du profil vertical de température, dont, dépendent la circulation atmosphérique et la formation des nuages (Tombette, 2007).

☛ Effet indirect

Les aérosols peuvent avoir un impact indirect sur le bilan radiatif en participant à la formation de nuages à travers la modification de leur nombre ou de leur composition chimique.

Les aérosols sont des noyaux de condensation de la vapeur d'eau (CCN, Cloud Condensation Nuclei). En effet, les aérosols anthropiques étant plus petits que les aérosols terrigènes, les gouttes qui se forment sur ces aérosols sont donc plus petites, ce qui prolonge la durée de vie des nuages et augmente leur effet sur le bilan radiatif (Tombette, 2007). La figure 3 schématise l'effet des aérosols sur le rayonnement solaire.

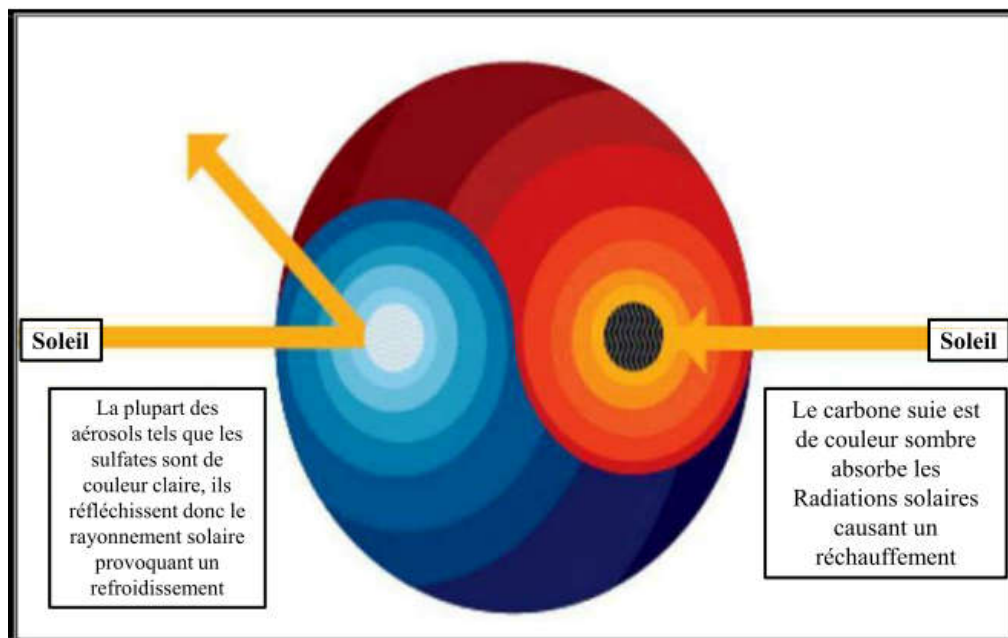


Fig. 3. Effet climatique des aérosols atmosphériques (IGSD, 2009)

I.3. Formation des aérosols

Les aérosols se forment sous trois modes principaux :

I.3.1. Nucléation des gaz

Ce mode est la principale source de formation des aérosols à partir de la nucléation de molécule de gaz formant des amas qui se solidifient ensuite. Ce mécanisme à lieu lorsque la pression de vapeur s'abaisse suffisamment.

I.3.2. Condensation des gaz sur l'aérosol

Ce mode consiste en un dépôt de matière gazeuse sous forme de vapeur sur des particules déjà existantes sous forme d'adsorption.

I.3.3. Coagulation d'aérosol

La coagulation d'aérosols se forme suite à un choc entre deux particules conduisant à la formation d'une particule plu grosse que les deux particules de départ par collisions.

La figure 4 résume les modes de formations cités précédemment.

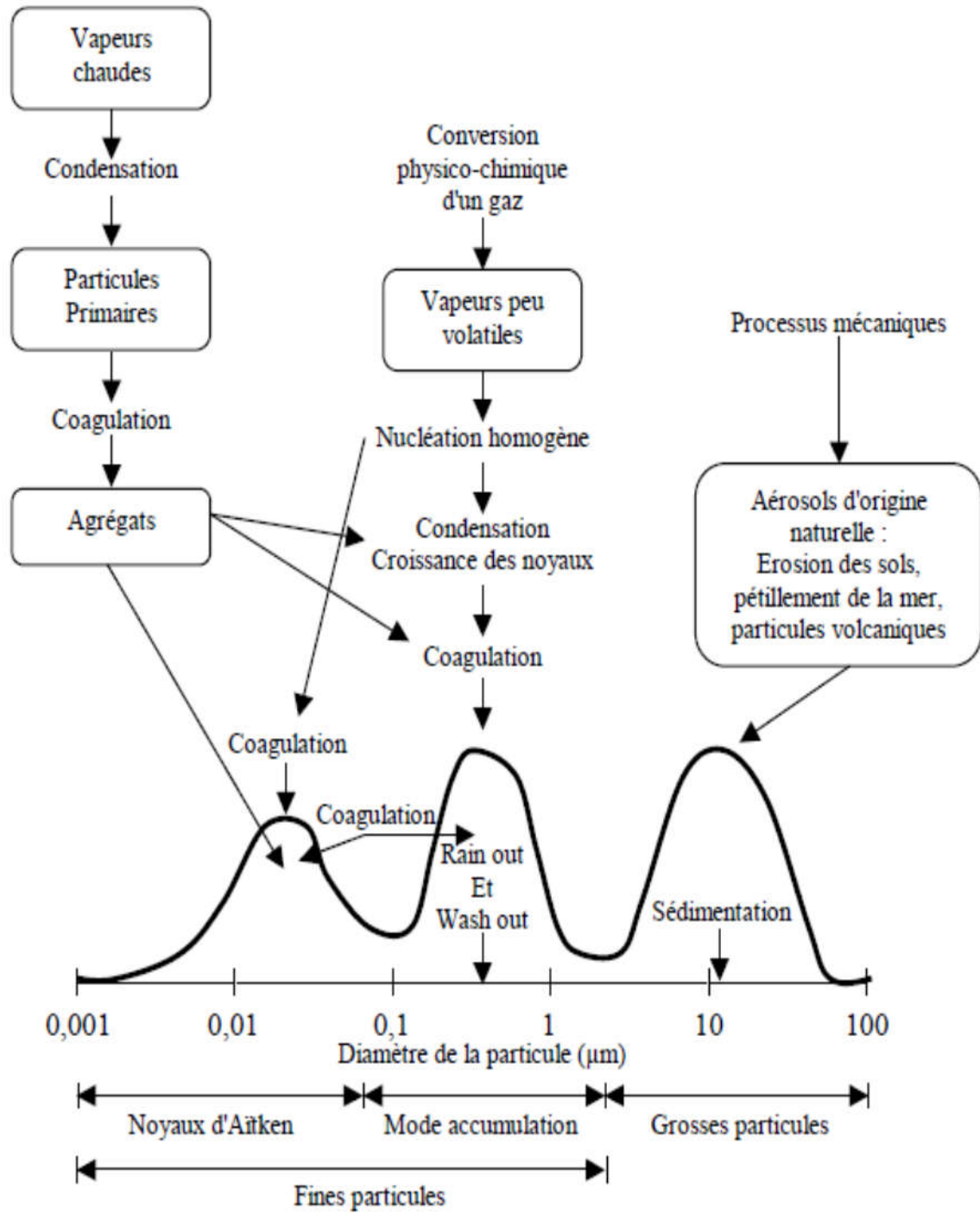


Fig. 4. Distribution granulométrique des aérosols et leurs mécanismes de formation et de déposition (BORGIE, 2014)

I.4. Transport et dépôt des aérosols

La concentration des aérosols atmosphériques varie, considérablement, dans l'espace et le temps, selon les conditions météorologiques, leur émission et les précurseurs (Seinfeld and Pandis, 2006).

Nous distinguons trois zones caractérisant le transport latitudinal dans la troposphère comme présenté à la figure 5 :

Les zones de basses pressions où il y a une ascendance des masses d'air sont caractérisées par la subsidence des masses d'air, contrairement aux zones de hautes pressions. Cet ensemble forme des cellules de transport (voir figure 5).

- La cellule de Hadley entre 0° et $\pm 30^\circ\text{N}$, assure le transport rapide des masses d'air de la basse atmosphère vers la haute atmosphère au niveau de l'équateur. Toutefois, vers 30° de latitude, les masses d'air subissent une subsidence.
- La cellule de Ferrel, caractérisée par une intensité plus faible et en sens inverse de la cellule de Hadley, transporte les masses d'air entre $\pm 30^\circ\text{N}$ et $\pm 60^\circ\text{N}$ de latitude.
- La cellule polaire est responsable du mélange des masses d'air au niveau des pôles.

La jonction entre les cellules de Hadley et Ferrel se fait dans les hautes altitudes, où se présentent des vents zonaux forts ainsi que le courant-jet (jet-stream) subtropical.

Le courant-jet polaire ou de latitude moyenne assure la jonction entre les cellules de Ferrel et polaire.

Différents types de vents sont responsables du transport longitudinal au niveau de la troposphère :

- Les vents moyens sont d'Est au niveau des tropiques, les alizés, et principalement, au niveau de la basse troposphère ;
- Les vents sont d'Ouest, dominés par les courant-jet au niveau de la haute troposphère (au niveau des latitudes moyennes) ;
- Les vents zonaux sont d'Est au niveau des pôles (CRYSZTOFIK, 2013).

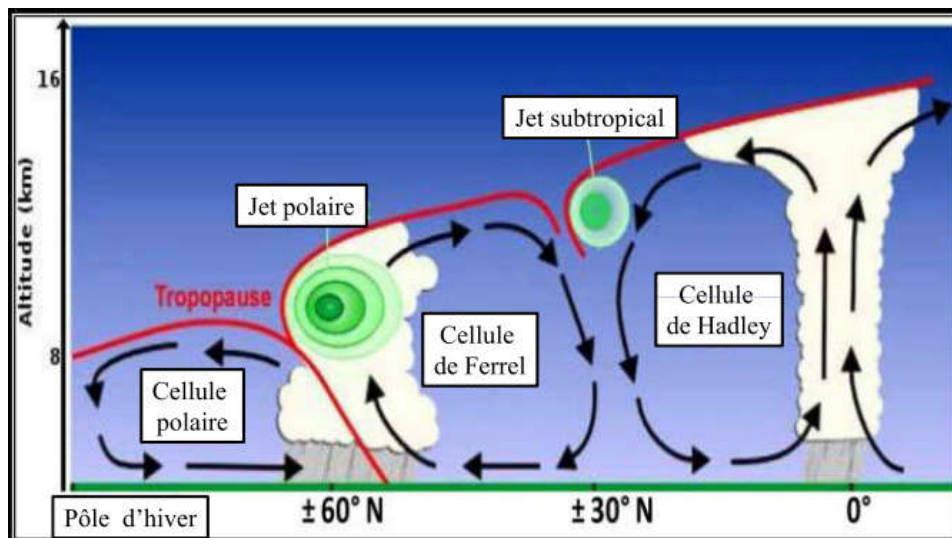


Fig. 5. Circulation globale des vents au niveau de la troposphère
Source : CRYSZTOFIK, 2013

Les vents horizontaux et verticaux permettent un transport sur de longues distances assurant l'alimentation en aérosols de zones éloignées par dépôt humide ou sec (Karine Desboeufs, 2001).

Les métaux associés aux aérosols peuvent atteindre la surface de la mer par le dépôt sec et humide (dans les nuages ou par balayage sous les nuages). Ainsi, les dépôts atmosphériques peuvent jouer un rôle important dans l'apport de nutriments biodisponibles aux eaux de surface et dans la productivité biologique marine (Theodosi et al., 2010).

Il a été révélé que les tempêtes de poussière du Sahara ont pu transférer des matières de la côte Nord-Ouest de l'Afrique, à travers l'Atlantique, vers la côte Est des États-Unis (Ott et al., 1991).

Le transport à longue distance des émissions provenant des incendies forestiers et agricoles du Canada a entraîné le BC jusqu'en Europe (Ulevicius et al., 2010). Le BC peut parcourir des centaines à des milliers de kilomètres dans l'atmosphère, et peut atteindre jusqu'à plusieurs milliers d'années dans les sédiments (Masiello et Druffel., 1998). Récemment, le BC a, également, été utilisé comme un indicateur de l'exposition à la suie de diesel (Fruin et al., 2004).

Par conséquent, le BC affecte la circulation atmosphérique à grande échelle et le cycle hydrologique (Menon et al., 2002).

I.5. Impact des aérosols sur l'environnement

I.5.1. Impact sur la santé

Les aérosols ayant un diamètre inférieur à 2,5 µm (PM_{2.5}) sont, particulièrement, préoccupants en raison de leur importante contribution aux effets néfastes sur la santé (Dockery and Pope, 1994 ; Ostro et al., 2006), en agissant comme des supports pour les substances toxiques et mutagènes (Beddows et al., 2004), et leur aptitude à pénétrer les membranes cellulaires (Li et al., 2003).

En dépit de sa gamme de taille submicronique, le BC est facilement inhalé, ce qui entraîne un risque grave pour la santé (Saha et Despiou, 2009), et provoque des décès prématurés dans le monde entier (PNUE, Programme des Nations Unies, 2011).

En raison de son diamètre submicronique, il est capable de provoquer de nombreuses maladies respiratoires qui affectent le système cardiovasculaire, pénétrer profondément dans les poumons et se déposer sur les alvéoles pulmonaires (Cheng et al., 2014). La figure 6 schématise les principaux impacts sanitaires des particules atmosphériques.

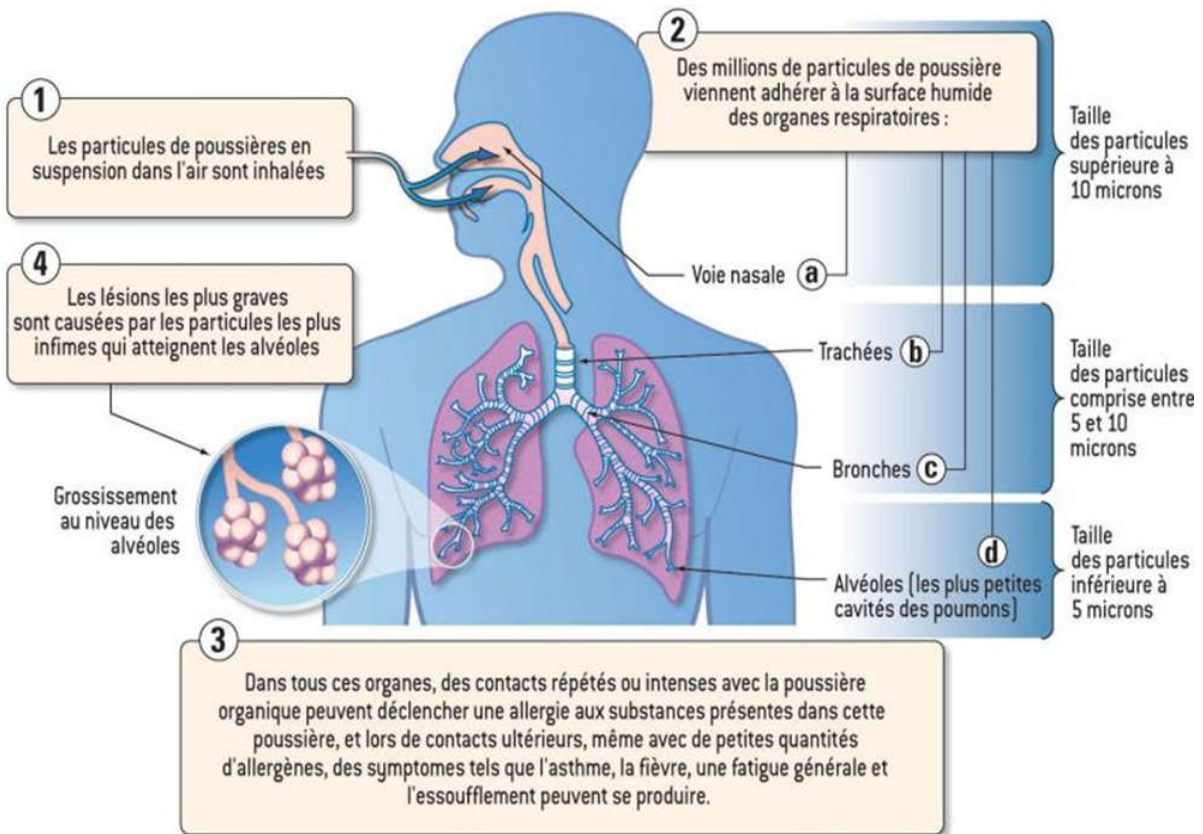


Fig. 6. Effet des particules sur le système respiratoire²

I.5.2. Impact sur le rayonnement

Annuellement, la planète reçoit en moyenne 342 W/m^2 d'énergie solaire (constante solaire représentant le quart du rayonnement solaire reçu de 1370 W/m^2) dont 235 W/m^2 absorbés et 30% réfléchis vers l'espace par les nuages (deux tiers), la surface (un huitième) et la diffusion de Rayleigh (le reste). En effet, 70 des 235 W/m^2 en insolation absorbée sont dues aux éléments traces et aérosols atmosphériques ainsi que les nuages.

Le forçage climatique est un changement du bilan énergétique planétaire dû aux concentrations de CO_2 , aérosols, éruptions volcaniques, changement dans le rayonnement solaire incident et aux propriétés de la surface de réflexion de la planète. Le résultat météorologique de ce forçage, comme le changement de la température, les précipitations ou des niveaux de mer est appelé réponse climatique. Il est mesuré par la variation du flux radiatif net (l'irradiation vers le bas moins celle vers le haut) (Seinfeld and Pandis, 2006).

Les aérosols atmosphériques ont une durée de vie qui va d'un jour à deux semaines dans la troposphère, et environ une année dans la stratosphère. Ils varient, considérablement, en taille, la composition chimique et la forme. Ils affectent le climat de plusieurs façons. D'abord, ils diffusent et absorbent la lumière du soleil, ce qui modifie l'équilibre radiatif de la Terre. La diffusion des aérosols rend, généralement, la planète plus réfléchie, et tend à refroidir le climat, alors que l'absorption d'aérosols a l'effet inverse, et a tendance à réchauffer le système climatique (IPCC, 2013).

² (https://omer7a.obsmp.fr/content/download/10513/73122/file/Effets_polluants_sante_humaine.pdf)

Le forçage radiatif direct influe directement sur le bilan radiatif de la Terre ; par exemple, l'ajout de CO₂ absorbe le rayonnement infrarouge, ce qui perturbe la balance radiative. Le forçage indirect conduit à un déséquilibre radiatif selon la première modification de certains composants du système climatique qui conduit, alors, à un changement de flux radiatifs.

Un exemple d'effet indirect est l'augmentation des niveaux d'aérosols qui produisent des nuages avec des gouttes plus petites ; sachant que ces derniers ne sont pas aussi susceptibles de produire des précipitations, de sorte que les nuages persistent plus longtemps, reflètent et absorbent plus de rayonnements (Seinfeld and Pandis, 2006).

Bond et al., (2013), ont estimé en 2005 le forçage radiatif anthropique direct et global du BC à $\sim 0,71\text{W/m}^2$.

Le forçage radiatif, dû aux aérosols et gaz dans l'atmosphère depuis 1750, estimé en 2011, est décrit par la figure 7.

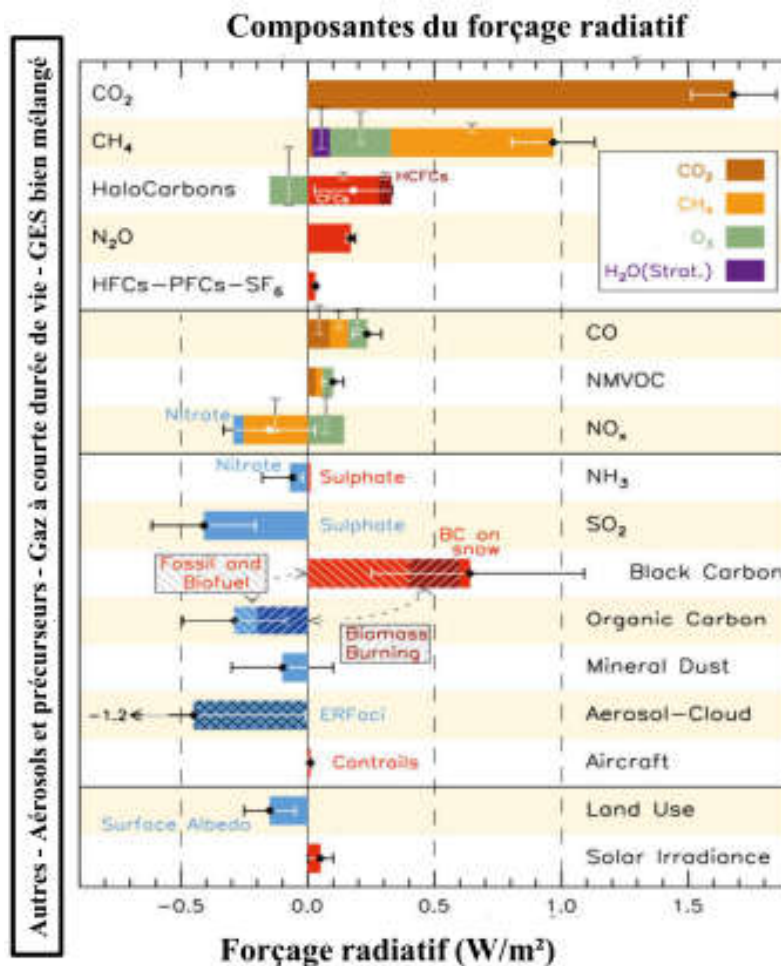


Fig. 7. Forçage radiatif des aérosols atmosphériques (GIEC, 2021)

1.5.3. Impact sur la couche d'ozone

Dans la stratosphère, les aérosols volcaniques participent de manière indirecte au processus de destruction catalytique de l'ozone en induisant des réactions catalytiques hétérogènes par les composés chlorés, et ceci, par l'intermédiaire des réactions chimiques dues aux NO_x (Seinfeld and Pandis, 2006).

I.5.4. Impact sur les cycles biogéochimiques

Les cycles biogéochimiques consistent en l'échange de molécules contenant un atome donné (oxygène, azote, soufre, carbone ou phosphore) entre les différents réservoirs du système terrestre avec l'atmosphère, les océans, les sédiments et les organismes vivants (Seinfeld and Pandis, 2006). Les aérosols jouent un rôle important dans les cycles biogéochimiques (Mahowald et al., 2005). Les aérosols marins primaires issus de l'éclatement de bulles d'air à la surface des océans et des embruns marins, principalement, composés de sels marins inorganiques contenant du chlore, sodium, sulfates, magnésium, calcium et potassium ont un impact significatif sur les cycles biogéochimiques (Christine Piot, 2006). L'atmosphère est le siège de processus de transferts susceptibles de jouer un rôle essentiel vis-à-vis de certains écosystèmes à travers les cycles biogéochimiques. Le dépôt humide de métaux atmosphériques dissous par la pluie constitue la principale voie d'entrée de ces nutriments pour le phytoplancton marin en zones éloignées des sources (Karine Desboeufs, 2001).

I.5.5. Impact sur les secteurs de transport

La pollution atmosphérique réduit la visibilité par absorption et par diffraction de la lumière, ce qui peut provoquer des accidents routiers et aériens. Des concentrations élevées en sulfates durant l'été dans le nord des États-Unis conduisent à des concentrations élevées d'aérosols fins et une faible visibilité (Seinfeld and Pandis, 2006). Les brumes, les vents de sables ainsi que les émissions industrielles forment une couche de polluants dans la troposphère appelée « smog », qui peut provoquer également des accidents aériens et routiers. Le volcan enregistré en avril 2010 en Islande a induit un nuage volcanique de polluants atmosphériques qui a atteint l'Afrique et a provoqué l'arrêt des vols dans tous les pays Européens.

I.6. Carbone suie (black carbon BC)

Dans ce chapitre, nous allons nous focaliser sur un polluant très nocif à l'environnement, qui sera étudié en détail dans cette étude pour la première fois en Algérie. Ce polluant est le carbone suie ou le black carbon BC.

Le terme « black carbon » est, généralement, employé pour définir les produits de combustion carbonés, rencontrés dans les aérosols, sédiments et sols (Schmidt et al., 2003). Le noir de carbone (Black Carbon), également appelé suie ou carbone élémentaire, est une forme amorphe et élémentaire du carbone (Mengx et al., 2018). Le BC est émis par la combustion incomplète des produits carbonés.

I.6.1. Sources d'émission

Environ 53 à 57% du BC proviennent de la combustion de combustibles fossiles, tandis que le reste est émis par la combustion de biomasse (Yuxiang et al., 2019). Le BC est émis par les biocarburants, les activités de cuisson et de chauffage résidentiel à petite échelle et dans les grands incendies de forêt, les résidus de récolte ainsi que les carburants fossils (gaz, fuel, essence, diesel, kérozène et charbon).

I.6.2. Caractéristiques du BC

Les particules de carbone suie ont des structures très compactes de diamètre allant jusqu'à 2,5 μm . Elles sont composées de fumée noire, et sont peu réactives chimiquement : elles ne réagissent pas dans leur évolution atmosphérique ultérieure (le BC est, donc, uniquement primaire). Le BC présente une température de fusion élevée, supérieure à 800°C (thermiquement réfractaire), et, en plus de sa structure graphitique, il se comporte comme un corps noir absorbant la lumière (Guillaume, 2006).

Le BC peut se présenter sous deux formes différentes : BC_{ff} (fossil fuel) émis par les hydrocarbures de nature fossile, ou, BC_{wb} (wood burning) émanant de la combustion incomplète de la biomasse.

La durée de vie du « black carbon » dans l'atmosphère est d'environ une semaine dans la basse troposphère et il peut être transporté sur de grandes distances, en fonction de la température ambiante, des conditions météorologiques, telles que la vitesse du vent, la hauteur de la couche limite planétaire, la température, le rayonnement solaire et l'humidité, et peut subir un lessivage par les pluies (Singh et al., 2018). Malgré sa courte durée de vie, il est considéré par le GIEC comme la deuxième cause du réchauffement climatique après le CO_2 (Jacobson, 2002). Le BC insoluble (BC_{ins}) est appelé BC jeune, toutefois, le BC soluble (BC_{sol}) est dénomé BC âgé. Daskalakis et coll. (2015), prend en compte la chimie multiphase ainsi que tous les principaux types d'aérosols, y compris les aérosols carbonés, tous deux insolubles (BC_{ins}) et le noir de carbone soluble (sol BC). Cette caractérisation est importante pour suivre les concentrations atmosphériques de BC insoluble frais (BC_{ins}) et de BC soluble vieilli (BC_{sol}), qui peut être transporté vers le sol et les eaux souterraines par balayage humide ou lessivage.

L'effet du carbone suie (BC) à l'échelle locale, régionale ou globale dépend de ses émissions et son âge dans l'atmosphère. Par exemple, l'enrobage par les composés inorganiques (comme l'acide sulfurique) et organiques modifie considérablement la morphologie, l'hygroscopie et les propriétés optiques des particules de suie (Zhang et al., 2008; Khalizov et al., 2009; Xue et al., 2009).

L'évolution diurne de la couche limite atmosphérique (CLA) est très déterminante pour les niveaux de variation du BC (Nair et al., 2007). Begam et al., (2016) ont révélé qu'en raison de la dilution des aérosols de BC par le vent, les niveaux de BC diminuent de façon exponentielle avec l'augmentation de la vitesse du vent. En raison du chauffage de surface au cours de la journée, les aérosols atmosphériques près de la surface se diluent et impliquent la diminution de la concentration du BC en poussant la CLA (Jose., 2016).

En hiver, la diminution de la hauteur de la couche limite associée à une faible vitesse de vent favorise l'augmentation des concentrations en BC. Toutefois, une diminution remarquable des niveaux de BC est due au phénomène de lessivage par les pluies et de dispersion par les vents (Begam et al., 2016). Pendant l'été, les activités humaines ainsi que le transport à grande distance des fumées de combustion des déchets agricoles et feux de forêts induisent des teneurs plus élevées en BC (Tiwari et al., 2013).

I.6.3. Impact du BC sur la santé

Le carbone noir a causé 4,2 millions de décès au niveau mondial (intervalle d'incertitude de 95%, 3,7–4,8 millions) comme l'a souligné l'OMS. Des études épidémiologiques récentes indiquent que les associations entre les effets néfastes sur la santé et l'exposition sont plus importantes pour le BC que pour les autres particules (Segersson et al., 2017).

Le BC est classé comme cancérigène probable pour l'homme qui peut pénétrer profondément et s'acheminer jusqu'aux alvéoles pulmonaires et cause des maladies respiratoires (Korgo, 2014).

I.6.4. Impact sur le climat

Le premier effet indirect des aérosols constitue l'une des grandes incertitudes dans les prévisions climatiques (IPCC, 2007). L'incertitude est plus large pour le BC, contrairement à l'ozone ou le dioxyde de carbone.

Le BC varie en taille et en morphologie dans l'atmosphère, et il est, généralement, mélangé à plusieurs autres composés chimiques, et séjourne dans l'atmosphère suivant des processus relativement inconnus (Leaitch et al., 2010; Russell et al., 2013). Le BC est, largement, reconnu comme étant un agent à effet de serre, en raison de sa contribution directe au réchauffement global de l'atmosphère (Bond et al., 2013).

Les contenants du BC participent à la concentration du Nombre de Particules d'Aérosols, et ceux comportant des particules incluant des composés solubles comme les sulfates ou les nitrates, peuvent augmenter la Concentration de Noyau de Condensation (CCN) (Roberts et al., 2003; Chen et al., 2010; Jacobson, 2010; Bahadur et al., 2012).

Des études récentes ont révélé que le BC pourrait modifier la durée de vie des nuages, le régime des précipitations, la réflectivité, et la fonte de la neige et de la glace (Saha et Despiou., 2009). Le BC a causé aussi des effets graves sur le climat de l'échelle régionale à l'échelle mondiale (Ramanathan et Carmichael., 2008 ; Zhang et al., 2013).

Un autre impact sur le réchauffement planétaire du BC est la réduction de l'albédo. Une fois déposé sur la neige et la glace, il exacerbe la fonte dans l'Arctique, l'Himalaya et d'autres régions englacées et enneigées (Qian et al., 2011).

La plupart des aérosols comme le sulfate réfléchissent le rayonnement solaire, ce qui induit un refroidissement (figure 3) ; par contre, le BC absorbe le rayonnement, ce qui provoque un réchauffement.

I.7. Modélisation des aérosols atmosphériques

Les mesures ambiantes nous donnent des données instantanées dans un emplacement particulier, ce qui rend difficile leur interprétation sans un modèle conceptuel clair, prenant en compte tous les processus atmosphériques.

Un modèle, impliquant des descriptions de modèles d'émission, de météorologie, des transformations chimiques et processus d'élimination, constitue un outil indispensable d'établissement de relations appropriées.

Les trois composantes principales d'un modèle sont les émissions d'espèces, le transport et les transformations physico-chimiques, telles que portées sur la figure 8.

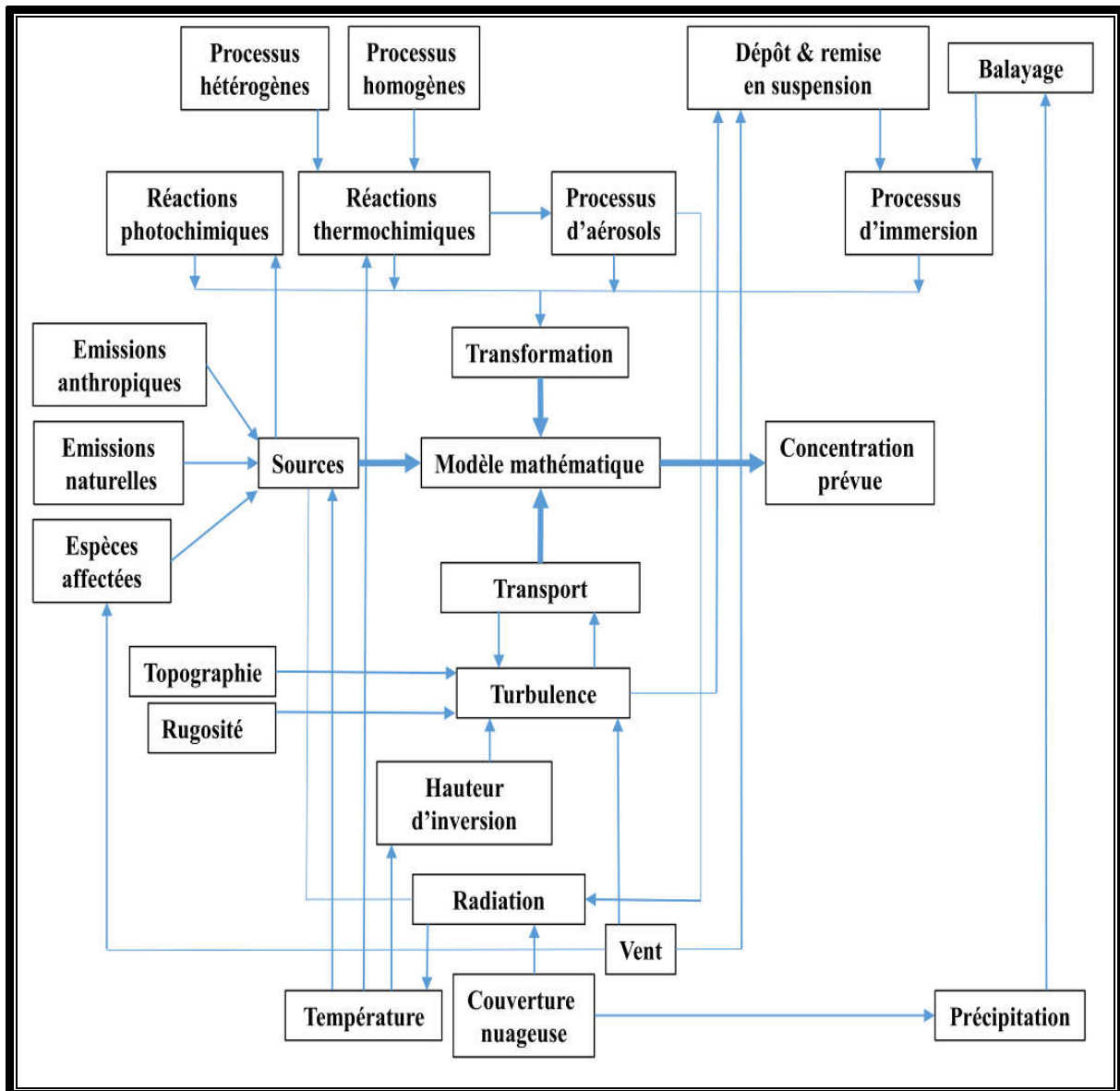


Fig. 8. Eléments d'un modèle mathématique de transport chimique atmosphérique
 Source : (Seinfeld and Pandis, 2006).

I.7.1. Modèle Hysplit (NOAA)

Le modèle hybride de trajectoire Lagrangienne, intégrée à une seule particule (HYSPLIT), mis au point par le laboratoire Air Resources de l'Agence Américaine des Océans et de l'Atmosphère (NOAA), est l'un des modèles les plus, largement, utilisés pour les calculs de Trajectoires atmosphériques et de dispersion. Le modèle (HYSPLIT) du Laboratoire de ressources aériennes (ARL de la NOAA) est un système complet de calcul des trajectoires de parcelles aériennes simples ainsi que du transport complexe, dispersion, transformations chimiques et simulations de dépôt.

L'une des applications les plus courantes du modèle est l'analyse des rétro-trajectoires pour déterminer l'origine des masses d'air et établir des relations source-récepteur.

HYSPLIT a été développé pour la première fois par Draxler et Hess au laboratoire de recherche sur l'air la NOAA des États-Unis pour calculer la trajectoire des masses d'air et la dispersion et le dépôt de polluants.

Les principales fonctionnalités de ce code sont les suivantes :

- Le calcul de la trajectoire des masses d'air dans les deux sens ;
- La prédiction du schéma de dispersion des particules dans l'atmosphère.

Le modèle HYSPLIT peut générer environ 40 trajectoires, en avant ou en arrière aux différentes altitudes de 500, 1 000, 1 500, 2 000 et 2 500 m. Le modèle HYSPLIT calcule les trajectoires de masses d'air ainsi que les paramètres météorologiques (précipitations, humidité relative, température ambiante, rayonnement solaire).

Les rétro-trajectoires, en arrière, sont réalisées à l'aide du Bureau d'assimilation des modèles globaux (GMO) de la NASA, qui assimile les données d'analyses maillées aux enquêtes des centres nationaux de prévision environnementale (NCEP) (Kaskaoutisa et al., 2018).

I.7.2. MODELE MODIS (NASA)

L'instrument MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) est un capteur à large champ embarqué sur la mission d'observation TERRA en 1999. Il observe la totalité de la surface terrestre tous les un à deux jours depuis des orbites quasi-polaires héliosynchrones (10 h 30 à l'équateur). À l'aide de satellites, les scientifiques peuvent déterminer si un panache d'aérosols provient d'une source naturelle ou s'il s'agit d'une pollution produite par des activités humaines. La taille des particules et l'emplacement du panache sont deux indices importants concernant les sources des aérosols.

Ces cartes en fausse couleur indiquent les zones où se trouvent des aérosols naturels, une pollution humaine ou un mélange des deux. Les cartes sont basées sur les données du spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (MODIS) du satellite Terra de la NASA. Les zones vertes présentent des panaches d'aérosols dominés par des particules plus grosses. Les zones rouges montrent des panaches d'aérosols dominés par de petites particules. Les zones jaunes montrent des panaches dans lesquels se mêlent de grosses particules d'aérosol. Le gris indique là où le capteur n'a pas collecté de données. Le modèle permet, également, d'élaborer des cartes du type de ciel, de la terre, de l'énergie, etc³.

³ (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>).

I.7.3. Modèle TM4-ECPL (Université de Crète)

Le modèle TM4-ECPL est un modèle global, développé par l'Université de Crète (Grèce) sous la supervision du Pr Maria KANAKIDOU et a été décrit en détail par Daskalakis et al., 2015. Ce modèle permet d'élaborer des cartes de tous types d'aérosols, y compris les aérosols carbonés dont le black carbon insoluble ou frais (BC_{ins}) et le black carbon soluble ou âgé (BC_{sol}). Le modèle permet également d'avoir des cartes régionales en effectuant un zoom, ce qui rend possible la comparaison des niveaux de pollution entre pays limitrophes.

Chapitre II.

Méthodologie expérimentale

II.METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

Par suite des problèmes induits par la pollution de l'air par les aérosols, la connaissance des propriétés chimiques des particules, l'identification et la quantification des sources d'émission à l'échelle locale et régionale présentent un défi pour la science des aérosols.

II.1. Techniques analytiques

Nous avons utilisé l'analyseur Aéthalomètre AE33, (modèle AE-33, Magee Scientific, États-Unis) pour la mesure du black carbon, et l'analyseur FIDAS 200 (PALAS, Allemagne) pour celle des particules (PM1, PM2,5, PM4, PM10, PMtot et nombre de particules par centimètre cube). Ces analyseurs font partie de la station atmosphérique NESMA du CDER. Cette station (figure 9) a été installée d'abord à Bouzaréah, puis déplacée à l'hôpital Mustapha Bacha.

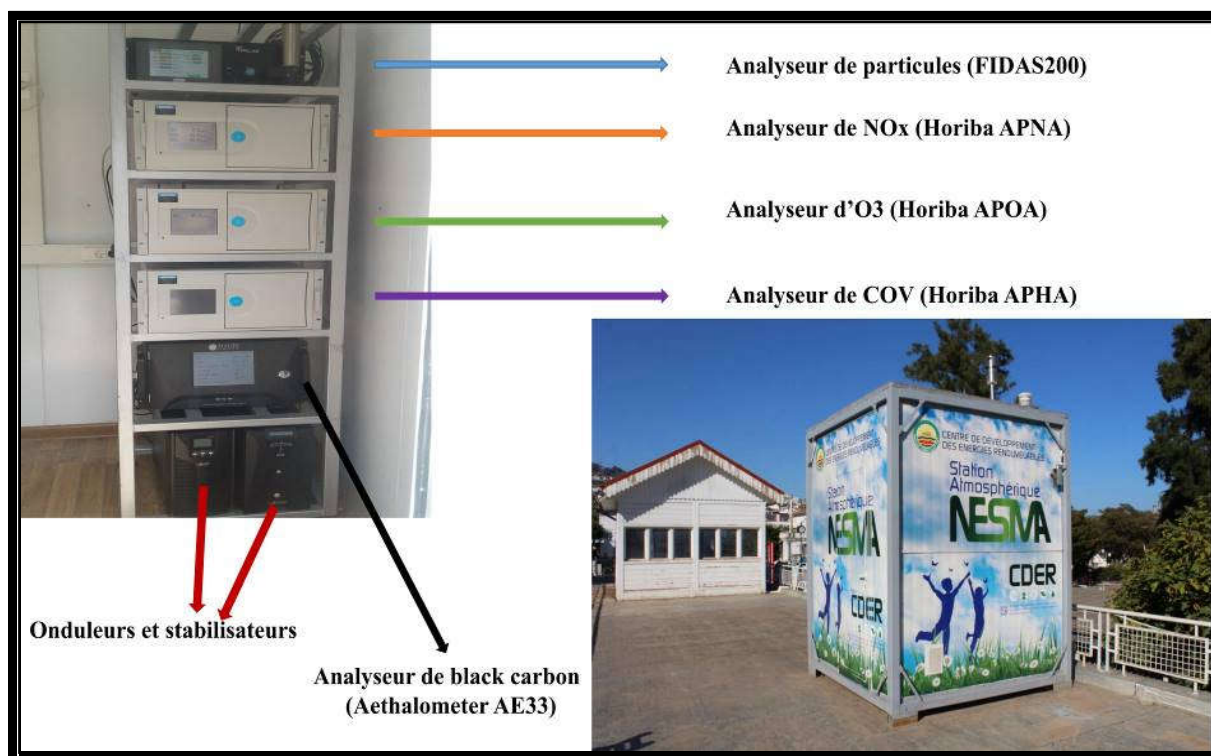


Fig. 9. Station NESMA du CDER, installée au CHU Mustapha Bacha

II.1.1. Mesure du Black Carbon (Aéthalomètre AE33)

Le principe de fonctionnement de l'aéthalomètre est basé sur la mesure de l'atténuation des rayons lumineux absorbés par le BC dans le domaine du visible. L'air atmosphérique est pompé à travers une entrée de 2,5 μm de rayon (tête PM2,5), au débit voulu de 5,0 L/min, puis, l'absorption est mesurée en utilisant une lampe LED à 7 longueurs d'onde (370, 470, 520, 590, 660, 880 and 950 nm). La calibration du zéro est effectuée d'une façon automatique avec une précision de 0.001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. D'après le producteur de l'appareil, sa sensibilité est estimée à 0.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par minute et de 0.005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur une moyenne de mesure d'une heure (manuel utilisateur aéthalomètre, Modèle AE33, 2013).

Le nouveau modèle aéthalomètre AE33 utilise la méthode double point, brevetée pour compenser « l'effet de chargement de points » et fournit en temps réel le paramètre de compensation de charge « K », qui peut fournir des informations supplémentaires sur les propriétés physiques et chimiques des aérosols (manuel utilisateur aéthalomètre, Modèle AE33, 2013). Le BC, affiché sur l'appareil, est calculé selon l'équation (1) ci-après :

$$BC_{(reported)} = BC_{(zero.loading)} * (1 - K * ATN) \quad (1)$$

où, BC (zero loading) est la valeur de BC ambiante désirée, qui serait obtenue en l'absence de tout effet de chargement, et K est le « paramètre de compensation de chargement » similaire à celui de Virkkula (2007).

L'absorption de la lumière par les aérosols est, généralement, proportionnelle à $\lambda^{-\alpha}$, où λ est la longueur d'onde, et α , l'exposant d'absorption d'Ångstrom (Favez et al., 2009).

En appliquant la loi de Beer-Lambert's, nous obtenons l'équation (2) reliant le coefficient d'absorption (b_{abs}), les longueurs d'ondes, et l'exposant d'absorption d'Ångstrom (Sandradewi et al., 2008).

$$b_{abs,370nm} / b_{abs,950nm} = (370/950)^{-\alpha} \quad (2)$$

La dépendance spectrale d'absorption de la lumière du BC s'est avérée être, relativement, faible ($\alpha \sim 1$). Toutefois, en présence d'autres composants de l'aérosol, à savoir : l'hématite et le carbone brun, l'exposant d'absorption est beaucoup plus élevé (Favez et al., 2009).

Les résultats de Sandradewi et al., (2008), révèlent que les exposants d'absorption de la lumière sont de 1,1 pour les émissions du trafic et 1,8-1,9 pour les émissions de la combustion du bois, calculés à partir de l'absorption de la lumière à 470 et 950 nm.

Le paramètre de compensation K pourrait être utilisé pour la discrimination entre les aérosols agés et les aerosols de source locale (frais) et régionaux (Drinovec et al., 2013).

Dans le but d'étudier les caractéristiques du BC, nous avons utilisé les équations 3 et 4, prises du modèle développé par SCIARE et al., (2011).

$$b_{abs,470nm} = BC_{470nm} * 14.54 / 1000 \quad (3)$$

$$b_{abs,950nm} = BC_{950nm} * 7.19 / 1000 \quad (4)$$

où : 14,54 et 7,19 sont les efficacités d'absorption de masse (MAE) dans les deux longueurs d'onde, respectivement 470 nm et 950 nm, données par le producteur. Nous avons utilisé les résultats obtenus à la longueur d'onde 470 nm pour éviter l'absorption par les poussières à 370 nm.

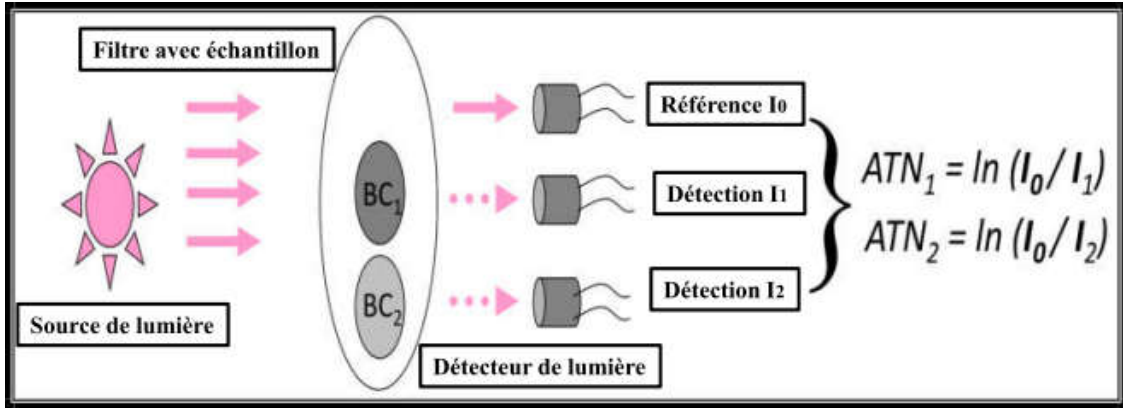


Fig. 10. Principe de fonctionnement de l'aéthalomètre AE33 (Drinovec et al., 2013)

$$b_{abs,\lambda} = b_{absff,\lambda} + b_{abswb,\lambda} \quad (5)$$

$$(b_{abs,ff,470nm} / b_{abs,ff,950nm}) = (470 / 950)^{-\alpha_{ff}} \quad (6)$$

$$(b_{abs,wb,470nm} / b_{abs,wb,950nm}) = (470 / 950)^{-\alpha_{wb}} \quad (7)$$

$$BC_{ff} = BC * b_{abs,ff,950nm} / b_{abs,950nm} \quad (8)$$

Sachant que $b_{abs,\lambda}$ est le coefficient d'absorption de la lumière à une longueur d'onde λ , $b_{abs,ff,\lambda}$ est le coefficient d'absorption de la lumière pour le BC, issu des combustibles fossiles (BC_{ff}) et $b_{abs,wb,\lambda}$ est le coefficient d'absorption de la lumière par le BC issu de la combustion du bois (BC_{wb}), α_{ff} et α_{wb} sont les exposants Angström pour le BC_{ff} et BC_{wb} , respectivement.

α_{ff} et α_{wb} , calculés par SCIARE et al., 2011, étaient, respectivement de 1 et 2. La combinaison des équations (1-5) et l'utilisation du logiciel développé par SCIARE et al., (2011), nous ont permis de calculer les valeurs de BC_{ff} et BC_{wb} . La figure 11 présente l'aéthalomètre AE33 utilisé pour la mesure du BC dans le présent travail.



Fig. 11. Aéthalomètre AE33 utilisé pour la mesure du black carbon à Alger

II.1.2. Mesure d'autres aérosols (ACSM)

L'analyseur d'aérosols ACSM (Aerosol Chemical Speciation Monitor), (figure 12), est automatique et de grande précision. Il permet de mesurer les concentrations instantanées des aérosols types suivants : composés organiques particulaires (MO), sulfates (SO_4^-), nitrates (NO_3^-), ammonium quaternaire (NH_4^+) et chlorures (Cl^-), avec une limite de détection $< 0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cet analyseur mesure la charge en masse des particules et la composition chimique en temps réel des particules d'aérosols submicrométriques non réfractaires, avec la possibilité de configuration pour la mesure des PM1 ou PM2,5.

Le principe de mesure est basé sur une chambre à vide qui couple la lentille aérodynamique des particules avec la source de vaporisation thermique des particules et la spectrométrie de masse.

La lentille aérodynamique crée un faisceau d'environ 1 mm de diamètre de particules, qui est dirigé vers la source de vaporisation des particules chauffées par résistance fonctionnant, généralement, à 600 °C.

Le vaporisateur est monté à l'intérieur de la source d'ionisation à impact électronique, qui ionise toute matière particulaire vaporisée. Les ions formés sont, ensuite, analysés par spectrométrie de masse quadripolaire qui fournit l'information sur la composition chimique des aérosols. L'ACSM permet la récupération des données à distance avec Team Viewer (Manuel ACSM, 2017). Nous avons utilisé cet appareil à l'université de Crête.



Fig. 12. Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM) utilisé à Crête pour la mesure de cinq aérosols

II.1.3. Mesure des particules PMi (FIDAS 200)

L'analyseur utilisé, le FIDAS, est un spectromètre optique de très haute résolution permettant de classer les aérosols atmosphériques en plusieurs classes de tailles. Le FIDAS mesure en temps réel les fractions conventionnelles PM10, PM4, PM2,5 et PM1. De plus, il mémorise à chaque seconde le nombre de particules dans chacun des 256 canaux de mesure.

Pour une utilisation sur les stations de mesure de polluants atmosphériques, le FIDAS dispose de toutes les fonctionnalités nécessaires pour opérer automatiquement et transmettre les données à distance.

Le granulomètre optique FIDAS 200 est basé sur la détection de la lumière diffusée par les aérosols pour déterminer leur taille et leur nombre par classe de taille.

L'échantillon d'air ambiant est aspiré au niveau d'une tête de prélèvement ne présentant pas de diamètre de coupure (Total Suspended Particles TSP). Par sa géométrie, la tête de prélèvement de type Sigma-2 permet de s'affranchir de la problématique de vent qui fausse, généralement, l'efficacité d'échantillonnage en fonction de la taille des aérosols.

L'échantillon passe, ensuite, dans une ligne de prélèvement chauffée IADS, qui permet de conditionner l'aérosol pour s'affranchir des problèmes liés à l'humidité. La température de consigne de cette ligne de prélèvement est ajustée en continu, en fonction des conditions de température et d'humidités ambiantes. Ces paramètres sont obtenus grâce à la sonde météorologique fournie avec l'analyseur FIDAS 200.

Après conditionnement, le flux d'air pénètre dans la cellule de mesure où les aérosols de l'échantillon vont diffuser la lumière incidente. Sous la cellule de mesure se trouve un porte-filtre acceptant des médias ronds de diamètre 47 ou 50 mm. Ce porte-filtre permet une éventuelle analyse gravimétrique ou chimique de l'aérosol collecté, à posteriori (figure 13).



Fig. 13. Analyseur de particules dans l'air (FIDAS 200)

Le flux d'air passe, ensuite, par une cartouche filtrante protégeant la pompe de prélèvement. La tension d'alimentation de la pompe est réglée par rapport à une mesure du débit de prélèvement par un débitmètre massique, pour ajuster un débit de 4,80 L/min aux conditions standards de 1013 mbar et 25°C. La concentration massique, calculée par l'analyseur est ramenée aux conditions volumiques selon la température et la pression ambiantes fournies par la sonde météorologique.

Pour la détection des aérosols, le Constructeur PALAS a intégré dans le FIDAS 200 une cellule de mesure présentant des spécificités techniques permettant à l'analyseur de s'affranchir et corriger des problèmes classiques rencontrés avec les compteurs optiques traditionnels.

Le FIDAS 200 intègre une cellule de mesure dans laquelle le volume optique est éclairé de manière homogène avec une lumière polychromatique. La détection de la lumière diffusée se fait entre 85 et 95° (indiqué à 90°, par simplification) par un photomultiplicateur.

La combinaison d'une LED polychromatique avec une détection à 90° permet d'obtenir une réponse univoque de la taille des aérosols en fonction de l'intensité de la lumière diffusée (figure 14). Ainsi la résolution de la distribution en taille peut être extrêmement fine.

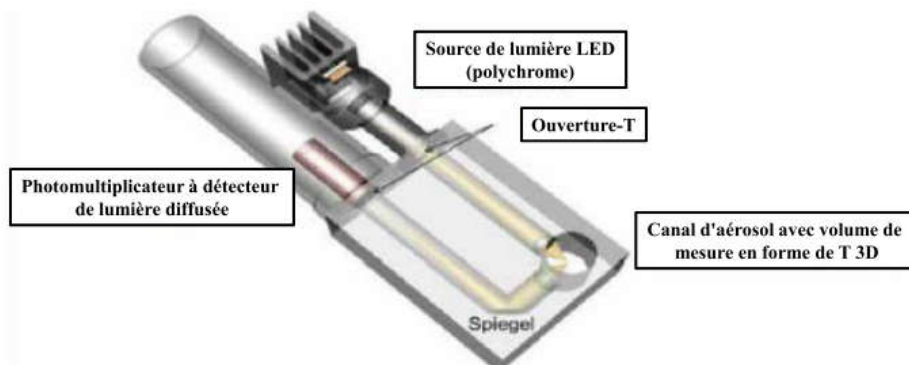


Figure 14. Schéma de la cellule de mesure du FIDAS 200

La taille du volume optique de l'analyseur FIDAS 200 permet de compter les aérosols un par un lors de leur passage dans le volume optique, avec une excellente efficacité de comptage. De plus, le volume optique de cette cellule de mesure présente la forme d'un « T ».

Cette géométrie optique permet de détecter et d'éliminer les effets de bord, par la mesure de la durée des signaux lumineux en continu et en temps réel par le FIDAS 200. Les effets de bord sont liés à un sous éclairage des aérosols, qui par conséquent diffusent moins de lumière. La taille des aérosols est alors sous-estimée.

La mesure en continu et en temps réel de la durée des signaux lumineux permet aussi de détecter et de corriger les erreurs de coïncidence. Cette erreur de coïncidence apparaît lorsque les concentrations sont trop importantes et que plusieurs aérosols pénètrent simultanément dans le volume optique.

L'erreur de coïncidence induit une sous-estimation du nombre d'aérosols détectés et la surestimation de leur taille. Dans ce cas, chaque aérosol va diffuser de la lumière, la durée du signal va être rallongée et l'intensité détectée trop forte. Une calibration de la détection des aérosols est effectuée par l'analyseur pour la lumière polychromatique en utilisant une courbe de lumière monochromatique (figure 15).

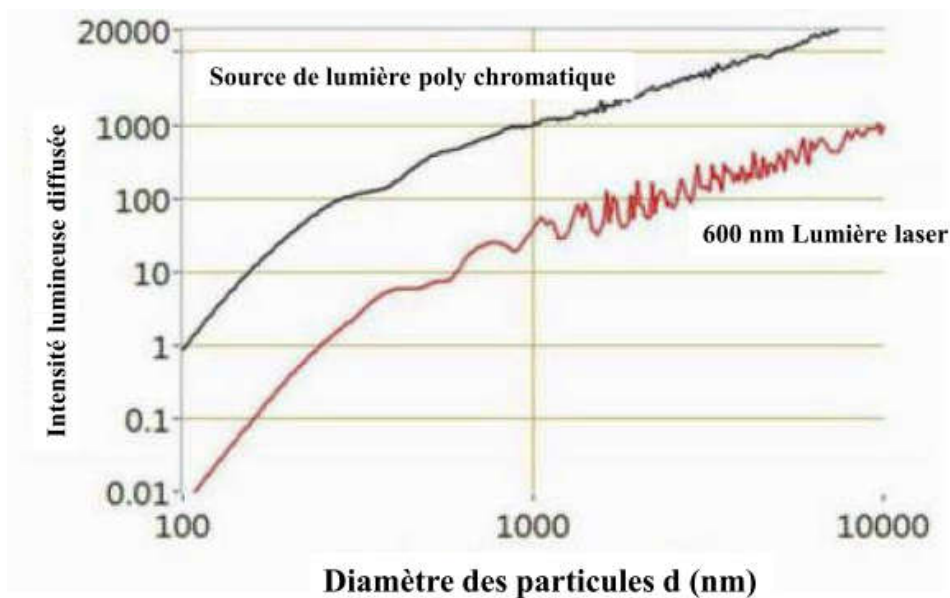


Figure 15. Courbe de calibration de la détection à 90° d'une source de lumière monochromatique (courbe rouge) et d'une lumière polychromatique (courbe noire FIDAS 200)

Le schéma suivant présent en détail les différentes étapes de mesure et de comptage des aérosols par le FIDAS200 (figure 16).

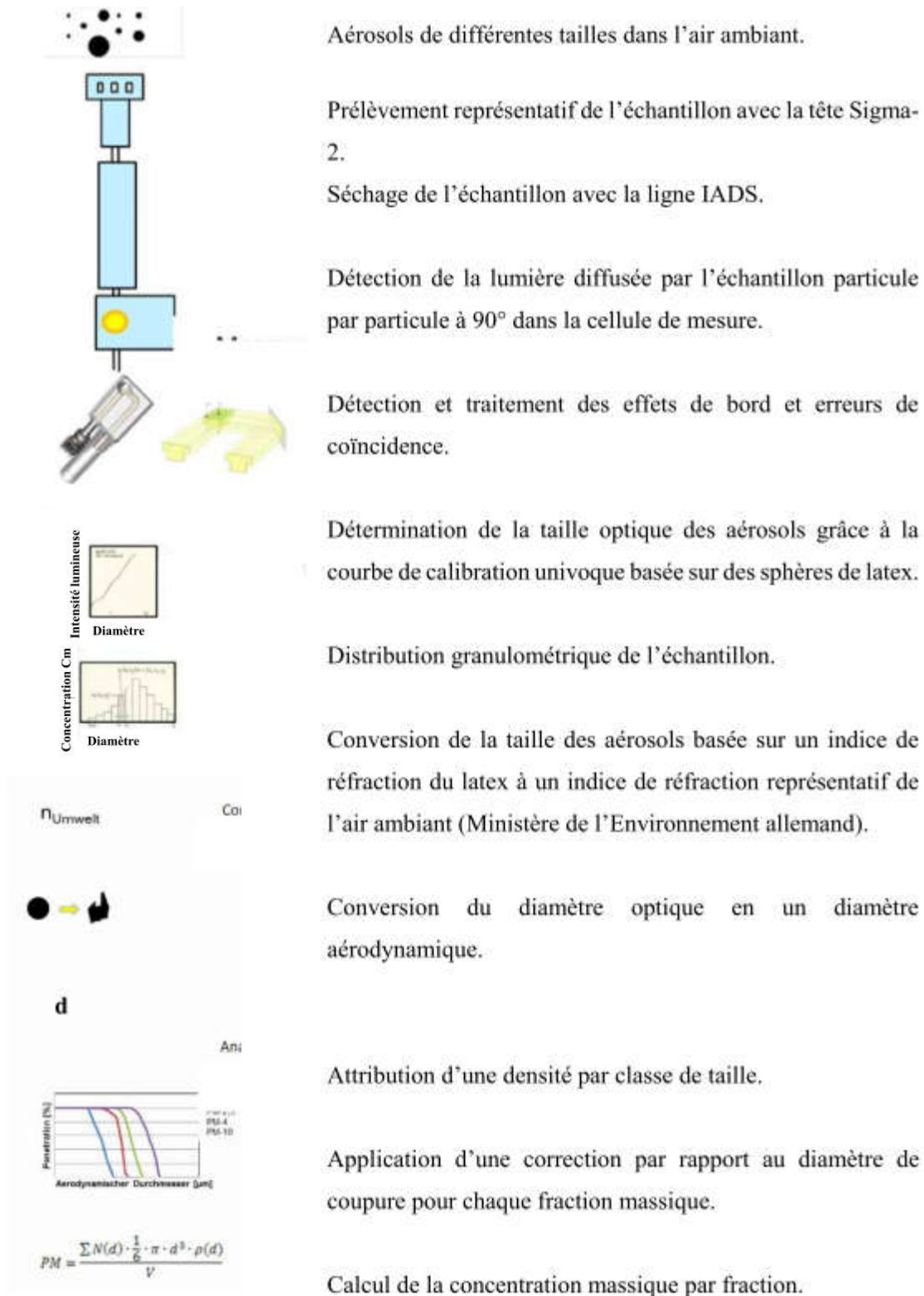


Figure 16. Etapes de mesure des particules par le FIDAS 200

La figure 17 présente un schéma détaillé du FIDAS 200, équipé d'une station météorologique et d'un abri.

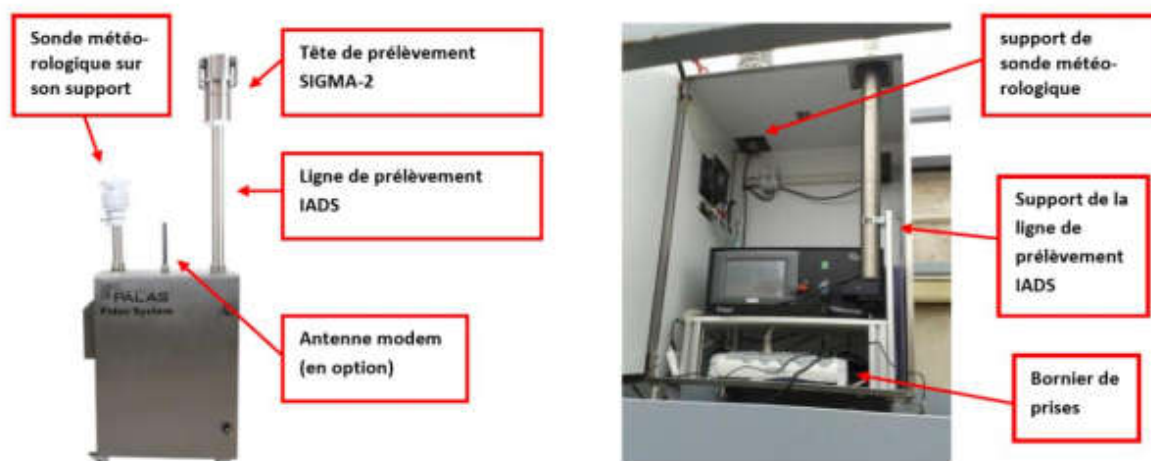


Fig. 17. Schéma détaillé du FIDAS 200 équipé d'une station météorologique et d'un abri

L'appareil est par ailleurs, doté d'un outil essentiel Le logiciel PDAnalyze Software, qui permet un traitement des résultats obtenus. L'appareil, fourni avec les manuels est utilisé pour convertir les sauvegardes journalières en fichier texte (txt) exploitable avec Excel. Le programme permet aussi de fournir des graphes de variations des PM_i et des données météorologiques obtenues par la station météo.

On peut aussi suivre les données techniques de l'état de l'appareil durant sa période de fonctionnement et détecter les défauts qui peuvent survenir en cours de fonctionnement à distance.

II.2. Description des sites de mesure

Cette partie concerne la description des sites où se sont effectuées nos mesures. Dans une optique de comparaison des niveaux de pollution par les aérosols atmosphérique dans la méditerranée, trois sites ont été choisis en Algérie et deux en Grèce.

II.2.1. Site de Bouzaréah

Le site de mesure du black carbon a été choisi à la terrasse de l'administration du Centre de Développement des Energies Renouvelables à Bouzaréah (Alger), considéré comme un site semi-urbain. Le choix de ce site est dû au fait que le centre est situé à un point culminant de la région d'Alger, sur les hauteurs de Bouzaréah, ce qui permet de mesurer le polluant loin des lieux d'émissions et étudier sa dispersion dans l'atmosphère.

Le site est situé à (36.8 °N, 3 °E), et à une altitude de 345 m du niveau de la mer, distant d'environ 1 km de la méditerranée au nord, et ~ 6 km de la ville d'Alger, située au Nord-Est et à 3 km de la forêt de Baïnem à l'Ouest. Il existe à l'Est du site une route de moyenne circulation à environ 200 m ; par contre, au nord, nous trouvons la RN11 à ~ 1 km et une autoroute à ~ 2 km à l'Est.

Il est important de mentionner qu'il n'existe pas d'industries significatives dans les alentours du site, ni combustion due à des activités agricoles sur un rayon de 10 km. Néanmoins, la ville d'Alger comporte un important trafic routier, des installations industrielles, un aéroport et un port qui sont une source importante de pollution de l'air.

II.2.2. Site de Sidi M'hamed d'Alger-centre

La commune de Sidi M'hamed d'Alger-centre occupe une superficie de 3.7 Km², avec une population de 75 541 habitants, soit une densité estimée à 20 416 hab/km², en 2008. L'endroit est situé à une latitude de 36.7724841 °N et une longitude de 3.0551159 °E. Le site de mesures se trouve à environ 600 m de la mer. Il est ouvert sur la mer et subit de ce fait une bonne ventilation naturelle. C'est un site de type urbain.

II.2.3. Site de l'Askrem, Tamanrasset

Le site de l'Askrem, situé à une latitude de 23.27 °N, une longitude de 5.63 °E et une altitude de 2730 m, est un site de référence appartenant au réseau de l'Organisation Mondiale Météorologique (Global Atmospheric Watch network ou GAW/WMO) et permet de mesurer la pollution de fond. En ce site, les mesures ont porté sur les polluants atmosphériques suivants : gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, CO, N₂O, O₃ et HF₆) et aérosols (PM et BC).

II.2.4. Site de Crète, Grèce

Le site de Finokalia constitue une référence pour l'Europe. Il permet de mesurer la pollution venant du Moyen orient et du Sahara d'Afrique du nord. Il est situé à 80 km à l'Est de la ville d'Heraklion à l'île de Crète. Cette station permet la mesure des polluants atmosphériques suivants : gaz (O₃, NO/NO_x, CO, SO₂, NH₃, HNO₃, HCOOH/CH₃COOH) et aérosols (PM, BC, Carbone organique, NH₄⁺, SO₄⁻, Cl⁻ et métaux).

II.2.5. Site d'Athènes, Grèce

Le site de mesure du carbone élémentaire est situé à l'Observatoire Nationale d'Athènes à Thissio à (38° 0.00' N, 23° 43.48' E, 110 m a.s.l.), sur une colline dominant la ville d'Athènes, entourée par des quartiers peuplés et jouxant l'Acropole, est considéré comme un site urbain (Paraskevopoulou et al., 2015).

La figure 18 présente les différents sites utilisés pour la mesure des aérosols atmosphériques objet de notre étude.

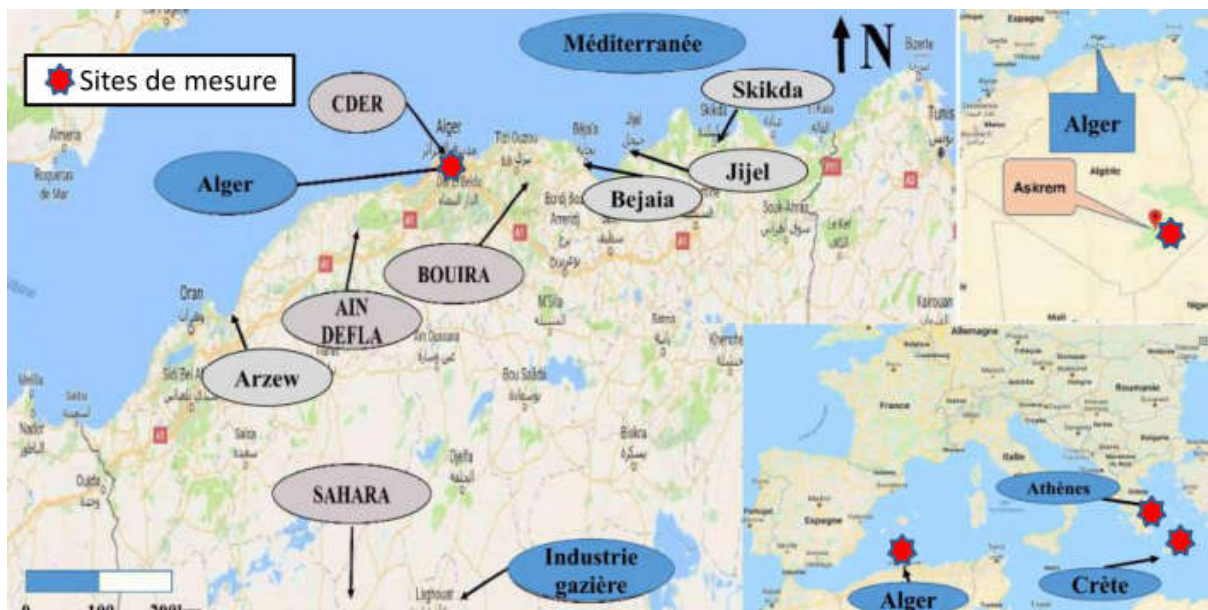


Fig. 18. Sites de mesure des aérosols dans la présente étude

II.3. Campagnes de mesures

Des mesures en continu des concentrations massiques du BC, en temps quasi-réels, ont été menées à l'observatoire de Bouzaréah (Alger) du 01/06/2014 au 31/05/2015. Au niveau du site de l'hôpital Mustapha Pacha à Alger-centre, les mesures de BC ont été réalisées du 01/05/2017 au 31/10/2017.

Les mesures des MO, NO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} et Cl^- ont été effectuées au niveau de la station Finokalia de l'île de Crète (Grèce) du 01/05/2014 au 31/12/2014.

Pour le cas des particules, les mesures ont été effectuées à Bouzaréah du 15/04/2017 au 30/04/2017, puis, à Alger-centre du 01/05/2017 au 31/04/2018.

Les données sur le BC traitées dans ce travail qui sont issues du site de l'Assekrem (Tamanrasset) ont été obtenues par l'ONM durant les mois d'avril et mai 1997.

CHAPITRE III.

Résultats et discussions

III. Résultats et discussions

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus et leur interprétation en tenant compte des sources de pollution, données météorologiques, radiométriques et satellitaires (Hysplit et Modis). Les résultats seront également comparés aux données de la littérature.

III.1. Etude du black carbon

Les résultats du black carbon déduits seront analysés dans ce qui suit, en prenant en considération les différents facteurs pouvant intervenir dans la variation des concentrations du BC tels que la vitesse et la direction du vent, la température l'humidité, le parc automobile, les activités industrielles, le chauffage et les feux de forêts.

L'Algérie du nord compte des dizaines de feux de forêts par jour, enregistrés par les services des forêts considérés comme une source importante de pollution naturelle de BC. Nous avons obtenu une base de données réalisée par la Direction Générale des Forêts (DGF), comptant les feux de forêts enregistrés à l'échelle nationale durant l'année 2014. Ces données sont d'importance inégale dans l'interprétation des pics de pollution par le BC, et cela, en les couplant aux données météorologiques et satellitaires.

Avant d'entamer cette étude de variation des concentrations de BC, il est nécessaire d'élaborer une caractérisation des sources des vents, qui mène vers l'élaboration de cartes des vents de la zone d'Alger et ses environ sur une durée de onze années. Cette étude détaillée est présentée ci-après.

III.1.1. Carte des vents

Pour étudier l'influence des facteurs météorologiques sur les niveaux de BC mesurées, nous avons réalisé les cartes des vents annuelles (De 2005 à 2015) pour la région d'Alger.

Ces cartes des vents ont été réalisées en étudiant 4016 cartes de rétro-trajectoires des vents ; celle-ci, réalisée par la NOAA, en utilisant le modèle HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model). Cette masse importante de données nous a permis d'établir une étude statistique sur la direction des vents entre 2005 et 2015, dans la région d'Alger.

Description de la méthodologie de réalisation des cartes

Après avoir téléchargé les cartes des masses d'air réalisées par Hysplit, nous avons divisé les sources des vents sur six directions selon, non seulement les directions des vents, mais aussi de la géographie et de l'état économique et du type de pollution qui peut y avoir comme le présente la figure 19. Ces directions sont : Est (E), Ouest (O), Nord-Est (N-E), Nord-Ouest (N-O), Sud (S) et Local (L).

Chapitre III: Résultats et discussions

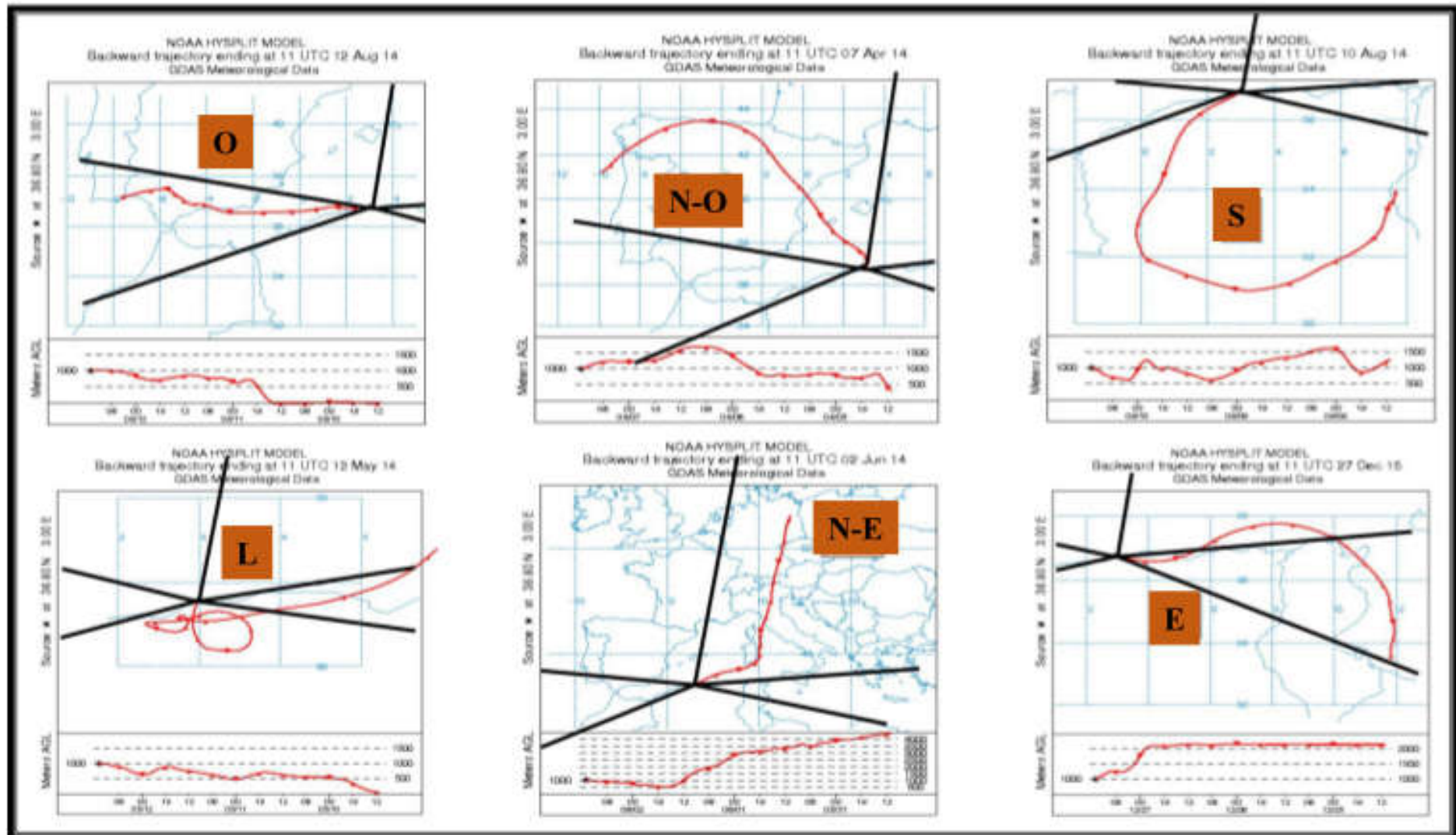


Fig. 19. Sources des masses d'air utilisées pour la réalisation des cartes des vents

- **L'Est** : comporte l'Est de l'Algérie, la partie Nord de la Tunisie et l'Est de la méditerranée, y compris le sud de la Grèce et ses îles, Chypre jusqu'aux pays Asiatiques.
- **L'Ouest** : concerne l'Ouest de l'Algérie, le Maroc, le Sud de l'Espagne et du Portugal, l'océan atlantique et l'océan atlantique.
- **Le Nord-Est** : constitue le Nord-Est de la méditerranée ainsi que les pays de l'Europe à l'Est de la France.
- **Le Nord-Ouest** : Concerne le Nord-Ouest de la méditerranée et la partie Ouest de l'Europe (France, Espagne, Portugal et Royaume Uni).
- **Le Sud** : Occupe toute l'Afrique (source de pollution désertique).
- **La source Locale** : Concerne les régions situées aux alentours d'Alger (Sud de la Méditerranée et les Wilayas adjacentes).

a. Cartes des vents annuelles

Nous présentons aux figures suivantes les cartes des vents annuelles de la zone d'étude en prenant comme exemple les années 2005, 2010 et 2015. La suite des cartes est disponible à l'annexe.

Nous présentons à la figure 20 la carte des vents de la zone d'étude durant l'année 2005. Nous remarquons que les sources principales des vents s'établissent comme suit :

- Nord-Ouest et Ouest avec 48,38% contre 16,13% pour le Sud en Janvier ;
- Nord-Ouest avec 50,00% contre 17,86% pour l'Ouest en Février ;
- Nord-Ouest avec 38,71% contre 32,26% pour le Sud en Mars ;
- Ouest avec 43,33% contre 26,67% pour le Sud et 16,67% pour l'Ouest en Avril ;
- Ouest et Nord-Ouest avec 29,03% contre 25,81% pour le Nord-Est en Mai ;
- Sud avec 46,67% contre 40,00% pour le Nord-Est en Juin ;
- Ouest et Sud avec 25,81% suivie par le Nord-Ouest avec 22,58% et 16,13% pour le Nord-Est en Juillet ;
- Nord-Ouest avec 35,48% contre 32,26% pour le Nord-Est et 16,13% pour la source Locale en Août ;
- Nord-Ouest et Sud avec 26,67% contre 20,00% pour l'Ouest et 16,67% pour le Nord-Est en Septembre ;
- Sud avec 45,16% contre 22,58% pour le Nord-Est et 16,13% pour l'Ouest en Octobre ;
- Sud avec 40,00% suivie par l'Ouest avec 20,00%, le Nord-Est et le Nord-Ouest avec 16,67% en Novembre.
- Nord-Ouest avec 32,26% suivie par l'Ouest avec 29,03% et le Nord-Est avec 25,81% en Décembre.

Les vents prédominants durant l'année 2005 sont de : Nord-Ouest (33,22%), Sud (25,46%), Nord-Est (19,93%) et Ouest (17,24%).

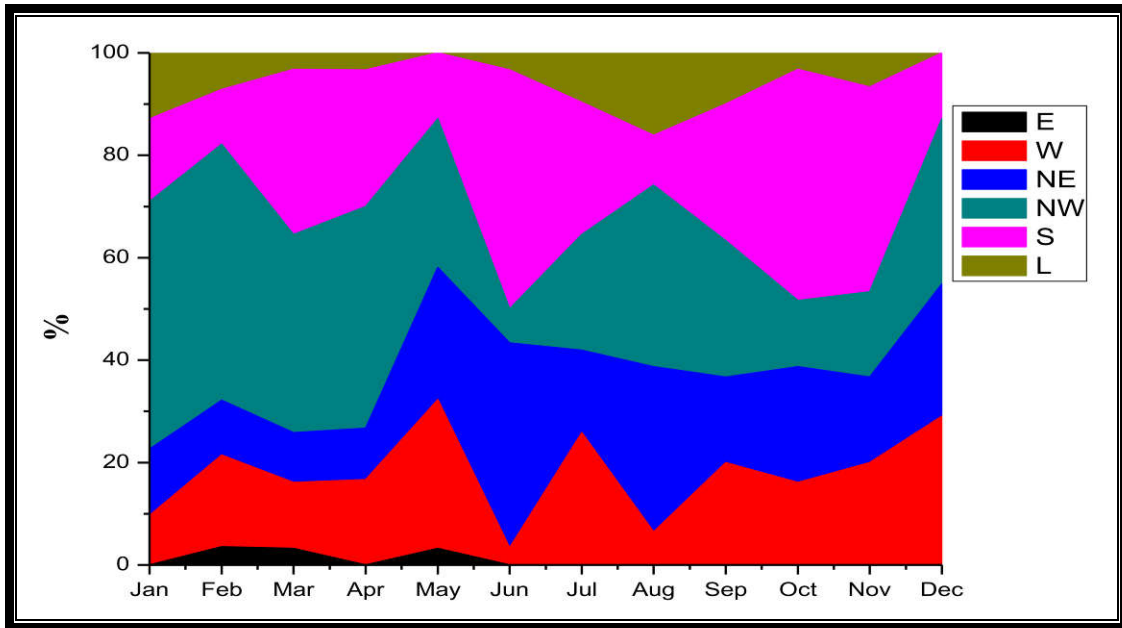


Fig. 20. Carte des vents de la zone d'étude en 2005

Nous présentons à la figure 21 la carte des vents de la zone d'étude durant l'année 2010. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 38,71% contre 23,26% pour l'Ouest et 19,35% pour le Sud en Janvier ;
- Sud avec 35,71% contre 32,14% pour l'Ouest et 28,57% pour le Nord-Ouest en Février ;
- Sud avec 35,48% contre 32,26% pour l'Ouest et 29,03% pour le Nord-Ouest en Mars ;
- Sud avec 40,00% contre 26,67% pour le Nord-Est et 20,00% pour le Nord-Ouest en Avril ;
- Nord-Ouest avec 35,26% contre 32,26% pour l'Ouest et 19,35% pour le Sud en Mai ;
- Nord-Ouest avec 36,67% contre 23,33% pour l'Ouest et 20,00% pour le Sud en Juin ;
- Nord-Est avec 38,71% suivie par le Sud et la source Locale avec 22,58% en Juillet ;
- Nord-Est et Locale avec 32,26% contre 12,90% pour le Sud en Aout ;
- Nord-Est avec 30,00% contre 26,67% pour le Sud et 20,00% pour le Nord-Ouest en Septembre ;
- Ouest avec 45,16% contre 25,81% pour le Nord-Ouest et le Sud en Octobre ;
- Nord-Ouest avec 43,33% suivie par l'Ouest avec 33,33% et 13,33% pour le Sud en Novembre.
- Nord-Ouest et Sud avec 32,26% suivie par l'Ouest avec 22,58% en Décembre.

Les vents prédominants durant l'année 2010 sont de : Nord-Ouest (26,63%), Sud (25,29%), Ouest (25,21%) et Nord-Est (15,84%).

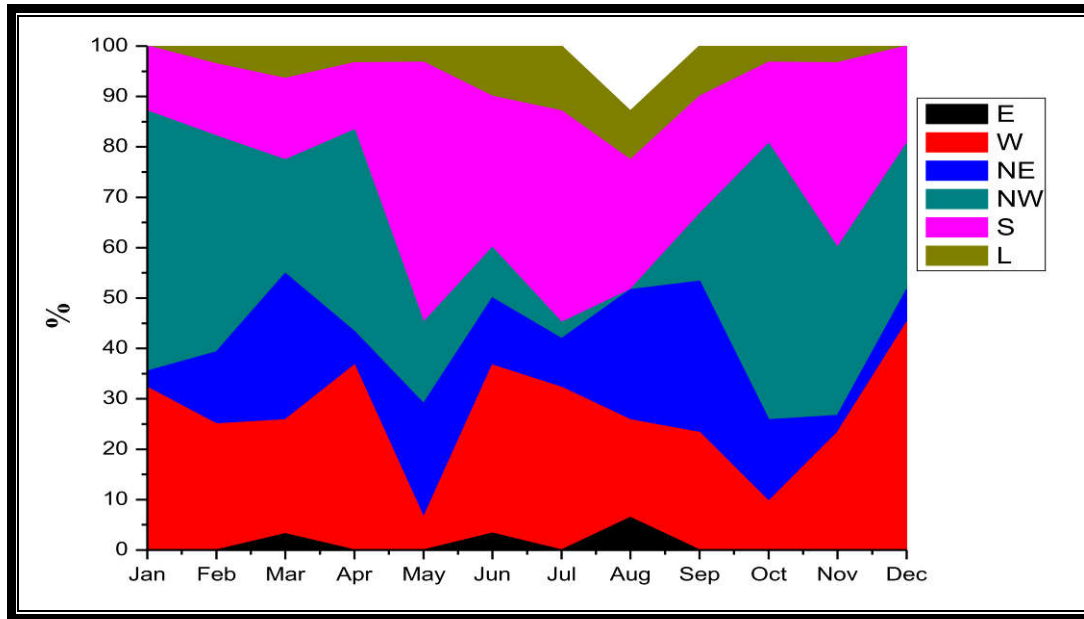


Fig. 21. Carte des vents de la zone d'étude en 2010

Nous présentons à la figure 22 la carte des vents de la zone d'étude durant 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 41,94% contre 32,26% pour le Sud et 12,90% pour le Nord-Est en Janvier ;
- Nord-Ouest avec 64,29% contre 10,71% pour l'Ouest et le Sud en Février ;
- Nord-Ouest avec 54,84% contre 22,58% pour le Sud et 12,90% pour le Nord-Est en Mars ;
- Sud avec 40,00% contre 23,33% pour le Nord-Ouest et 16,67% pour l'Ouest et le Nord-Est en Avril ;
- Locale avec 29,03% contre 22,58% pour le Nord-Est et le Nord-Ouest et 16,13% pour le Sud en Mai ;
- Nord-Est avec 36,67% contre 20,00% pour l'Ouest et 13,33% pour l'Est et le Nord-Ouest en Juin ;
- Nord-Est avec 61,29% suivie par la source Locale avec 12,90% et 9,67% pour l'Ouest et le Sud en Juillet ;
- Sud avec 41,94% contre 19,35% pour l'Ouest et 16,13% pour le Nord-Est en Aout ;
- Nord-Est avec 30,00% contre 26,67% pour l'Ouest et 20,00% pour le Nord-Ouest en Septembre ;
- Nord-Ouest et Sud avec 29,03% contre 22,58% pour l'Ouest et 12,90% pour le Nord-Est en Octobre ;
- Nord-Ouest avec 33,33% suivie par le Nord-Est avec 23,33% et la source Locale avec 20,00% en Novembre.
- Sud avec 35,48% suivie par la source Locale avec 22,58% et 16,13% pour le Nord-Ouest en Décembre.

Les vents prédominants durant l'année 2015 sont de : Nord-Ouest (27,64%), Sud (22,87%), Nord-Est (21,58%), Ouest (13,72%) et Locale (12,26%).

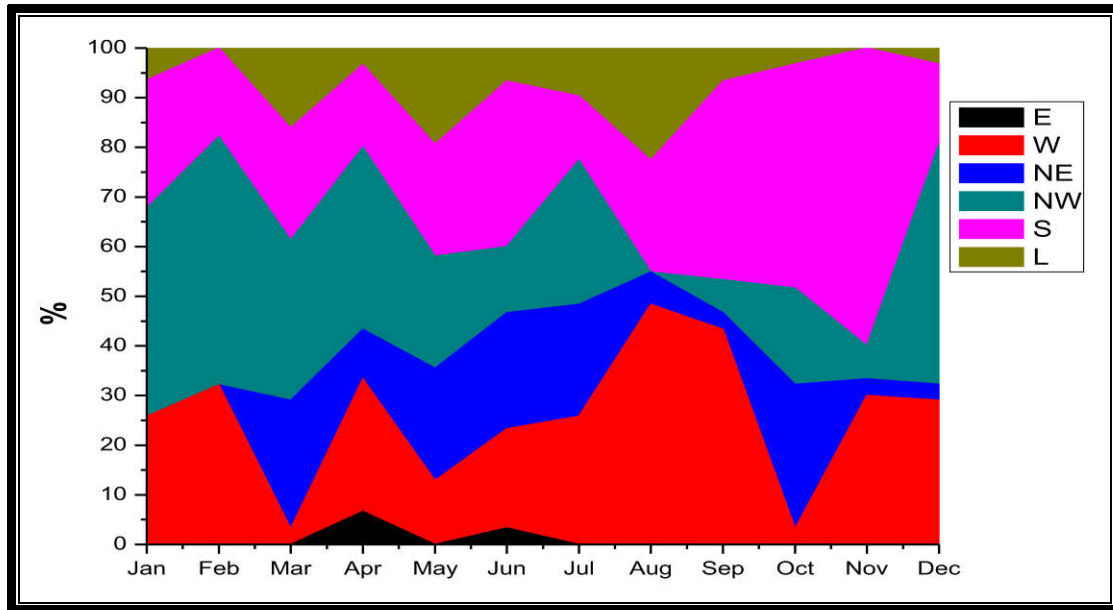


Fig. 22. Carte des vents de la zone d'étude en 2015

Nous présentons à la figure 23 la carte des vents de la zone d'étude de 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest (33,22%), Sud (25,46%), Nord-Est (19,93%) et Ouest (17,24%) en 2005 ;
- Sud (29,28%), Nord-Ouest (22,57%), Ouest (19,57%) et Nord-Est (18,49%) en 2006 ;
- Nord-Ouest (28,33%), Sud (27,29%), Ouest (21,10%) et Nord-Est (16,70%) en 2007 ;
- Sud (27,88%), Nord-Ouest (25,64%) et Ouest (24,60%) en 2008 ;
- Nord-Ouest (26,41%), Ouest (25,78%), Sud (25,12%) et Nord-Est (15,04%) en 2009 ;
- Nord-Ouest (26,63%), Sud (25,29%), Ouest (25,21%) et Nord-Est (15,84%) en 2010 ;
- Sud (29,98%), Nord-Est (21,01%), Nord-Ouest (20,71%) et Ouest (20,03%) en 2011 ;
- Sud (28,73%), Ouest (25,92%), Nord-Ouest (25,62%) et Nord-Est (12,65%) en 2012 ;
- Nord-Ouest (24,94%), Ouest (24,59%), Sud (21,56%) et Nord-Est (21,01%) en 2013 ;
- Sud (27,97%), Nord-Ouest (25,57%), Ouest (25,04%) et Nord-Est (12,47%) en 2014 ;
- Nord-Ouest (27,64%), Sud (22,87%), Nord-Est (21,58%), Ouest (13,72%) en 2015.

Les vents prédominants entre 2005 et 2015 sont de : Sud (26,53%), Nord-Ouest (25,73%) et Ouest (22,07%).

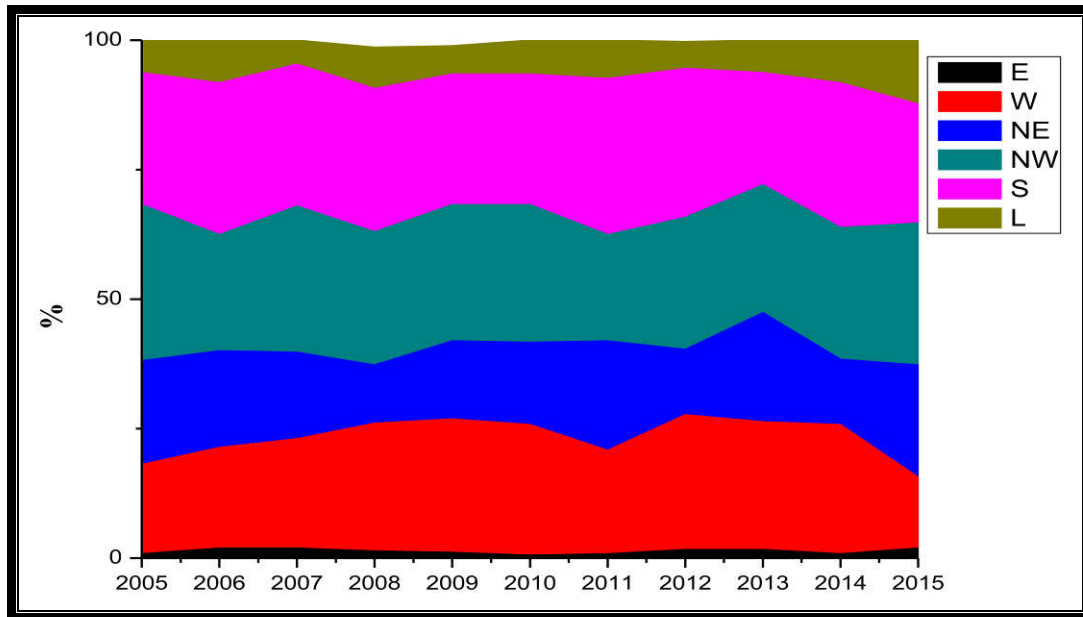


Fig. 23. Carte des vents annuelle moyenne de la zone d'étude de 2005 à 2015

b. Cartes des vents saisonnières

Nous présentons à la figure 24 la carte des vents de la zone d'étude en l'hiver de 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 42,86% contre 18,68% pour le Sud et 15,38% pour l'Ouest en 2005 ;
- Nord-Ouest avec 32,61% suivie par l'Ouest avec 21,74% et 19,56% pour le Nord-Est et le Sud en 2006 ;
- Nord-Ouest avec 41,30% contre 23,91% pour le Sud et 21,74% pour l'Ouest en 2007 ;
- Nord-Ouest avec 29,67% contre 26,37% pour le Sud et 21,98% pour l'Ouest en 2008 ;
- Nord-Ouest avec 38,04% contre 28,26% pour l'Ouest et 17,39% pour le Sud en 2009 ;
- Nord-Ouest avec 33,70% contre 31,52% pour le Sud et 28,26% pour l'Ouest en 2010 ;
- Nord-Ouest avec 32,61% suivie par le Sud avec 30,43% et l'Ouest avec 23,91% en 2011 ;
- Sud (28,73%), Ouest (25,92%), Nord-Ouest (25,62%) et Nord-Est (12,65%). en 2012 ;
- Nord-Ouest avec 43,48% contre 35,87% pour l'Ouest en 2013 ;
- Nord-Ouest avec 42,39% contre 19,56% pour l'Ouest et le Sud en 2014 ;
- Nord-Ouest avec 46,74% contre 27,17% pour le Sud en 2015.

Les vents prédominants pendant l'hiver de 2005 à 2015 sont de : Nord-Ouest (39,15%), Sud (22,20%) et Ouest (21,59%).

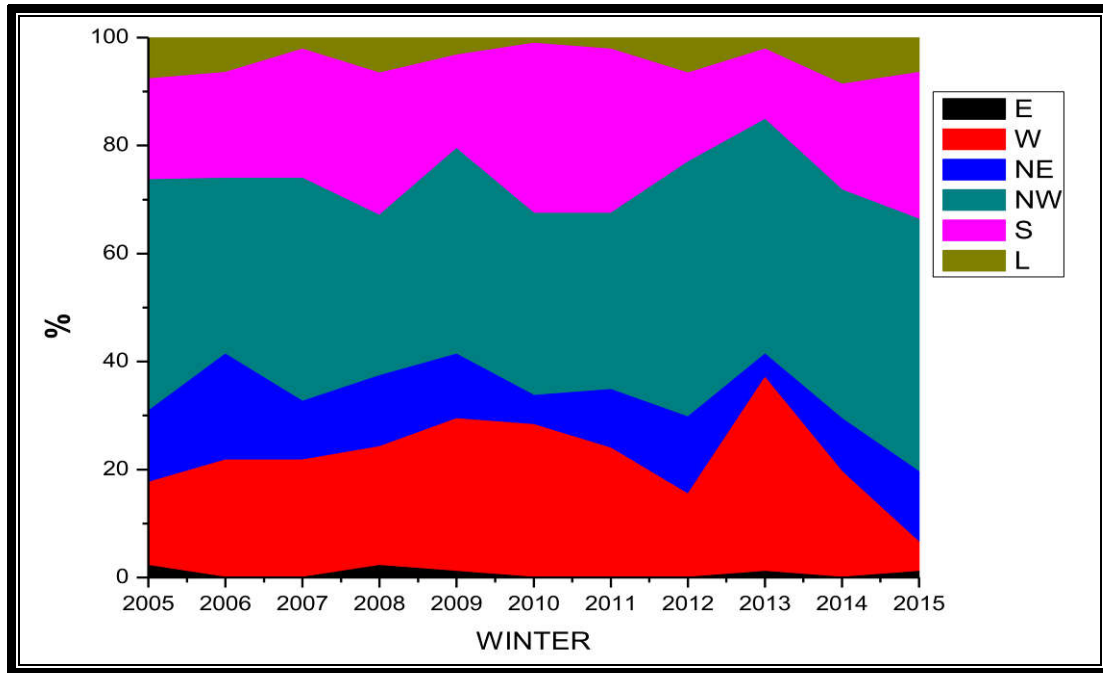


Fig. 24. Carte des vents de la zone d'étude durant l'hiver entre 2005 et 2015

Nous présentons à la figure 25 la carte des vents de la zone d'étude au printemps de 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 31,11% contre 24,44% pour le Sud, 22,22% pour le Nord-Est et 18,89% pour l'Ouest en 2005 ;
- Sud avec 41,57% suivie par le Nord-Ouest avec 16,85% et 15,73% pour l'Ouest en 2006 ;
- Sud avec 28,89% contre 26,67% pour l'Ouest et 24,44% pour le Nord-Ouest en 2007 ;
- Nord-Ouest avec 34,44% contre 28,89% pour l'Ouest et 18,89% pour le Sud en 2008 ;
- Sud avec 34,44% contre 23,33% pour l'Ouest et 22,22 % pour le Nord-Ouest en 2009 ;
- Nord-Ouest avec 28,89% contre 27,78% pour l'Ouest et 25,56% pour le Sud en 2010 ;
- Sud avec 33,33% suivie par le Nord-Est avec 24,44%, l'Ouest avec 17,78% et le Nord-Ouest avec 16,67% en 2011 ;
- Ouest avec 27,78% contre 26,67% pour le Sud et 23,33% pour le Nord-Ouest en 2012 ;
- Ouest avec 38,89% contre 22,22% pour le Nord-Est et 18,88% pour le Nord-Ouest en 2013 ;
- Nord-Ouest et Sud avec 25,56% contre 18,89% pour le Nord-Est et 16,67% pour l'Ouest en 2014 ;
- Nord-Ouest avec 25,56% contre 23,33% pour le Sud, 17,78% pour le Nord-Est et 15,56% pour l'Ouest en 2015.

Les vents prédominants durant le printemps de 2005 à 2015 sont de : Sud (26,81%), Nord-Ouest (24,36%) et Ouest (23,45%).

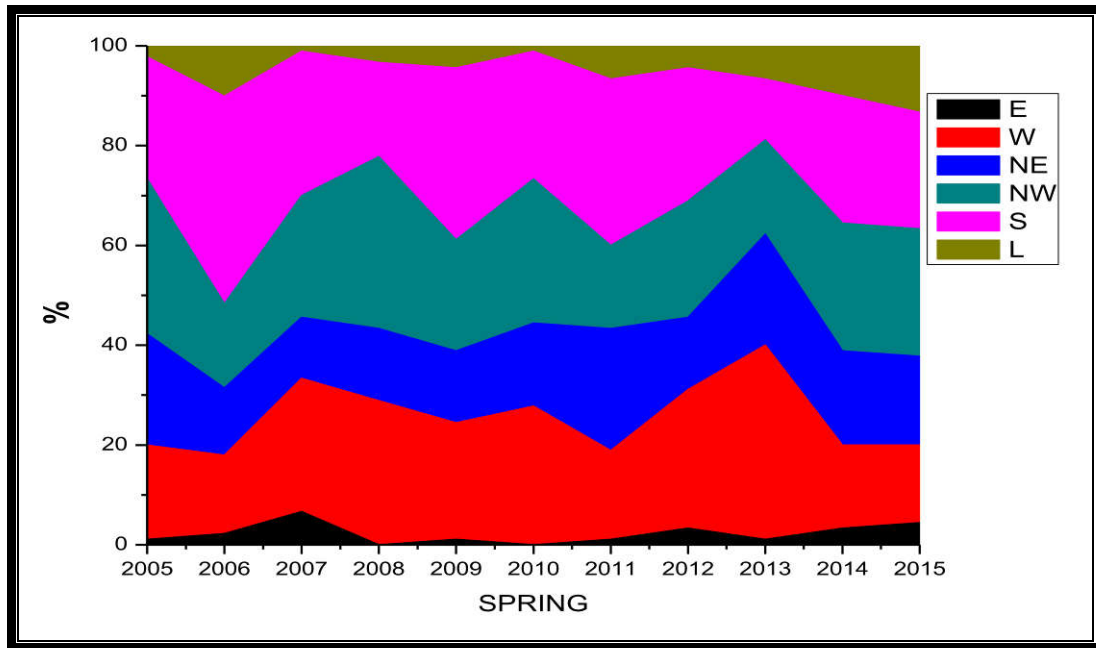


Fig. 25. Carte des vents de la zone d'étude durant le printemps entre 2005 et 2015

Nous présentons à la figure 26 la carte des vents moyenne de la zone d'étude en été de 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 25,53% contre 24,47% pour le Sud et 21,28% pour le Nord-Est en 2005 ;
- Sud avec 25,26% suivie par le Nord-Est avec 24,21% et le Nord-Ouest avec 20,00% en 2006 ;
- Sud avec 36,17% contre 18,08% pour l'Ouest et le Nord-Est et 15,96% pour le Nord-Ouest en 2007 ;
- Sud avec 32,22% contre 21,11% pour l'Ouest et 20,00% pour la source Locale en 2008 ;
- Ouest avec 31,11% contre 26,67% pour le Sud et 23,33% pour le Nord-Est en 2009 ;
- Nord-Est avec 35,11% contre 23,40% pour le Sud et 20,21% pour la source Locale en 2010 ;
- Nord-Est avec 27,66% suivie par le Sud avec 25,53% et l'Ouest avec 19,15% en 2011 ;
- Sud avec 31,91% contre 30,85% pour l'Ouest et 18,08% pour le Nord-Est en 2012 ;
- Nord-Est avec 46,81% contre 27,66% pour le Sud en 2013 ;
- Ouest avec 40,42% contre 23,40% pour le Sud en 2014 ;
- Nord-Est avec 38,30% contre 20,21% pour le Sud et 19,15% pour l'Ouest en 2015.

Les vents prédominants durant l'été de 2005 à 2015 viennent de : Sud (26,99%), Nord-Est (24,86%), et Ouest (20,88%).

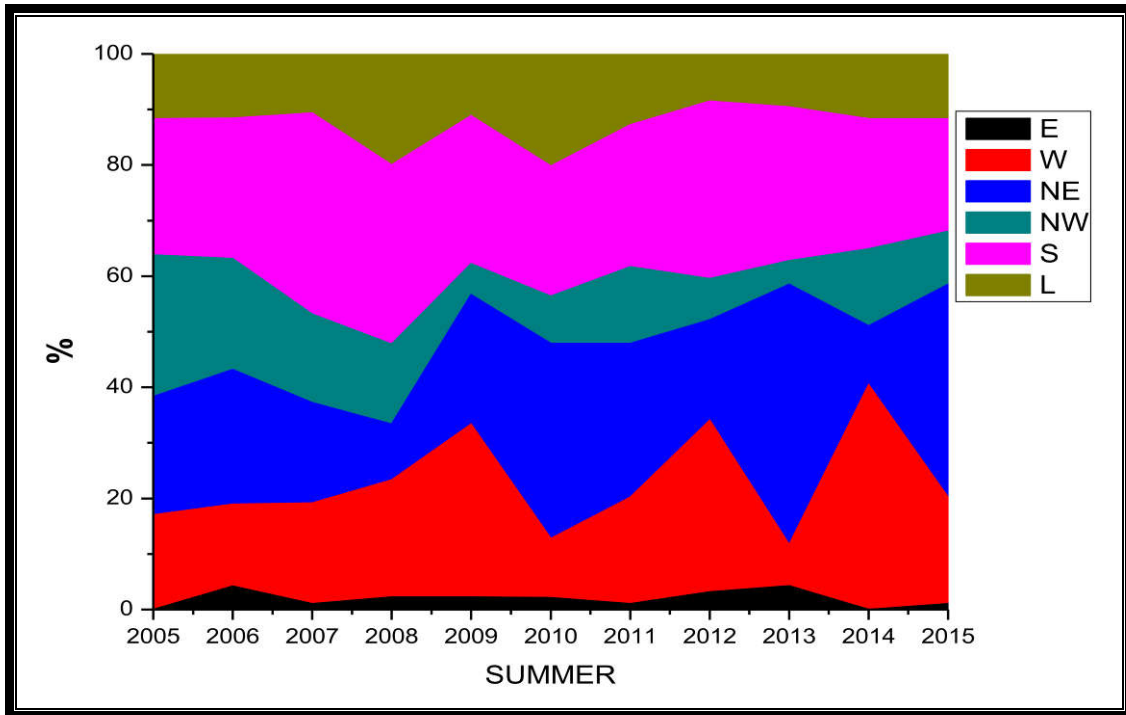


Fig. 26. Carte des vents de la zone d'étude durant l'été entre 2005 et 2015

Nous présentons à la figure 27 la carte des vents de la zone d'étude durant l'automne de 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Sud avec 33,71% contre 23,60% pour le Nord-Est et 21,35% pour le Nord-Ouest en 2005 ;
- Sud avec 31,46% suivie par l'Ouest avec 25,84% et 20,22% pour le Nord-Ouest en 2006 ;
- Nord-Ouest avec 31,46% contre 25,84% pour le Nord-Est, 20,22% pour le Sud et 17,98% pour l'Ouest en 2007 ;
- Sud avec 34,83% contre 28,09% pour l'Ouest et 25,84% pour le Nord-Ouest en 2008 ;
- Nord-Ouest avec 40,45% contre 23,60% pour le Sud et 21,35% pour l'Ouest en 2009 ;
- Nord-Ouest avec 35,96% contre 34,83% pour l'Ouest et 20,22% pour le Sud en 2010 ;
- Sud avec 31,46% suivie par le Nord-Est avec 21,35% et le l'Ouest ainsi que le Nord-Ouest avec 19,10% en 2011 ;
- Sud avec 40,45% contre 30,34% pour l'Ouest et 24,72% pour le Nord-Ouest en 2012 ;
- Sud avec 33,71% contre 32,58% pour le Nord-Ouest et 16,85% pour l'Ouest en 2013 ;
- Sud avec 43,82% contre 22,47% pour l'Ouest et 20,22% pour le Nord-Ouest en 2014 ;
- Nord-Ouest avec 28,09% contre 21,35% pour le Sud et 17,98% pour la source Locale en 2015.

Les vents prédominants durant l'automne de 2005 à 2015 viennent de : Sud (30,44%), Nord-Ouest (27,27%) et Ouest (22,68%).

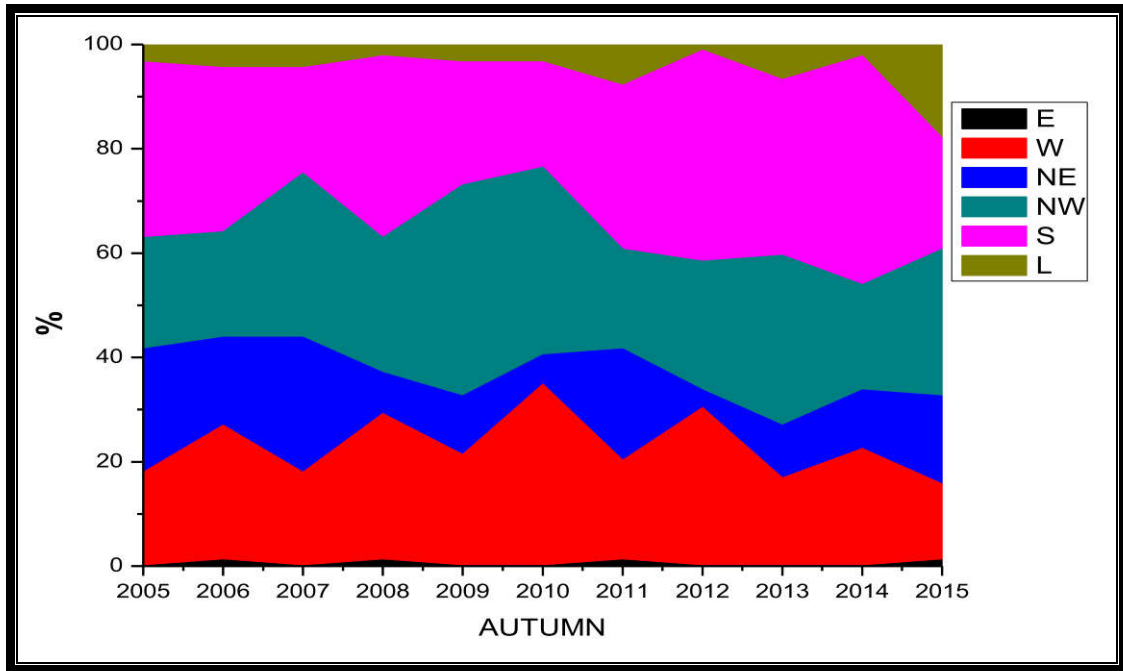


Fig. 27. Carte des vents de la zone d'étude durant l'automne entre 2005 et 2015

Nous présentons dans la figure 28 la carte des vents moyenne de la zone d'étude durant les quatre saisons de 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest (39,15%), Sud (22,20%) et Ouest (21,59%) durant l'hiver ;
- Sud (26,81%), Nord-Ouest (24,36%) et Ouest (23,45%) durant le printemps ;
- Sud (26,99%), Nord-Est (24,86%), et Ouest (20,88%) durant l'été ;
- Sud (30,44%), Nord-Ouest (27,27%) et Ouest (22,68%) en automne.

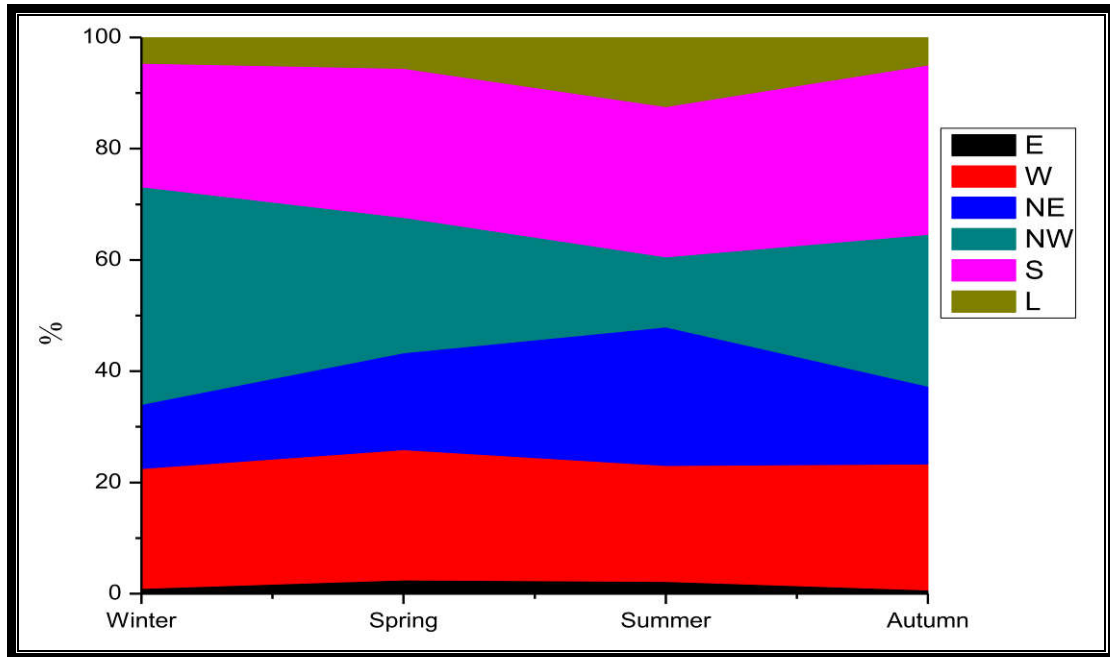


Fig. 28. Carte des vents moyenne de la zone d'étude durant les quatre saisons entre 2005 et 2015

c. Cartes des vents mensuelles

Nous présentons aux figures suivantes les cartes des vents mensuelles de la zone d'étude durant la période de 2005 à 2015 en prenant comme exemple les mois de Janvier, avril, juillet et octobre. Le reste des cartes est disponibles en annexe.

La figure 29 la carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Janvier de 2005 à 2015.

Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 48,38% contre 16,13% pour le Sud en 2005 ;
- Nord-Est avec 38,71% suivie par le Sud avec 22,58% et 19,35 pour le Nord-Ouest en 2006 ;
- Nord-Ouest avec 38,71% contre 32,26% pour le Sud et 19,35 pour l'Ouest en 2007 ;
- Nord-Ouest avec 38,71% contre 19,35% pour le Sud et l'Ouest en 2008 ;
- Nord-Ouest avec 51,61% contre 32,25 pour l'Ouest et 12,90% pour le Sud en 2009 ;
- Nord-Ouest avec 38,71% contre 32,26% pour l'Ouest et 19,35% pour le Sud en 2010 ;
- Sud avec 35,48% suivie par l'Ouest avec 32,26% et le Nord-Ouest avec 22,58% en 2011 ;
- Nord-Ouest avec 48,39% contre 16,13% pour l'Ouest et le Sud en 2012 ;
- Nord-Ouest avec 48,39% contre 41,94% pour l'Ouest en 2013 ;
- Nord-Ouest avec 41,94% contre 25,81% pour l'Ouest et le Sud en 2014 ;
- Nord-Ouest avec 41,94% contre 32,26% pour le Sud et 32,22% pour l'Ouest en 2015.

Les directions des vents prédominantes durant le mois de Janvier de 2005 à 2015 sont de :

Nord-Ouest (39,88%), Ouest (21,99%) et Sud (21,11%).

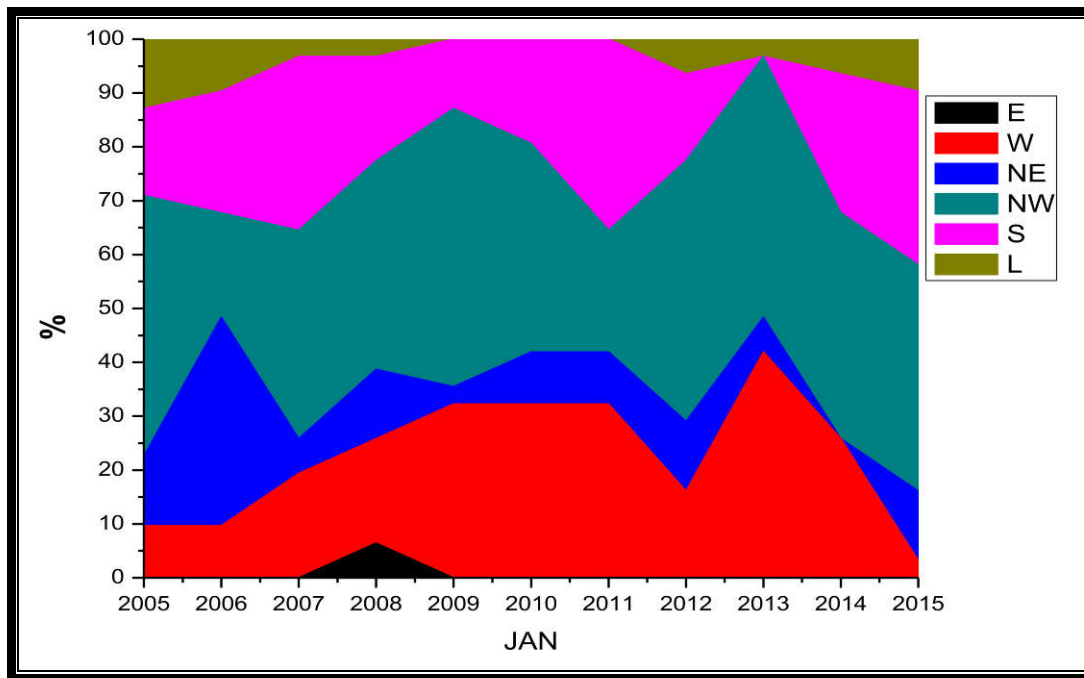


Fig. 29. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Janvier de 2005 à 2015

Nous présentons à la figure 30 la carte des vents de la zone d'étude durant le mois d'Avril de 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 43,33% contre 26,66% pour le Sud et 16,66% pour l'Ouest en 2005 ;
- Sud avec 33,33% contre 30,00% pour le Nord-Ouest et 20,00% pour l'Ouest en 2006 ;
- Sud avec 33,33% contre 20,00% pour l'Ouest et 20,00% pour l'Est en 2007 ;
- Nord-Ouest avec 40,00% contre 26,66% pour l'Ouest et 20,00% pour le Nord-Est en 2008 ;

- Nord-Ouest avec 40,00% contre 36,66% pour l'Ouest et 13,33% pour le Sud en 2009 ;
- Sud avec 40,00% contre 26,66% pour le Nord-Est et 20,00% pour le Nord-Ouest en 2010 ;
- Sud avec 40,00% suivie par le Nord-Est avec 30,00% en 2011 ;
- Ouest avec 43,33% contre 30,00% pour le Nord-Ouest et l'Ouest et 23,33% pour le Sud en 2012 ;
- Ouest et Nord-Est avec avec 26,66% contre 20,00% pour le Nord-Ouest et 16.66% pour le Sud en 2013 ;
- Nord-Ouest avec 36,66% contre 26,66% pour l'Ouest et 16,66% pour le Sud en 2014 ;
- Sud avec 40,00% suivie par le Nord-Ouest avec 23,33% et 16,66% pour l'Ouest et le Nord-Est en 2015.

Les directions des vents prédominantes durant le mois d'Avril de 2005 à 2015 sont de : Nord-Ouest (27,88%), Sud (26,97%), Ouest (23,03%) et Nord-Est (15,76%).

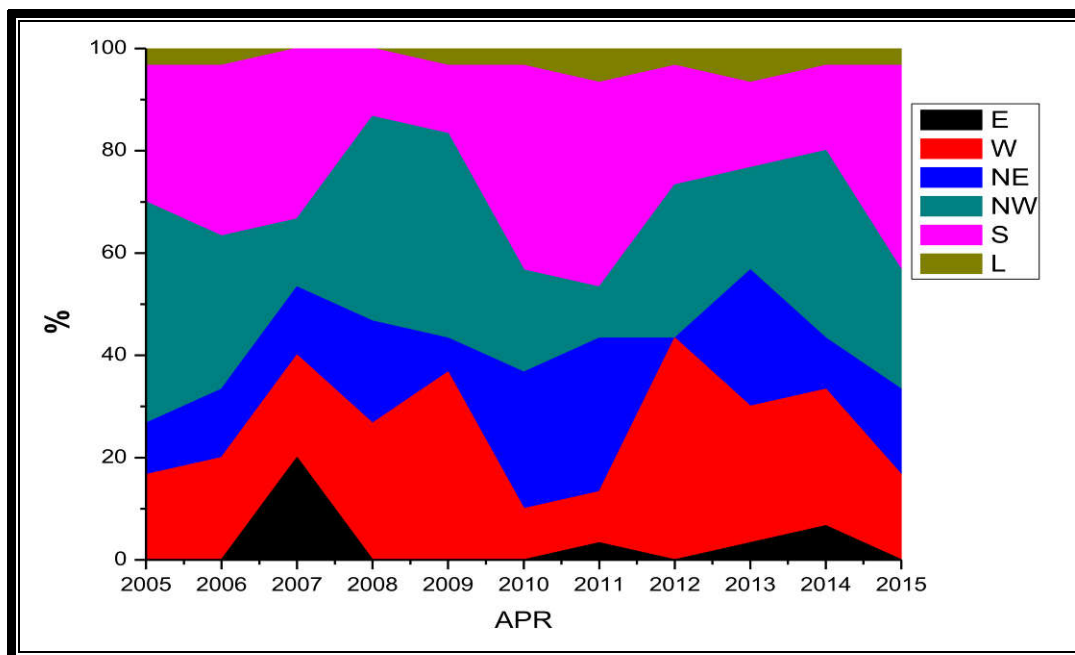


Fig. 30. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois d'Avril de 2005 à 2015

Nous présentons à la figure 31 la carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Juillet de l'année 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Sud et Ouest avec 25,80% contre 22,58% pour le Nord-Ouest et 16,13% pour le Nord-Est en 2005 ;
- Nord-Est avec 35,48% contre 22,58% pour le Sud et 16,13% pour le Nord-Ouest en 2006 ;
- Sud et Ouest avec 25,80% contre 19,35% pour le Nord-Est et le Nord-Ouest en 2007 ;
- Loacle avec 29,03% contre 25,80% pour l'Ouest et le Sud et 19,35% pour le Nord-Est et Nord-Ouest en 2008 ;
- Sud avec 41,94% contre 32,26% pour l'Ouest et 12,90% pour la source Locale en 2009 ;
- Nord-Est avec 38,71% contre 22,58% pour le Sud et la source Locale en 2010 ;
- Sud avec 32,26% suivie par le Nord-Est avec 29,03%, l'Ouest avec 22,58% et 16,13% pour le Nord-Ouest en 2011 ;
- Ouest avec 35,48% contre 29,03% pour le Sud et 19,35% pour le Nord-Est en 2012 ;

- Nord-Est avec avec 48,39% contre 25,81% pour le Sud et 16,13% pour la source Locale en 2013 ;
- Nord-Ouest avec 29,03% contre 25,80% pour le Nord-Est et l'Ouest et 12,90% pour le Sud en 2014 ;
- Nord-Est avec 61,29% suivie par la source Locale avec 12,90 en 2015.

Les directions des vents prédominantes durant le mois de Juillet de 2005 à 2015 sont de : Nord-Est (27,86%), Sud (24,93%), Ouest (20,53%).

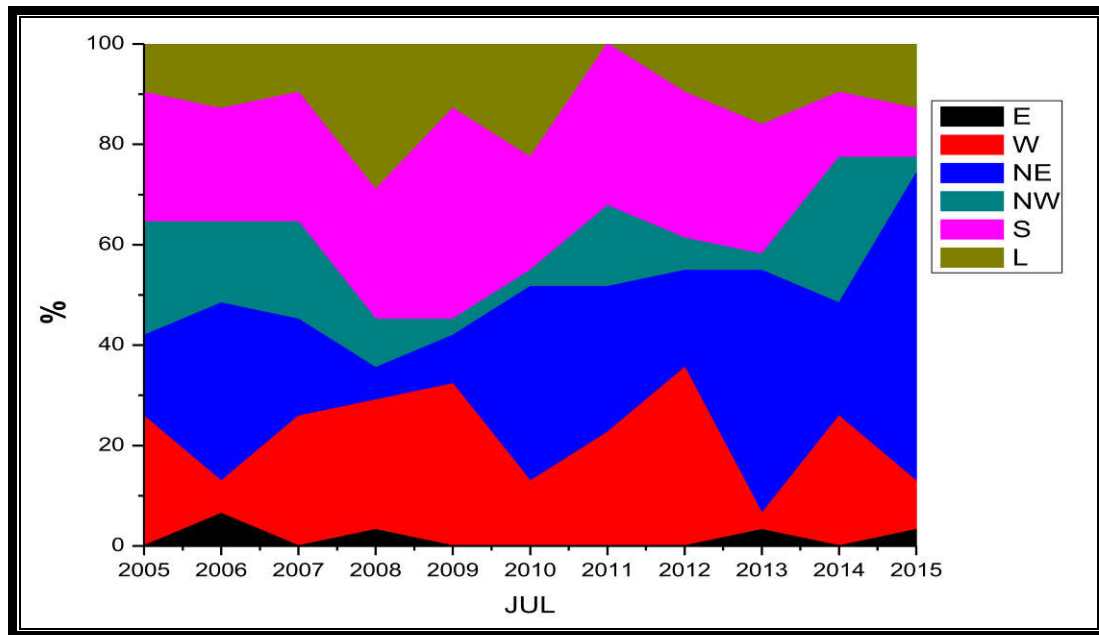


Fig. 31. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Juillet de 2005 à 2015

Nous présentons à la figure 32 la carte des vents de la zone d'étude durant le mois d'Octobre de l'année 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Sud avec 45,16% contre 22,58% pour le Nord-Est et 16,13% pour l'Ouest et 12,90% pour le Nord-Ouest en 2005 ;
- Sud avec 29,03% contre 22,58% pour le Nord-Est et 19,35% pour l'Ouest et le Nord-Ouest en 2006 ;
- Sud avec 35,48% contre 29,03% pour le Nord-Ouest et 16,13% pour le Nord-Est et l'Ouest en 2007 ;
- Sud avec 51,61% contre 25,81% pour le Sud en 2008 ;
- Nord-Ouest avec 54,84% contre 16,13% pour le Sud et le Nord-Est en 2009 ;
- Ouest avec 45,16% contre 25,81% pour le Sud et le Nord-Ouest en 2010 ;
- Nord-Est avec 38,71% suivie par le Sud avec 35,48% et l'Ouest avec 12,90% en 2011 ;
- Ouest et Sud avec 35,48% contre 29,03% pour le Nord-Ouest en 2012 ;
- Sud avec avec 51,61% contre 22,58% pour l'Ouest et 12,90% pour le Nord-Ouest en 2013 ;
- Sud avec 45,16% contre 29,03% pour le Nord-Est 19,35% pour le Nord-Ouest en 2014 ;
- Sud et Nord-Ouest avec 29,03% suivie par l'Ouest avec 22,58% et le Nord-Est avec 12,90% en 2015.

Les directions des vents prédominantes durant le mois d'Octobre de 2005 à 2015 sont de : Sud (36,36%), Nord-Ouest (22,58%), Ouest (20,23%) et Nord-Est (15,84%).

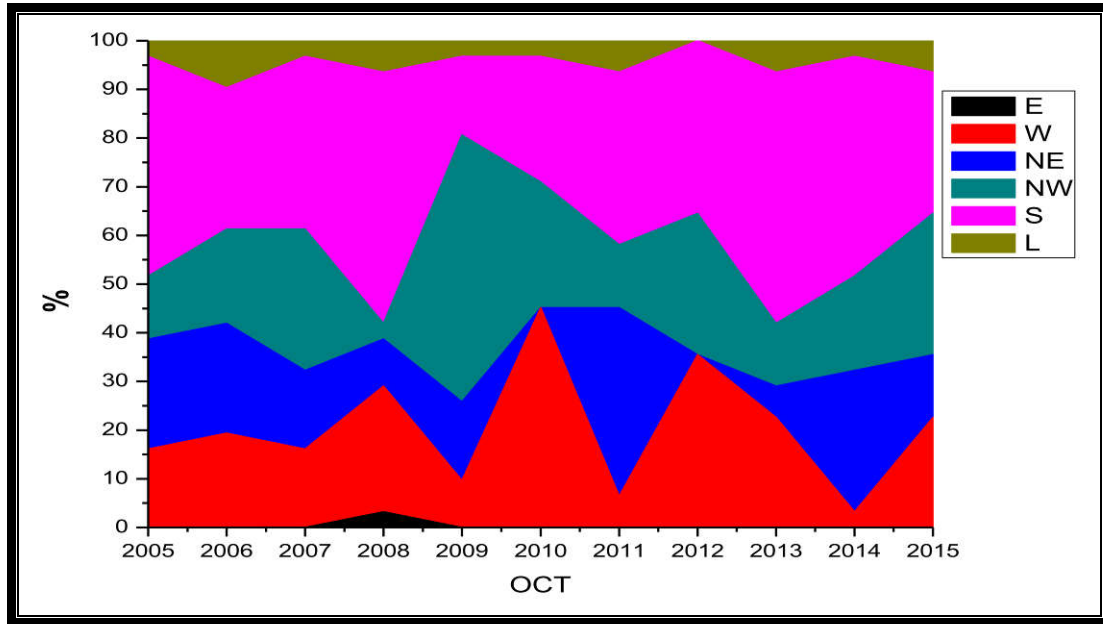


Fig. 32. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois d'Octobre de 2005 à 2015

Nous présentons à la figure 33 la carte des vents moyenne de la zone d'étude par mois de 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents durant onze (11) années étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 39,88% contre 21,99% pour l'Ouest et 21,11% pour le Sud durant le mois de Janvier ;
- Nord-Ouest avec 45,13% contre 24,35% pour l'Ouest et 18,18% pour le Sud en Février ;
- Nord-Ouest avec 34,02% contre 24,93% pour le Sud et 23,17% l'Ouest en Mars ;
- Nord-Ouest avec 27,88% contre 26,97% pour le Sud et 23,03% pour l'Ouest durant le mois d'Avril ;
- Sud avec 25,51% contre 23,75% pour l'Ouest et 22,29% pour le Nord-Ouest en Mai ;
- Sud avec 29,7% contre 24,85% pour le Nord-Est et 19,39% pour le Sud en Juin ;
- Nord-Est avec 27,86% suivie par le Sud avec 24,93% et l'Ouest avec 20,53% en Juillet ;
- Sud avec 25,81% contre 22,58% pour le Nord-Est et 20,53% pour l'Ouest durant le mois d'Août ;
- Sud avec 28,48% contre 22,73% pour l'Ouest et 21,21% pour le Nord-Est en Septembre ;
- Sud avec 36,36% contre 22,58% pour le Nord-Ouest et 20,23% pour l'Ouest durant le mois d'Octobre ;
- Sud avec 34,24% suivie par le Nord-Ouest avec 28,18% et l'Ouest avec 19,09% pour le mois de Novembre ;
- Nord-Ouest avec 34,31% suivie par l'Ouest avec 26,10% et le Sud avec 21,70% pour le mois de Décembre ;

Les directions des vents prédominantes durant les douze mois de 2005 à 2015 sont de : Sud (26,49%), Nord-Ouest (25,84%), Ouest (22,07%) et Nord-Est (16,91%).

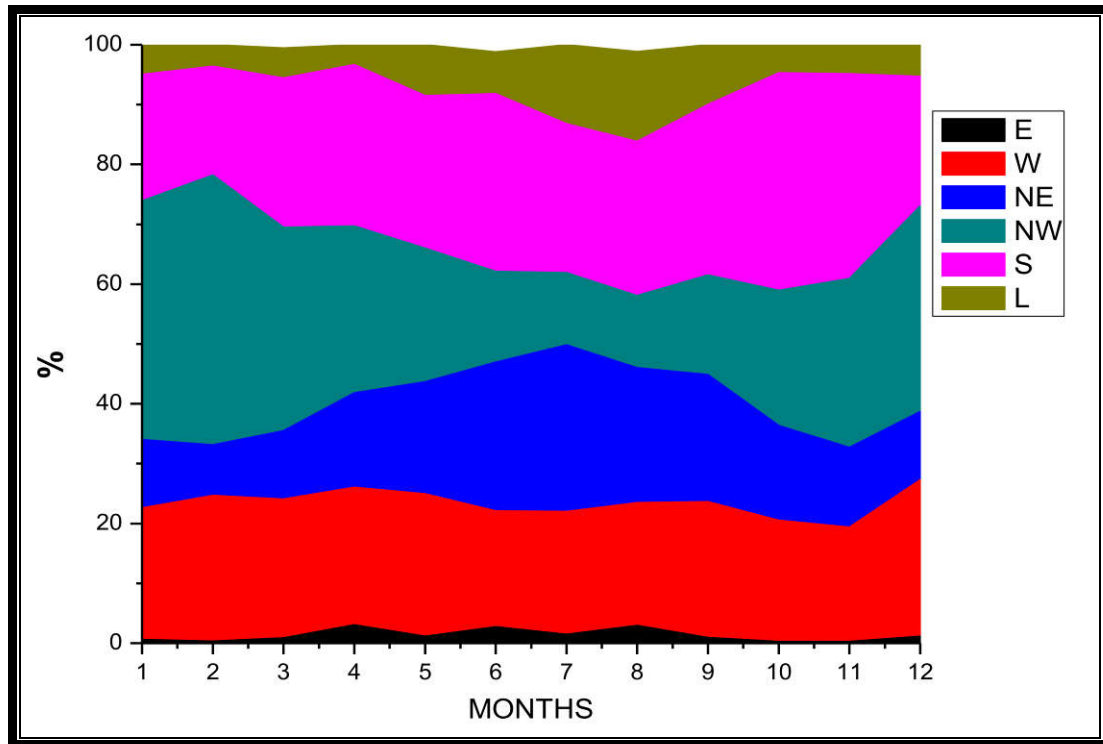


Fig. 33. Carte des vents moyenne de la zone d'étude par mois entre 2005 et 2015

d. Carte des vents de l'année de mesure de BC

La figure 34 présente la carte des vents relative à la période de mesure de BC (01/06/2014 au 31/05/2015) établie à partir de 365 cartes des rétro-trajectoires des masses d'air téléchargées par HYSPLIT. Une telle carte est considérée utile dans l'interprétation des niveaux de pollution. Nous remarquons que les sources principales des vents durant onze (11) années étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 33,33% contre 23,33% pour le Nord-Est et 20,00% pour la source Locale en Juin ;
- Nord-Ouest avec 29,03% contre 25,81% pour l'Ouest et le Nord-Est et 12,90% pour le Sud en Juillet ;
- Ouest avec 48,39% contre 22,58% pour le Sud et la source Locale durant Août ;
- Ouest avec 43,33% contre 40,00% pour le Sud durant le mois de Septembre ;
- Sud avec 45,16% contre 29,03% pour le Nord-Est et 19,35% pour le Nord-Ouest pour le mois d'Octobre ;
- Sud avec 60,00% contre 30,00% pour l'Ouest durant le mois de Novembre ;
- Nord-Ouest avec 48,39% suivie par l'Ouest avec 29,03% et le Sud avec 16,13% en Décembre ;
- Nord-Ouest avec 41,94% contre 32,26% pour le Sud et 12,90% pour le Nord-Est en Janvier ;
- Nord-Ouest avec 64,29% contre 10,71% pour l'Ouest et le Sud en Février ;
- Nord-Ouest avec 54,84% contre 22,58% pour le Sud et 12,90% pour le Nord-Est durant le mois de Mars ;
- Sud avec 40,00% suivie par le Nord-Ouest avec 23,33%, l'Ouest et le Nord-Est avec 16,67% pour le mois d'Avril ;
- Locale avec 29,03% suivie par le Nord-Est et le Nord-Ouest avec 22,58% et le Sud avec 16,13% pour le mois de Mai.

Les directions des vents prédominantes durant les douze mois de Juin 2014 à Mai 2015 sont de : Sud (29,32%), Nord-Ouest (27,53%), Ouest (20,27%) et Nord-Est (13,62%).

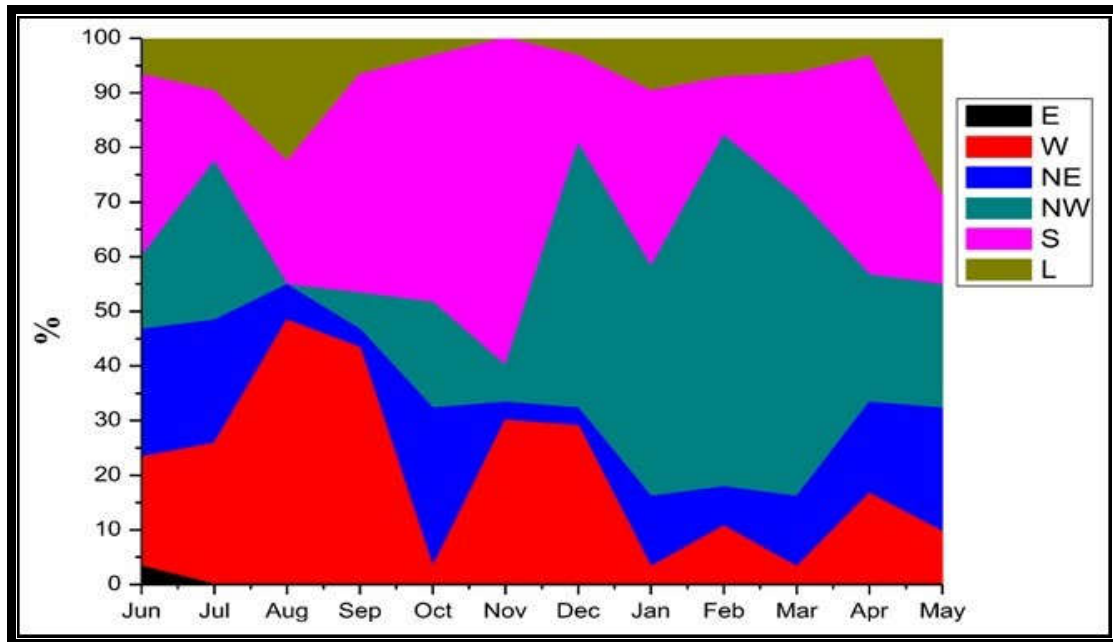


Fig. 34. Carte des vents de l'année de mesure

Cette étude statistique des sources des vents a permis d'élaborer plusieurs cartes qui seront utilisées dans l'interprétation de la suite des résultats de cette étude et peuvent également être utilisées dans d'autres études telles que les gisements en énergie éolienne et d'autres domaines agricoles dans la région de Tipaza, l'Ouest de la Wilaya d'Alger et l'Est de la Wilaya de Chlef, vu que ces cartes sont régionales.

III.1.2. Étude du black carbon à Bouzaréah

Dans cette partie, nous allons étudier l'évolution des niveaux de BC mesuré à Bouzaréah durant une année du 01/06/2014 au 31/05/2015.

Ce suivi en continu des variations de BC, BC_{ff} et BC_{wb} nous a permis d'interpréter les pics de pollution dus aux heures de pointe, et ceux liés au trafic routier, feux de forêts, industrie pétrolière, fêtes religieuses, nationales et sportives ainsi que la pollution venant d'Europe ou des pays voisins (MERABET et al., 2019).

a. Variabilité des concentrations du black carbon

Nous illustrons en figure 35 l'évolution des teneurs atmosphérique en BC mesurées instantanément à l'observatoire scientifique de Bouzaréah du 01/06/2014 au 31/05/2015, ainsi que les BC_{ff} (de source fossile) et BC_{wb} (de la combustion de biomasse) calculés.

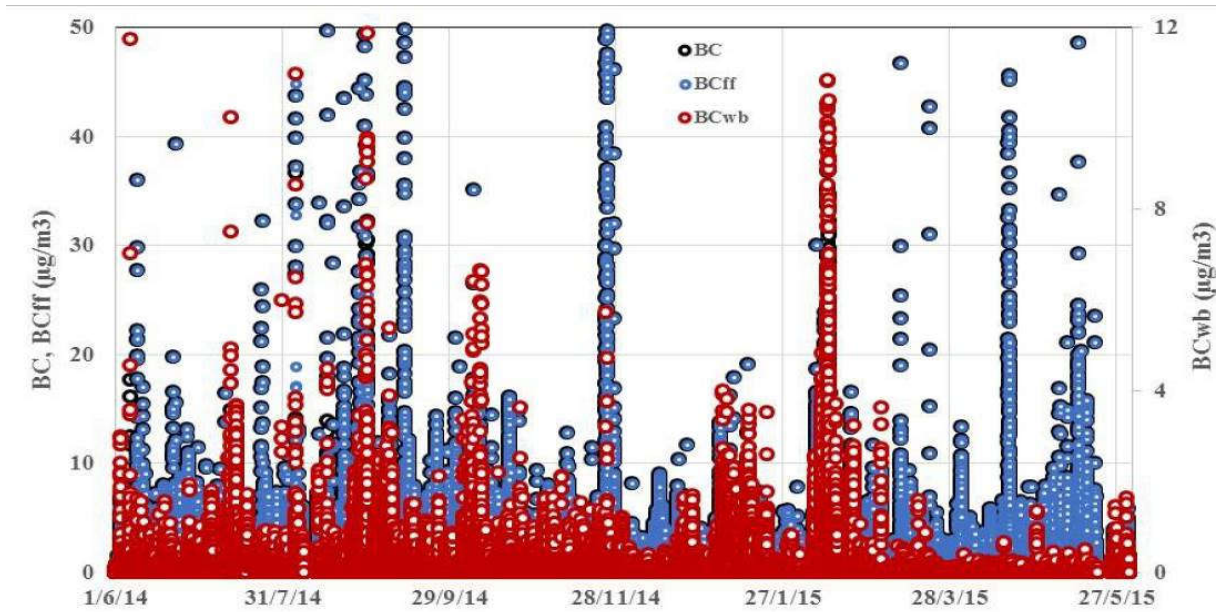


Fig. 35. Variation des concentrations du BC, BC_{ff} et BC_{wb} sur une année de mesure

Pour plus de visibilité, il serait intéressant de donner aussi ici un graphe des moyennes journalières (on aura seulement les quelques 300 valeurs si on tient compte des vides) du BC, BC_{ff} et BC_{wb}.

La figure 36 donne l'évolution des moyennes journalières de BC. Le tableau 1 résume les teneurs annuelles, teneurs journalières moyennes et les teneurs extrêmes des trois types de back carbon.

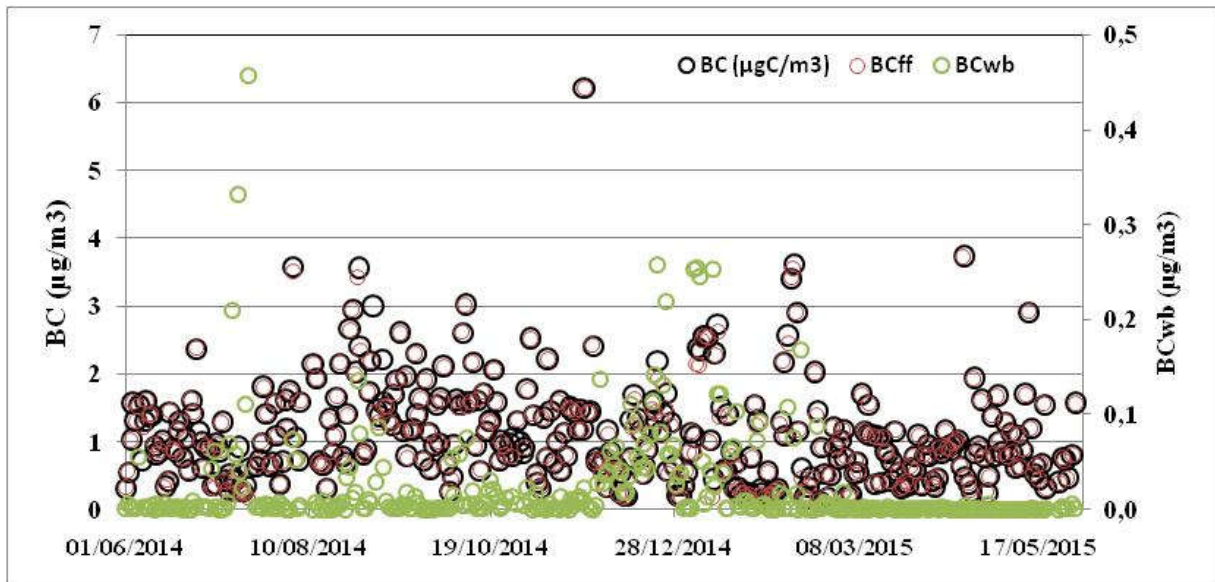


Fig. 36. Variation des concentrations journalières du BC, BC_{ff} et BC_{wb} sur une année de mesure

Les résultats obtenus montrent que les niveaux des concentrations annuelles des BC et BC_{ff} sont, généralement, inférieurs à 15,000 µg/m³, avec quelques pics atteignant 50 µg/m³. Toutefois, les valeurs de BC_{wb} étaient, principalement, inférieures à 5,000 µg/m³, avec quelques pics excédant 10,000 µg/m³. Les moyennes annuelles de BC, BC_{ff} et BC_{wb} sont, respectivement, de 1,113; 1,097 et 0,016 µg/m³.

L'évolution des moyennes journalières du BC (figure 37) montre que les teneurs varient dans un large interval de 0,128 à 6,323 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette large variation est due naturellement aux variations dans les activités humaines, à l'influence des facteurs météorologiques ainsi qu'au transport des polluants sur de longues distances.

Comme illustré en figure 37, le BC_{ff} représente la fraction la plus importante du BC, soit 95,60 %. La fraction BC_{wb} est très faible et ne représente que 4,40 % du BC. Ce résultat révèle que la principale source de BC en Algérie correspond aux combustibles fossiles (activités pétrolières et gazières et parc routier local et Européen), comparativement aux feux de forêts et le cooking. Le tableau 1 montre que 95% des teneurs en BC, BC_{ff} et BC_{wb} sont respectivement de 3,279 ; 3,199 et 0,296 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui représente le triple de la moyenne annuelle.

Tableau 1. Teneurs annuelles, journalières moyennes et extrêmes des trois types de black carbon à Bouzaréah

	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC_{ff} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC_{wb} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\text{BC}_{\text{ff}}/\text{BC}$
Teneur annuelle moyenne	1,113	1,064	0,049	95,60%
Teneur journalière moyenne	1,113	1,084	0,029	97,44%
PC95	3,279	3,199	0,296	100%
Teneur maximale	327,16	327,16	53,80	100%
Teneur journalière maximale	6,232	6,209	0,457	100%
Ecart-type	2,030	2,002	0,262	98,62%

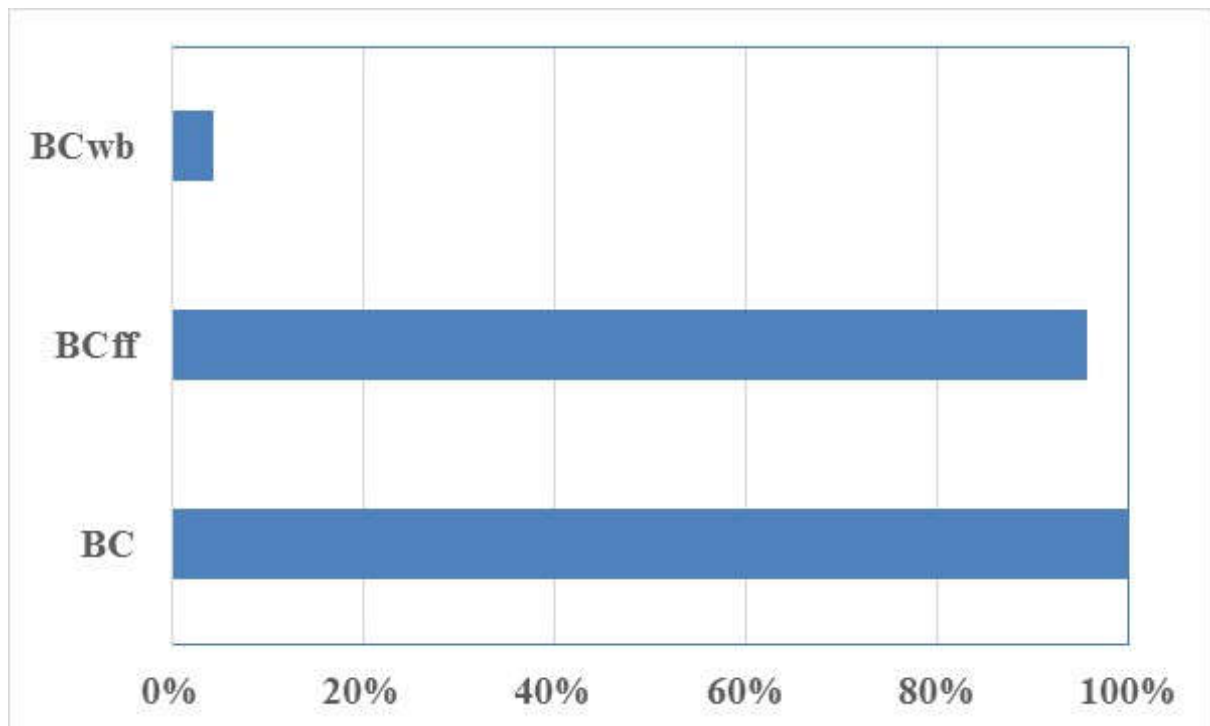


Fig. 37. Fraction de BC_{ff} et BC_{wb} dans le Black carbon

Il est certain que la majeure partie de cette pollution provient des émissions du trafic routier. A Alger, le parc automobile représente 26,32% du parc national avec 1 689 242 de véhicules immatriculés à la fin de 2018, dont 66,56% de type essence et 33,44% en diesel (ONS, 2018).

De plus, environ 1 000 000 de véhicules viennent à Alger en plus de 1 200 000 qui y circulent par jour (Mohamed BELAMRI et Khaled BENRACHEDI, 2010). A l'échelle nationale, le parc automobile recensé en 2018 par l'ONS a atteint 6 418 212 véhicules, dont 252 798 neufs, avec 65,04% utilisant l'essence et 34,96% diésélisés. Ce taux élevé de véhicules diésélisés constitue probablement la source majoritaire de BC venant de la combustion de carburants fossiles. Les activités pétrolières et gazières en Algérie sont également une source importante d'émission de BC. Les activités humaines (industries, combustion de déchets et foyers) quant-à-elles, génèrent également, du BC. La population algérienne a atteint 43 millions d'habitants le 31/12/2018 (ONS, 2018). Pour ce qui concerne la ville d'Alger, elle comptait 3 154 792 habitants en 2015⁴. A ce nombre vient s'ajouter toute la population qui rentre chaque jour sur Alger à partir des Wilaya limitrophes. Ce point relatif aux sources de BC sera détaillé dans la suite du présent chapitre.

Les pics journaliers de BC, dépassant $5,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, et très supérieurs à la moyenne annuelle, peuvent être dus aux feux de forêts ou à une source locale ou régionale (chauffage au bois et au charbon), ce qui peut se vérifier avec la moyenne en BC_{wb} de la journée du 29 Août 2014, où elle a atteint entre 2AM et 9AM la valeur de $0,450 \mu\text{g}/\text{m}^3$. D'autres pics en BC_{wb} ont été enregistrés le 04 Août 2014, avec une moyenne de $0,180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 4AM et minuit et le 7 Septembre 2014 avec $0,055 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 0AM et 3PM.

b. Comparaison avec d'autres pays

La comparaison des teneurs mesurées en site semi-urbain de Bouzaréah avec celles enregistrées dans d'autres sites à travers plusieurs pays, montre que les teneurs observées à Bouzaréah sont du même ordre de grandeur que celles relevées dans certains pays et demeurent relativement plus faibles que celles observées dans de grands sites urbains tels qu'en Chine.

En effet, Reche et al., (2011), ont enregistré des moyennes annuelles de BC en 2009 variant entre $1,700$ et $1,900 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Barcelone (Espagne) sur un site de fond urbain, à Lugano (Suisse) et Londres (Angleterre) à North Kensington sur un site de fond urbain. Les moyennes de BC rapportées au niveau des zones côtières en Europe étaient de $0,600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans la mer Baltique et $\sim 0,700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en méditerranée (Bycenkiene et al., 2011).

La moyenne mensuelle de BC dans un site semi-urbain à Toulon (France) varie de $\sim 0,100$ à $\sim 2,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec une moyenne de $0,950 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Saha and Despiau 2009). La moyenne annuelle de BC mesurée sur un site semi-urbain à Prague (Tchéquie) était de $1,710 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Vodička, 2013). En site semi-urbain en Chine (Pékin, Wenjiang et Tianjin), les teneurs s'élèvent respectivement à $2,890 \pm 1,620$; $6,296$ et $8,150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ selon les travaux de Zhuang et al., (2014). Jose et al., (2016) ont enregistré des moyennes de BC sur un site urbain à Hyderabad (Inde) avec un maximum de $\sim 15,950 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durant le mois de Mars, et un minimum en Juin ($\sim 9,840 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Reddy et al., (2012) ont observé des moyennes de BC de $3,030 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans un site semi-aride à Anantapur (Inde). Une moyenne élevée de BC a été observée à Marylebone (Londres) et Berne (Suisse) sur deux sites de trafic urbain, atteignant, respectivement, $7,800$ et $3,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

⁴ (<http://www.wilaya-alger.dz/fr/wilaya/>).

Toutefois, une faible moyenne de BC a été enregistrée sur deux sites en Espagne à Huelva (site de fond urbain influencé par les émissions industrielles) et Santa Cruz de Tenerife (site de fond urbain influencé par les émissions des navires et l'industrie), avec, respectivement, 0,700 et 0,800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Reche et al., 2011).

La moyenne annuelle de BC obtenue sur un site urbain en Finlande, était de 0,890 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Saarikoski et al., 2008). La moyenne de BC enregistrée sur quatre sites urbains en Chine était de 9,480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, beaucoup plus élevée que pour d'autres régions du monde ; 1,380 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à New York (Venkatachari et al., 2006) et 3,400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Mexico (Salcedo et al., 2006). Le niveau de BC mesuré sur un site rural à Hong Kong (Chine) était de 2,400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Cheng et al., 2006) et de 2,370 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Pékin (Zhou et al., 2009).

En Islande, les concentrations de BC dans un site semi-urbain sont de l'ordre de 0,270 à 0,650 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Bhugwant et al., 2000). Les concentrations de BC enregistrées à Séoul (Corée du Sud) se situent entre 7,000 et 8,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, contre 4,408 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Chongju (Panicker et al., 2013). Dans un site semi-urbain à Pittsburgh (USA), les valeurs de BC enregistrées varient de 0,50 à 9,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec une moyenne de 2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Allen et al., 1999). Une moyenne journalière de BC élevée ($> 1,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$) est, généralement, observée durant l'hiver (Novembre à février). Cependant, de faibles concentrations sont obtenues durant le printemps, et l'été entre Avril et Août (Saha and Despiau, 2009).

c. Variation hebdomadaire - Effet du week-end

La figure 38 présente la variation des teneurs moyennes en BC, BC_{ff} et BC_{wb} selon les jours de la semaine de l'année de mesure.

Il a été observé que les moyennes annuelles des jours de la semaine en BC, BC_{ff} et BC_{wb} sont proches et varient respectivement de 1,000 ; 0,950 et 0,050 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à 1,193 ; 1,176 et 0,017 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces résultats peuvent révéler la même source en BC, BC_{ff} et BC_{wb} indépendamment du week-end en Algérie.

Nous avons observé que la moyenne en BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant les jours de travail étaient de 1,118 ; 1,088 et 0,030 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cependant, durant les week-ends, les moyennes étaient de 1,076 ; 1,053 et 0,023 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui montre une diminution de 3,76% de la pollution en BC, et de 3,22% en BC_{ff} contre 23,33% pour le BC_{wb} , due à la diminution du trafic routier et des activités humaines (industries). Ce constat a été aussi mis en évidence dans d'autres études (Krecl, 2011).

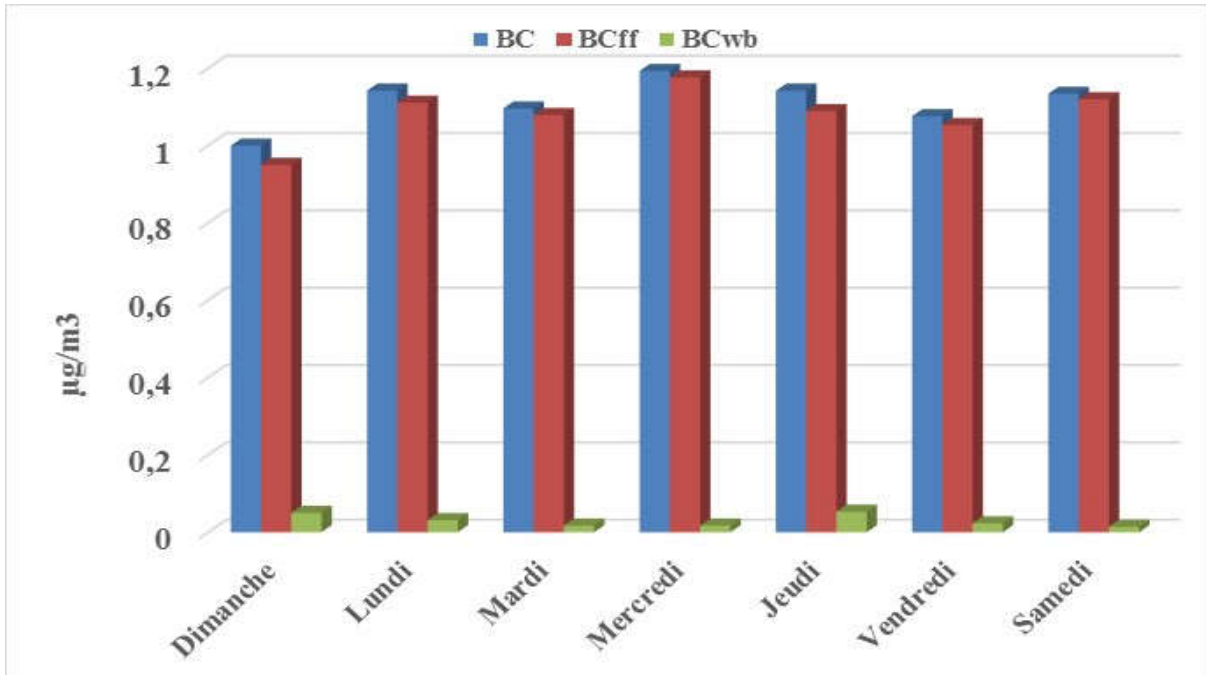


Fig. 38. Teneurs moyennes en BC, BC_{ff} et BC_{wb} des jours de la semaine durant l'année de mesure

d. Variabilité mensuelle du BC

La figure 39 illustre l'évolution des teneurs moyennes mensuelles de BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant l'année de mesure. Les teneurs en BC et BC_{ff} sont, généralement, très proches et varient entre 0.750 µg/m³ en juillet et 1.556 µg/m³ en mois d'Août. La variation de ces concentrations dépend du trafic routier, des activités industrielles, du chauffage et des feux de forêts. Cette relation entre les sources d'émission et les concentrations mesurées sera étudiée dans la suite de ce travail. Les teneurs moyennes mensuelles en BC_{wb} étaient très faibles avec un maximum enregistré en décembre, qui peut être dû au chauffage dans les pays voisins et européens.

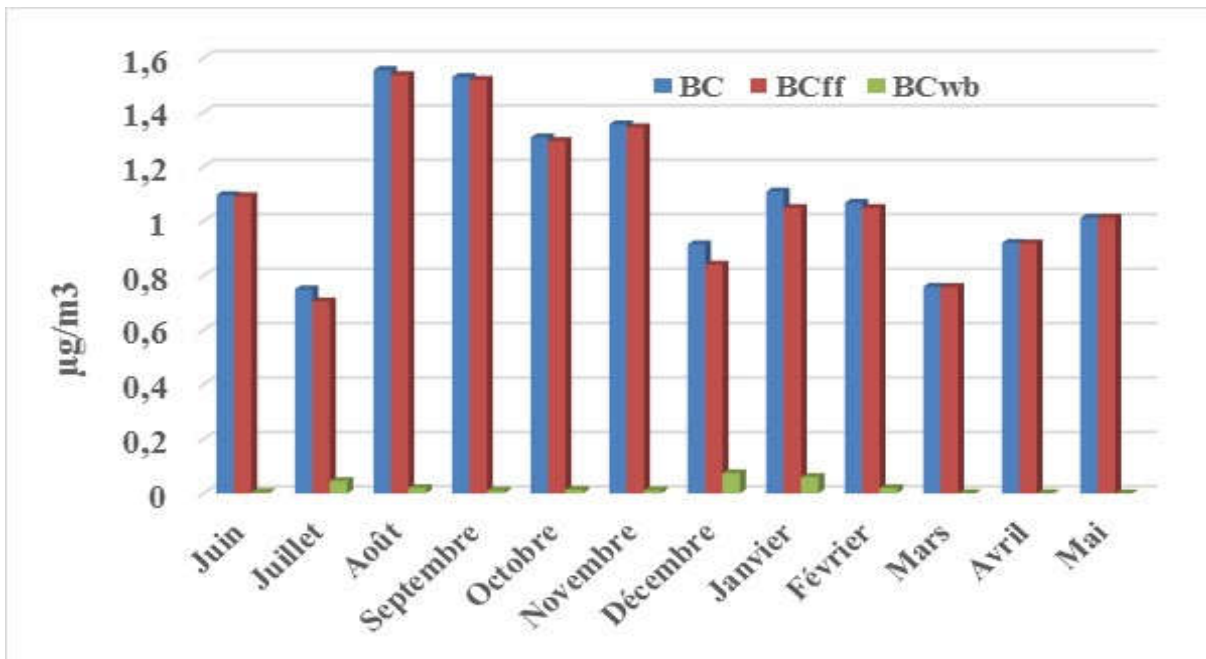


Fig. 39. Teneurs moyennes en BC, BC_{ff} et BC_{wb} des jours de la semaine durant l'année de mesure

Ci-après, nous discutons les teneurs mesurées durant quelques mois de l'année étudiés et présentant certaines particularités (Origine lointaine de la pollution, influence des feux de forêts, etc.). La discussion des autres mois est présentée en Annexe 3.

❖ Evolution en Juillet 2014 :

La figure 40 illustre l'évolution des concentrations instantannées en BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de juillet 2014 qui a enregistré les moyennes mensuelles les plus faibles (0,750 ; 0,705 et 0.045 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), respectivement.

Nous remarquons que les niveaux de BC et BC_{ff} sont, généralement, inférieurs à 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec un maximum de 18,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; par contre, ceux de BC_{wb} sont inférieurs à 2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, excepté quelques pics excédant 4,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

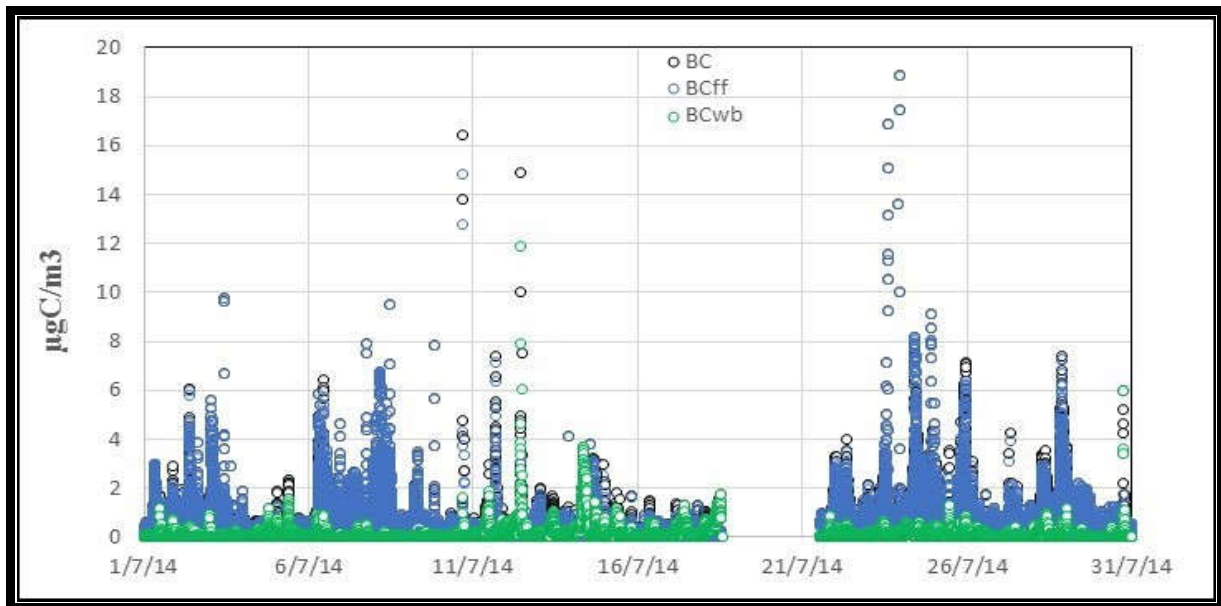


Fig. 40. Variation des concentrations du BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Juillet 2014

La journée du 24 Juillet a été la plus polluée avec des moyennes de BC et BC_{ff} de 1,800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (la source de BC est à 100% due aux combustibles fossiles), ce qui s'explique par les vents venant du sud. Nous avons remarqué une moyenne journalière élevée de BC_{wb} durant la journée du 18 Juillet, atteignant 0,460 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et une moyenne de 0,830 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 9 :00AM et 1PM. Ces niveaux élevés de BC_{wb} sont dus aux nombreux feux de forêts enregistrés dans la région de Bejaia, entre le 14 et le 18 Juillet 2014, comme montré sur la figure 41.

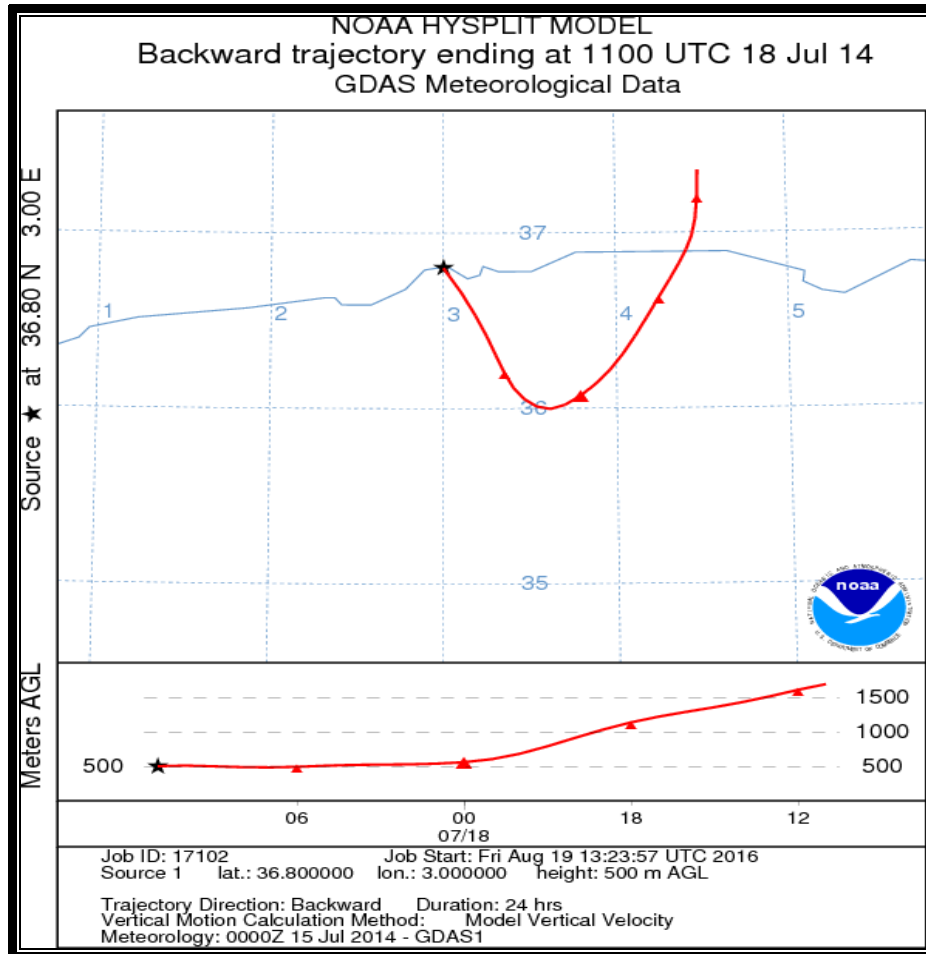


Fig. 41. Rétro-trajectoires des masses d'air du 18 Juillet 2014

❖ Evolution en Août 2014 :

Comme illustré en figure 42, les niveaux en BC et BC_{ff} sont au mois d'août, généralement, inférieurs à 5,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui est dû à la période des vacances, avec une exception entre le 26 et le 31 Août, où, les moyennes des BC et BC_{ff} étaient de 2,400 et 2,350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement, avec des pics atteignant 50,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

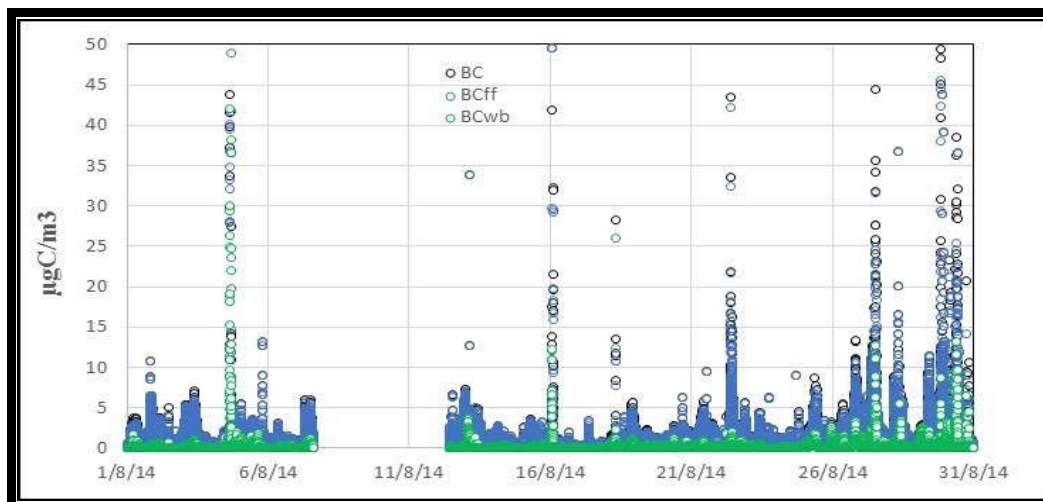


Fig. 42. Variation des concentrations du BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois d' Août 2014

Durant la journée du 4 Août, nous avons observé des pics élevés de BC_{wb} , avec une moyenne de $1,130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 4PM et 5PM, qui peuvent être dus aux feux de forêt enregistrés dans la région de Bouia le 4 Août 2014, ce qui est confirmé par la figure 43. Durant la même journée, nous avons enregistré une moyenne élevée de BC_{ff} entre 4PM et 5PM, atteignant $22,260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, imputable à la pollution de la baie d'Alger par les navires, comme montré sur la figure 43.

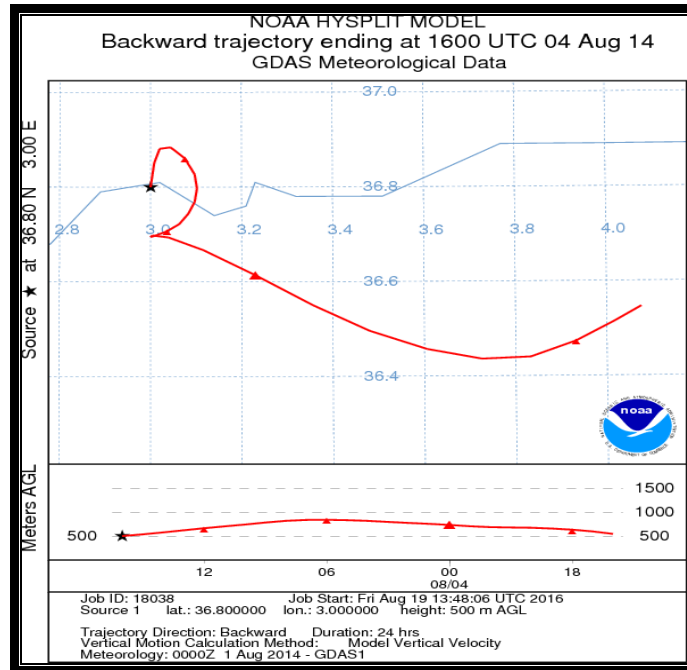


Fig. 43. Rétrotrajectoires des masses d'air du 4 Août 2014

❖ Evolution en Novembre 2014 :

La figure 44 illustre les variations des concentrations des BC , BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Novembre 2014. Nous avons enregistré des niveaux des BC et BC_{ff} , généralement, inférieurs à $5,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Toutefois, les niveaux de BC_{wb} étaient en grande partie inférieurs à $2,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La journée du 24 Novembre était la plus polluée avec des pics atteignant $50,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et une moyenne de $6,232 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC et $6,209 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC_{ff} , dus aux masses d'air venant du Sud du pays (figure 45). Nous avons enregistré de faibles niveaux de BC_{wb} durant tout le mois, ce qui s'explique par la rareté des feux de forêts durant le mois de Novembre.

La journée la plus propre était celle du 7 Novembre, avec de faibles moyennes en BC , BC_{ff} et BC_{wb} de $0,329$, $0,326$ et $0,003 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement, ceci est dû aux moyennes élevées des vitesses de vents durant cette journée atteignant $6,24 \text{ m/s}$.

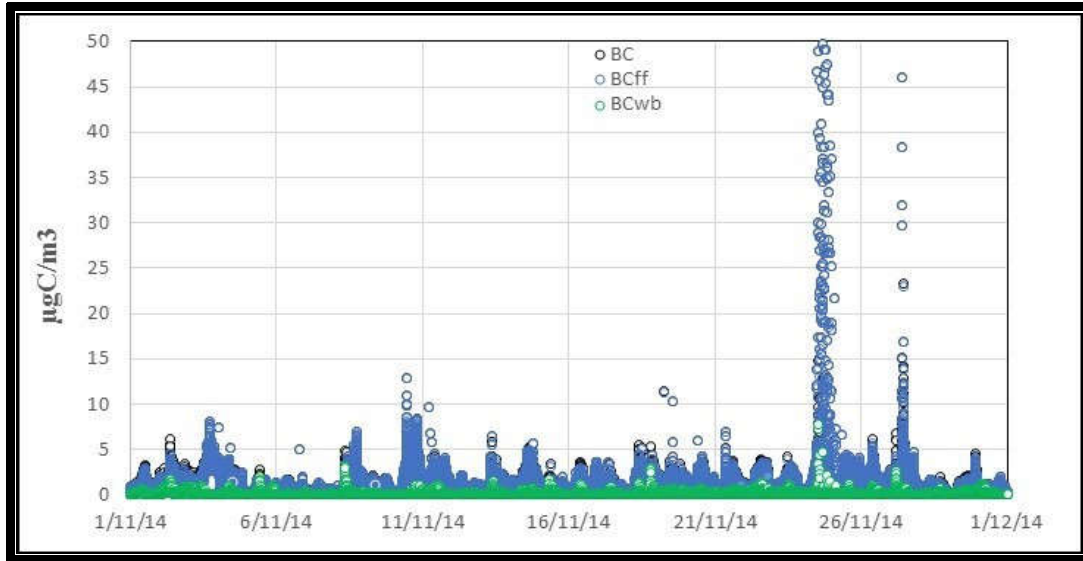


Fig. 44. Variation des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Novembre 2014

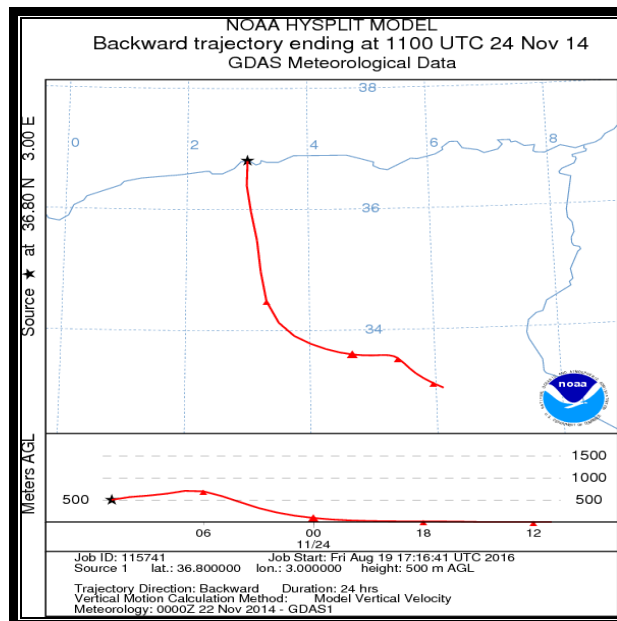


Fig. 45. Rétrotrajectoires des masses d'air du 24 Novembre 2014

❖ Evolution en Décembre 2014 :

La figure 46 illustre l'évolution des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Décembre 2014. Les niveaux des BC et BC_{ff} étaient, généralement, inférieurs à 4,000 µg/m³, excepté quelques pics qui ont atteint 12,000 µg/m³.

Les concentrations de BC_{wb} étaient en grande partie inférieures à 1,000 µg/m³, ce qui peut s'expliquer, d'une part, par la rareté des feux de forêts durant ce mois et, d'autre part, par le chauffage au gaz naturel, contrairement aux pays Européens utilisant le charbon et le bois.

La journée du 22 Décembre était la plus polluée avec des moyennes des BC, BC_{ff} et BC_{wb} de 2,198, 1,941 et 0,258 µg/m³, respectivement, ce qui peut être dû aux sorties des citoyens durant la première semaine des vacances d'hiver. Nous remarquons une diminution des niveaux des BC, BC_{ff} et BC_{wb} à partir du 23 Décembre jusqu'à la fin du mois, ce qui est expliqué par la diminution de la circulation durant la moitié des vacances.

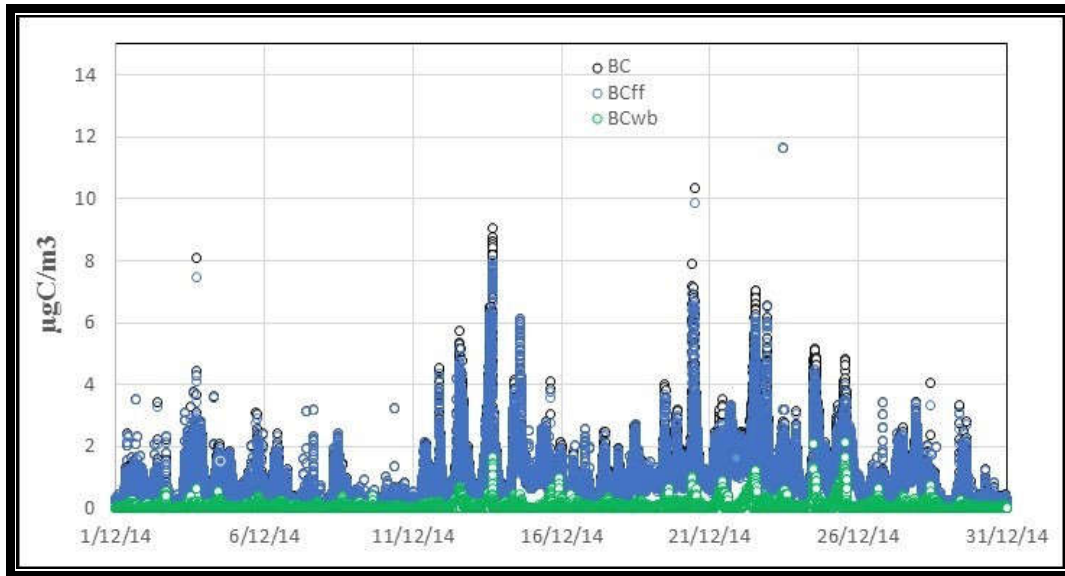


Fig. 46. Variation des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Décembre 2014

❖ Evolution en mars 2015 :

Les variations des concentrations de BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Mars 2015 sont présentées à la figure 47. Nous remarquons que les niveaux des trois polluants sont, généralement, inférieurs à 5,000 µg/m³, avec quelques pics excédant 10,000 µg/m³.

La journée du 10 Mars a enregistré la moyenne journalière la plus élevée en BC soit 1,699 µg/m³ et un taux de 100% en BC_{ff}, donc, une absence totale de BC_{wb} durant toute la journée.

Nous avons remarqué une moyenne élevée des BC et BC_{ff} durant la journée du 10 Mars entre 9PM et 10PM, atteignant 2,558 µg/m³ pour les deux polluants, ceci est dû aux vents venant d'Europe (Croatie et Italie) comme le montre la figure 48.

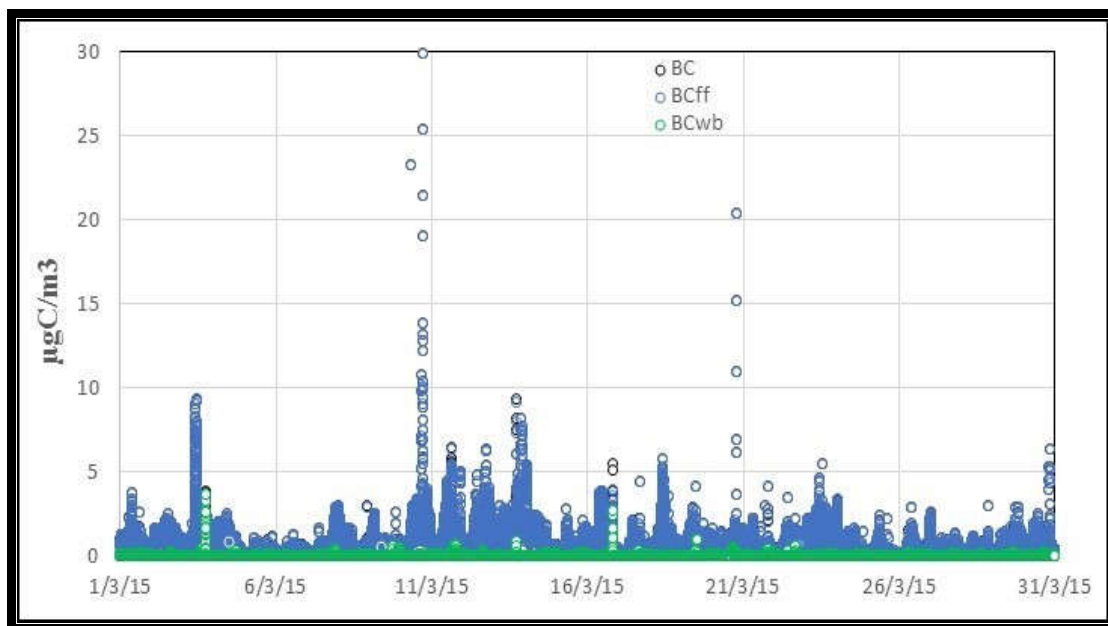


Fig. 47. Variation des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Mars 2015

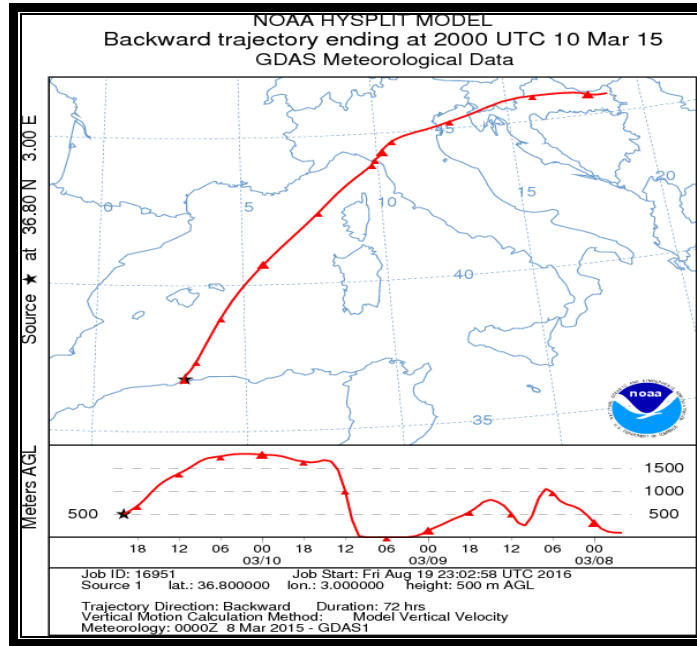


Fig. 48. Rétrotrajectoires des masses d'air du 10 March 2015

❖ Evolution en Avril 2015 :

La figure 49, présente la variation des niveaux des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois d'Avril 2015. Nous observons de faibles niveaux de BC et BC_{ff}, généralement, inférieurs à 3,000 µg/m³, avec quelques pics dépassant 10,000 µg/m³. Toutefois, la majorité des concentrations de BC_{wb} sont inférieures à 1,000 µg/m³, excepté deux pics supérieurs à 1,000 µg/m³, enregistrés le 28 Avril, suite à l'absence de feux des forêts durant ce mois.

La journée du 18 Avril était la plus polluée, avec un pic atteignant 30,000 µg/m³ et une moyenne journalière de 3,731 µg/m³ pour le BC et le BC_{ff}. Nous avons enregistré des moyennes élevées des BC et BC_{ff} durant la même journée entre 5PM et 6:30PM, qui ont atteint 11,148 µg/m³, et qui peuvent être dues aux masses d'air pollué qui tournent dans le Sud de la Méditerranée (figure 50).

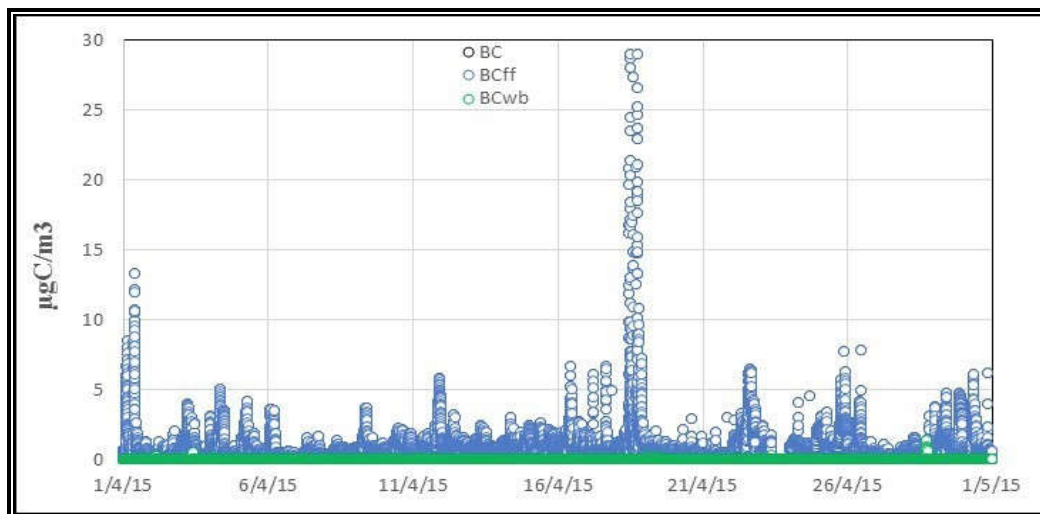


Fig. 49. Variation des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois d'Avril 2015

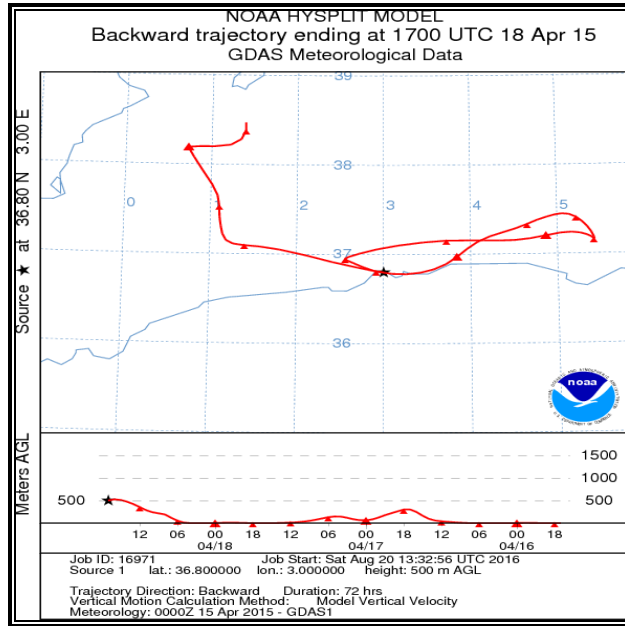


Fig. 50. Rétro trajectoires des masses d'air du 18 Avril 2015

e. Variabilité saisonnière du BC

La comparaison des moyennes des BC, BC_{ff} et BC_{wb}, durant les quatre saisons de l'année de mesure, est présentée à la figure 51.

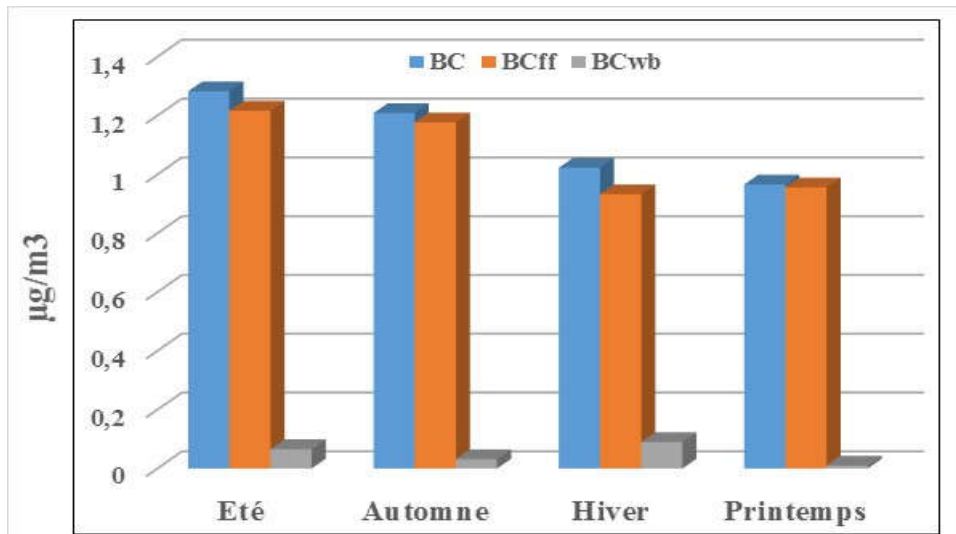


Fig. 51. Comparaison saisonnière des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb}

La comparaison saisonnière montre que les teneurs moyennes du BC et BC_{ff} les plus élevées sont observées en saison estivale, avec, respectivement, 1,283 et 1,259 µg/m³. La teneur moyenne en BC_{wb} de 0,024 µg/m³ est cependant supérieure à la moyenne annuelle de BC_{wb}, imputable aux nombreux feux de forêts enregistrés durant cette saison. Les teneurs de la saison d'automne sont légèrement inférieures aux teneurs estivales. On y enregistre des moyennes de 1,290 µg/m³ pour le BC et 1,200 µg/m³ pour le BC_{ff}. Pour le cas du BC_{wb}, la moyenne était très faible (0,009 µg/m³), en raison de l'absence des feux de forêts durant cette saison. En hiver, les moyennes des BC et BC_{ff} sont plus faibles qu'en été et automne.

Pour le BC_{wb} c'est cependant, la saison d'hiver qui accuse la teneur la plus élevée des quatre saisons ($0,280 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Cela s'explique par les masses d'air venant d'Europe avec des niveaux élevés en BC_{wb} issu du chauffage au bois. Les moyennes des BC , BC_{ff} et BC_{wb} , au printemps étaient les plus faibles avec, respectivement, $0,907$, $0,906$ et $0,001 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui s'explique par le lessivage du ciel par la pluie et puis, la dispersion de la pollution par les vents dominants durant ces saisons : $4,32 \text{ m/s}$ en hiver, $4,27 \text{ m/s}$ au printemps, $3,17 \text{ m/s}$ en été et $4,09 \text{ m/s}$ en automne.

Cette variation d'une saison à un autre est assez importante, le rapport du BC entre l'hiver et l'été est de $0,80$, contre $0,77$ pour le BC_{ff} et $1,36$ pour le BC_{wb} .

Dans d'autres pays, l'évolution saisonnière est différente. La moyenne de BC , mesuré à Prague (Tchéquie), sur un site semi-urbain, était de $1,260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au printemps, $0,870 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en été, $2,060 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en automne et $2,660 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en hiver (Vodička, 2013).

De Miranda et al., (2010), ont enregistré des moyennes de BC variant entre $2,300$ et $4,100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en été et entre $4,000$ et $13,100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en hiver dans six grandes villes du Brésil. Durant le printemps 2006, Krecl et al., (2011), ont observé durant le printemps 2006 des moyennes de concentration de BC allant de $0,360 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur un site rural, à $5,390 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur une route du canyon à Stockholm (Suède). Laborde et al., (2013), ont obtenu une moyenne de BC de $0,900 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur un site semi-urbain à Paris (France), entre janvier et février. Wu et al., (2013), ont observé des moyennes journalières de BC situées entre $0,280$ et $2,140 \mu\text{g}/\text{m}^3$, avec de faibles niveaux ($0,670 \mu\text{g}/\text{m}^3$) durant la saison sèche, et $0,540 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durant la saison pluvieuse, sur un site océanique au sud de la Chine.

Au Caire (Egypte), par contre, on retrouve la même situation qu'à Alger : les moyennes de BC mesuré en automne 2004 et au printemps 2005, étaient, respectivement, de $9,900$ et $6,900 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Mahmoud et al., 2008).

f. Variabilité des moyennes du jour, de la nuit et des heures de pointe

Les moyennes des BC , BC_{ff} et BC_{wb} durant le jour, la nuit et les heures de pointe sont présentées à la figure 52. Durant le jour, le printemps est la saison la plus polluée par les BC et BC_{ff} , avec des concentrations moyennes atteignant $1,427 \pm 1,045$ et $1,405 \pm 1,043 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement, suivie par l'été avec des concentrations de $1,320 \pm 0,958$ pour le BC et $1,241 \pm 1,504 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC_{ff} . Ces fortes concentrations en BC , avec des teneurs élevées en BC_{ff} atteignant $98,46\%$ au printemps peuvent s'expliquer, d'une part, par la diminution des pluies, et, d'autre part, par la venue des vents du sud, chargés en BC_{ff} émis par l'industrie pétrolière et ceux vents venant d'Europe. En été, le taux en BC_{ff} était bas ($94,00\%$), du fait que les feux de forêts émettent du BC_{wb} . Les plus faibles moyennes en BC et BC_{ff} ont été enregistrées en hiver avec $0,985 \pm 1,409$ et $0,982 \pm 1,401 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement, ce qui peut s'expliquer à la fois par le lessivage humide par les pluies et aussi la dispersion due aux vents.

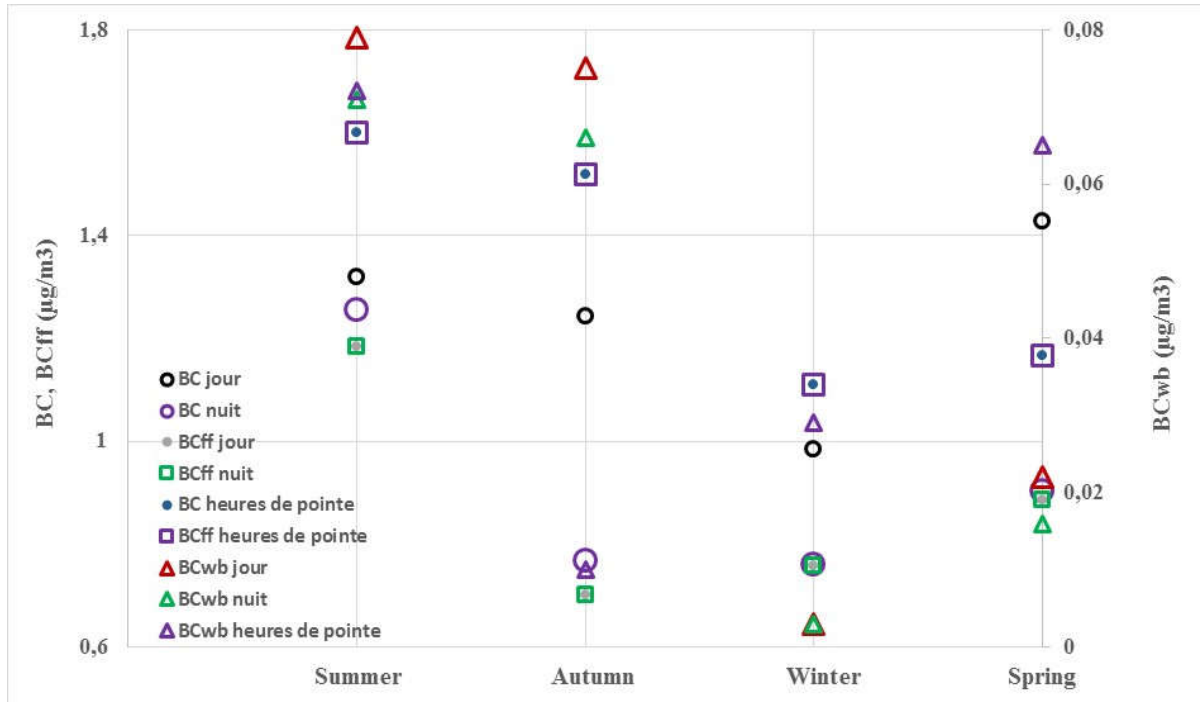


Fig. 52. Moyenne du BC, BC_{ff} et BC_{wb} pendant le jour, la nuit et les heures de pointe

Durant la nuit, c'est l'été qui accuse les teneurs nocturnes les plus élevés en BC et le BC_{ff}. On y mesure des teneurs moyennes de $1,254 \pm 1,306$ et $1,183 \pm 1,306 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement, suivie du printemps avec $0,902 \pm 0,779$ et $0,886 \pm 0,781 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces teneurs élevées sont dues à l'importance du parc automobile circulant tard en été et au printemps, contrairement à l'automne et l'hiver. Il est à noter qu'un grand nombre d'industries algériennes fonctionnent 24/24, induisant une augmentation des émissions en BC_{ff} par leurs engins et machinerie.

Pour le cas du BC_{wb} nocturne, des moyennes élevées ont été enregistrées en été et automne avec $0,071 \pm 0,571$ et $0,066 \pm 0,028 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement, imputables aux feux de forêts en été et à la combustion du bois de chauffage en Europe en automne, coïncidant avec une rareté des pluies en Algérie. Les moyennes les plus basses en BC_{wb} ont été obtenues au printemps avec $0,003 \pm 0,194 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en raison d'un lessivage humide et la dispersion par les vents. Puisqu'en Algérie la source d'énergie de chauffage et le cooking est le gaz naturel, le BC_{wb} mesuré dans la présente étude peut être dû à des sources d'émission transfrontalières (principalement d'Europe) et aux feux de forêts en été (en Algérie et Europe). Les concentrations en BC_{wb} durant le jour étant élevées, spécialement en été, automne et printemps, ce qui peut s'expliquer par les feux de forêts, plus fréquents en Algérie pendant la journée que durant la nuit, ainsi qu'à la faible utilisation du chauffage par le bois en Europe, durant l'automne et le printemps. Par contre, en hiver, les teneurs en BC_{wb} enregistrées à Alger sont similaires le jour et la nuit, en raison d'une pollution élevée venant d'Europe avec de forts taux de BC_{wb}, émis par le charbon et le bois utilisés de jours comme de nuits (24 h).

Pour ce qui est des moyennes en BC et BC_{ff} durant les heures de pointe (07:00 et 10:00), l'été et l'automne étant les plus pollués avec $1,672 \pm 1,297$ et $1,528 \pm 1,167 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC et $1,600 \pm 1,327$ et $1,518 \pm 1,171 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC_{ff}, respectivement. Ces concentrations supérieures à la moyenne annuelle, sont expliquées par le comportement des citoyens pendant les heures de pointe, où ils rejoignent les lieux de travail et les écoles à la même heure.

g. Variabilité diurne du BC

La figure 53 présente les variations diurnes des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant l'année de mesure. La variation diurne des concentrations dépend de l'effet combiné des variations des émissions anthropogéniques, la météorologie de surface et la dynamique de la couche limite atmosphérique (Ramachandran and Rajesh, 2007 ; Dumka et al., 2013). Targino et al., (2016), ont remarqué que le trafic routier local était de loin la plus importante source de BC dans les routes des gorges, dans une ville de taille moyenne au Sud du Brésil, avec une moyenne horaire de 5,840 µg/m³ à 7AM et 4,550 µg/m³ à 6PM (heures de pointe).

Le graphe du cycle diurne montre que le BC est faible durant la nuit de l'ordre de 0,8 µg/m³ et commence à augmenter vers 6h du matin pour atteindre un maximum entre 8h et 9h du matin. Ce maximum correspond à l'heure de pointe matinale où le flux du trafic routier est maximal. En milieu de journée et l'après midi, il y a une baisse notable des teneurs en BC.

Pour le BC_{ff} qui constitue plus de 95% du BC, on observe la même évolution. Cette évolution est similaire à celle qu'on observe généralement pour d'autres polluants issus du trafic routier tels que le NO et les hydrocarbures.

Dans le cas du BC_{wb}, l'allure diurne diffère de celle du BC, en ce sens qu'en milieu de journée, les teneurs sont très faibles et augmentent sensiblement la matinée (deux pics à 8AM et 9AM atteignant, respectivement, 0,079 et 0,059 µg/m³), en début de soirée et durant la nuit. Cette situation du BC_{wb} s'explique par les activités de cooking. Une autre raison de l'augmentation des niveaux de BC durant la matinée (entre 6AM et 8AM), est l'effet de fumigation de la couche atmosphérique limite (Gegam et al., 2016).

La chaleur du soleil augmente l'effet de turbulence et entraîne une profonde couche limite, ce qui conduit à une dispersion rapide des aérosols et la dilution des concentrations de BC survenant près de la surface (Saha and Despiou, 2009). Les pics de BC dans les endroits continentaux sont associés à l'effet de fumigation dans la couche limite ainsi qu'à l'aube local (Stull, 1988).

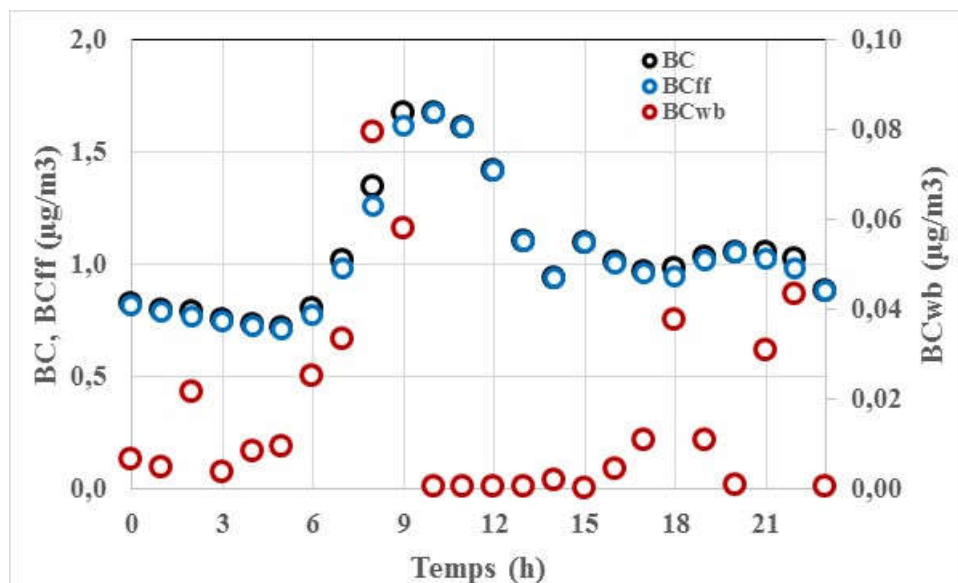


Fig. 53. Cycle diurne moyen des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant l'année de mesures

h. Moyennes horaire-mensuelles en BC durant l'année de mesure

La figure 54 présente les variations horaires mensuelles du BC durant l'année de mesure, tels que réalisés par Hooda et al., (2018). La figure présente clairement la variation des moyennes horaires en BC pendant les douze mois de mesure et complète les interprétations précédentes. Il est clair que les pics horaires en BC sont observés en été et durant les heures de pointe. Les concentrations en BC durant le jour sont plus élevées au printemps, ce qui est en adéquation avec les résultats précédents. La figure 54 est une synthèse de tout ce qui a été présenté précédemment avec une information plus simple à exploiter par les statisticiens et les épidémiologues.

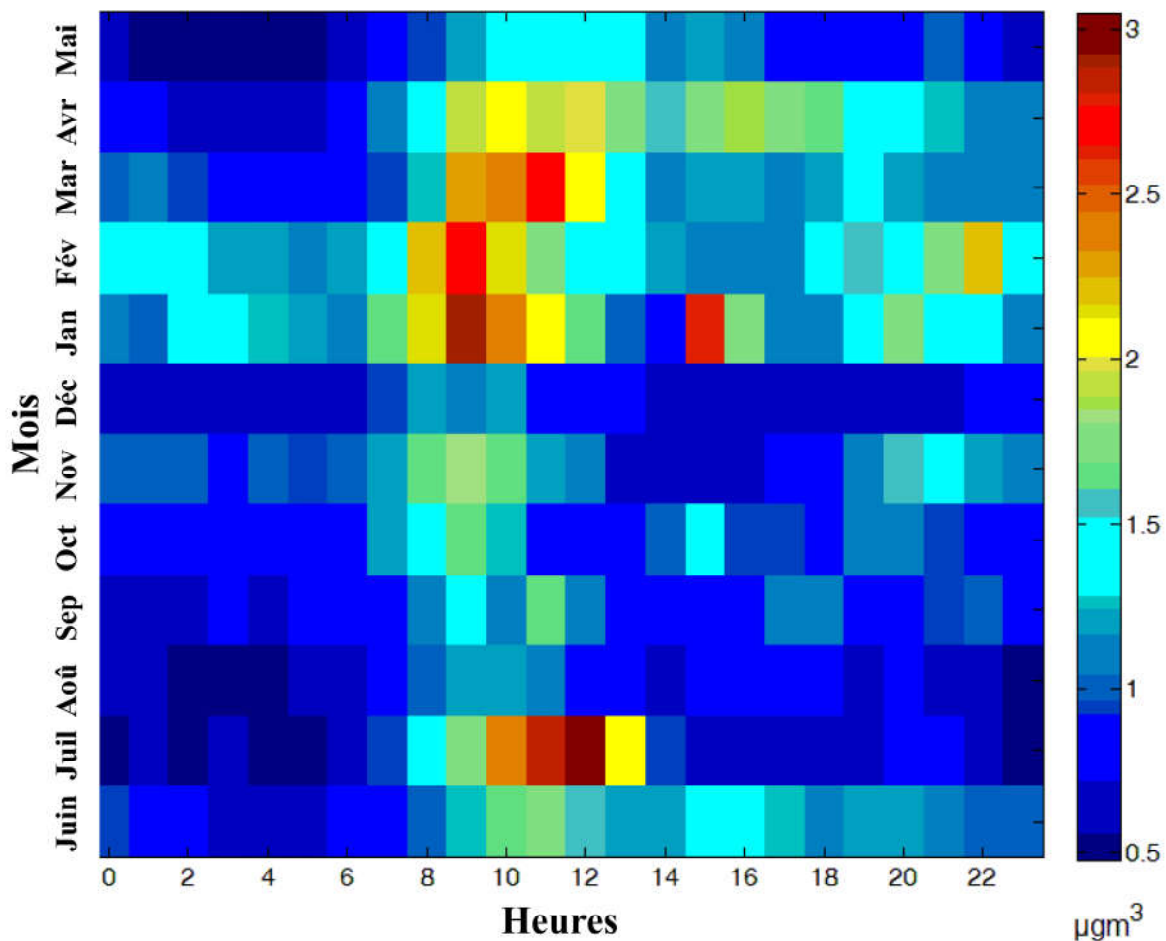


Fig. 54. Moyennes horaires mensuelles en BC durant l'année de mesure

i. Variabilité du BC avec la vitesse du vent et la pluviométrie

La figure 55 présente une comparaison de la variabilité des moyennes journalières en BC avec à la fois la vitesse des vents et la pluviométrie du 01/06/2014 au 31/05/2015. Une relation inversement proportionnelle à la vitesse du vent et à la pluviométrie, d'une part, et les concentrations en BC, d'autre part, a été remarquée. Une étude statistique a révélé une corrélation claire entre l'augmentation de la vitesse du vent et la pluviométrie et le BC et la diminution du BC comme observé à la figure 56.

Quand la vitesse du vent est inférieure à 5 m/s, le BC diminue avec une bonne corrélation. Toutefois, les concentrations en BC augmentent lorsque la vitesse du vent est supérieure à 5 m/s.

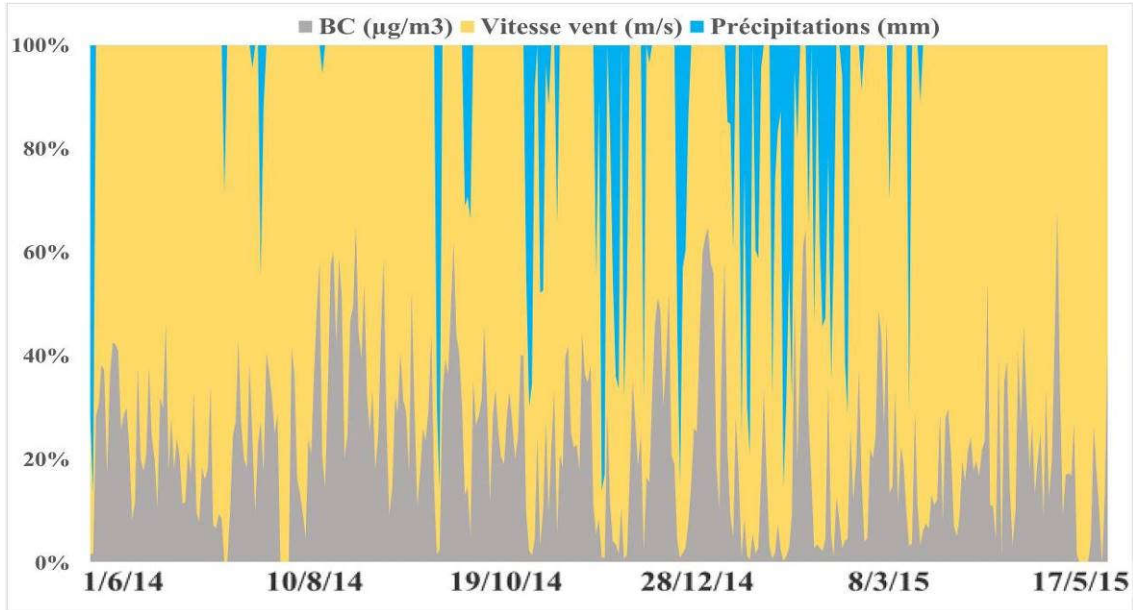


Fig. 55. Variabilité du BC avec la vitesse du vent et la pluviométrie

Ce résultat est la conséquence de la dispersion du BC lorsque la vitesse du vent est moyenne. Par contre, l'augmentation du BC avec les fortes vitesses du vent est due à une perturbation atmosphérique, qui fait croître l'absorption de la lumière par l'aéthalomètre. Cependant, une relation directe a été remarquée entre la diminution du BC et les pluies de moins de 3 mm. La dispersion du BC par le vent et le lessivage humide peut expliquer les résultats précédents. Les fortes vitesses du vent élevées peuvent aussi induire un mélange vertical de polluants dont le BC. La diminution de la hauteur de la couche limite avec de faibles vitesses de vents, en hiver, induisent, également, une accumulation du BC (Begam et al., 2016).

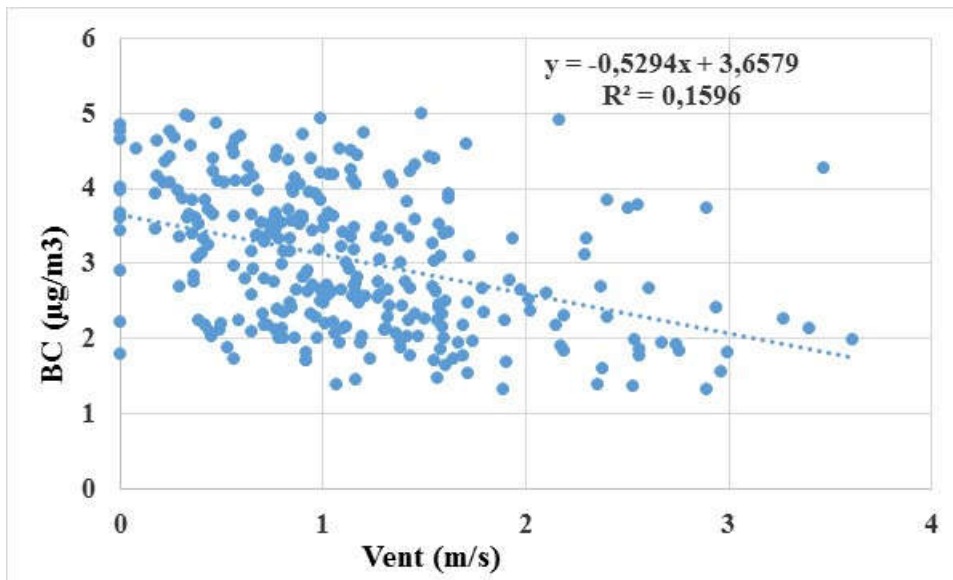


Fig. 56. Variation des teneurs en BC en fonction de la vitesse des vents

j. Variabilité du BC avec la couche d'inversion thermique

Afin d'étudier la relation entre la couche d'inversion thermique (CLA) en utilisant les données mesurées par l'Office Nationale de Météorologie à l'aéroport d'Alger et les concentrations en BC, nous présentons, au tableau 2, les moyennes en BC et la CLA. Cheng et al., (2014) révèlent que les concentrations en BC diminuent en après-midi par suite de l'augmentation de la hauteur de la couche limite et le faible trafic routier. Begam et al., (2016) ont confirmé la relation inversement proportionnelle entre la CLA et le BC.

Dans la présente étude, il a été observé que les niveaux en BC sont élevés lorsque la CLA est inférieure à 1000 m, ce qui s'explique par la pression appliquée par la CLA sur les polluants, en diminuant le volume et en augmentant la concentration.

Tableau 2. Evolution du BC avec le niveau de la couche limite atmosphérique

CLA (m)	BC _{moy} (µg/m ³)
1000	1,16
2000	1,10
3000	1,06
4000	1,05
5000	1,05

k. Sources du Black carbon et évènements de pollution

Nous étudions dans ce qui suit quelques évènements de pollution par le BC (vent de Sahara, célébrations sportives, religieuses ou nationales, feux de forêts, pollution venant d'Europe et une journée sans voitures).

🚧 Pollution venant des activités pétrolières

La figure 57 présente la variation de niveaux des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant une journée polluée avec des pics des BC et BC_{ff} atteignant 14,000 µg/m³. Nous remarquons des niveaux de pollution élevés à 9AM, ce qui n'est pas habituel, avec une moyenne des BC et BC_{ff} qui atteint 11,255 µg/m³, et une absence totale de BC_{wb} (0,000 µg/m³). Ce résultat s'explique à travers les masses d'air venant du Sahara (activités pétrolières) comme le confirme la figure 58 relative aux rétro-trajectoires, obtenue par Hysplit.

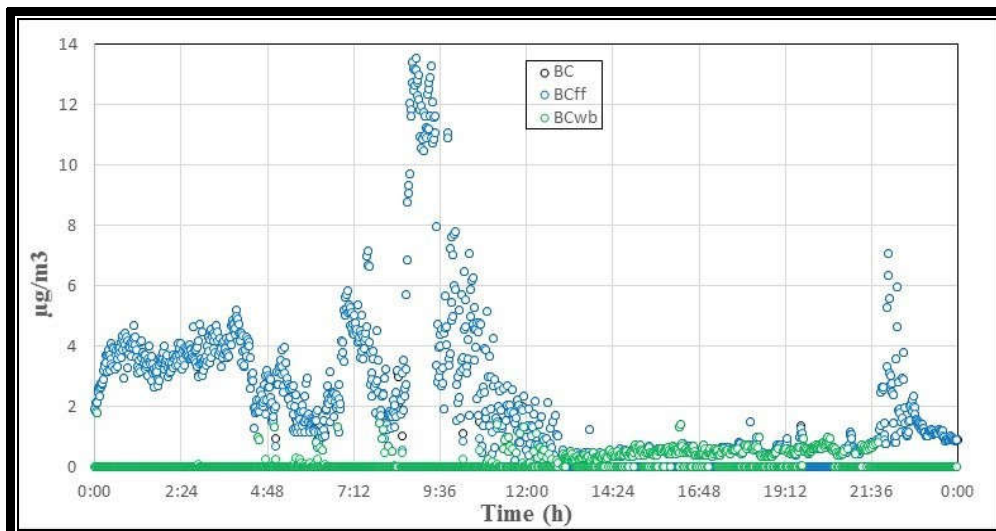


Fig. 57. Variation des BC, BC_{ff} et BC_{wb} le 18 Mai 2014

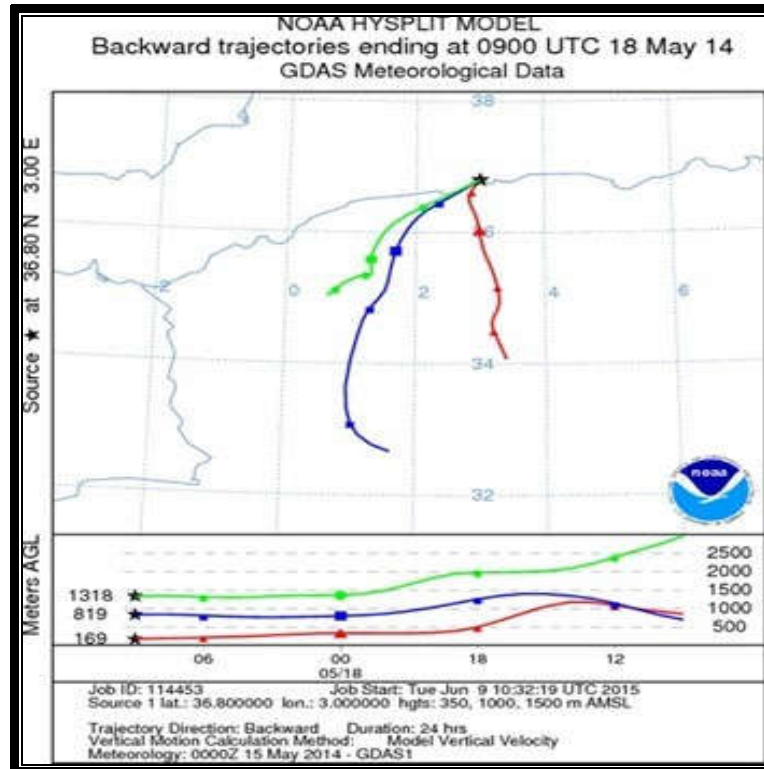


Fig. 58. Rétro-trajectoires des masses d'air du 18 Mai 2015

✚ Pollution due à la célébration d'un évènement sportif

La figure 59 présente les variations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant la journée du 27 Juin 2014, au lendemain du jour où l'équipe nationale Algérienne de football s'est qualifiée au second tour de la coupe du monde pour la première fois de son histoire. Nous avons enregistré des pics élevés des BC et BC_{ff} durant la nuit du 26 Juin et les premières heures du 27 Juin excédant $9,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de faibles niveaux de BC_{wb} (une moyenne de $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de 0AM à 4AM). Cette pollution est due au trafic routier dense des supporters qui défilent et aussi à l'utilisation de pyrotechniques contenant un taux élevé de charbon.

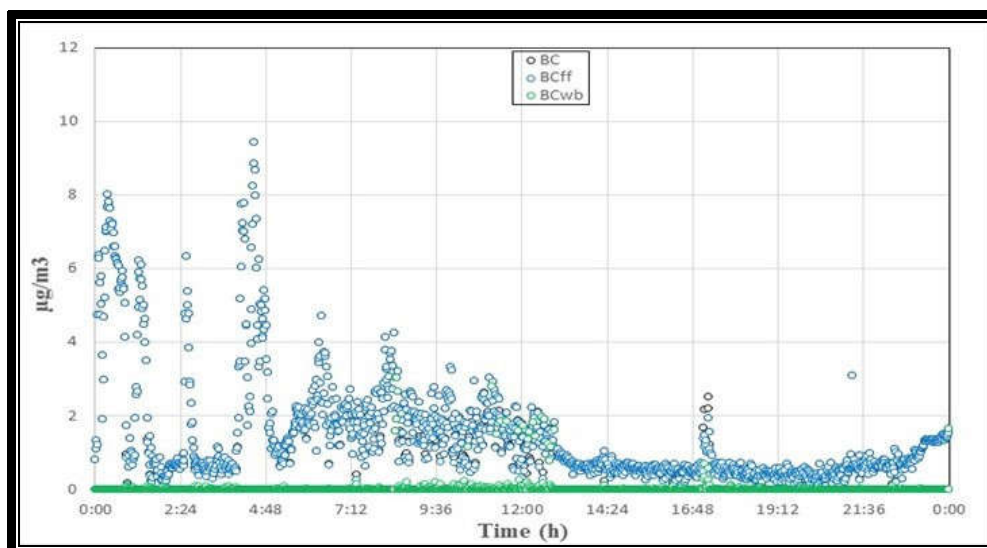


Fig. 59. Variation des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le 27 Juin 2014

✚ Pollution due aux feux de forêts

Nous présentons à la figure 60 les variations de niveaux des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le 29 Août 2014. Nous observons des pics élevés de BC et BC_{ff}, qui ont atteint 50,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui est très rare. L'utilisation de Hysplit (figure 61) confirme ces pics de même que les informations sur les nombreux feux de forêts enregistrés à 300 km à l'Est d'Alger (Bejaia et Jijel), entre le 27 et 29 Août, avec une moyenne journalière de BC_{wb} enregistrée le 29 Août 2014 atteignant 0,136 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces niveaux de BC auraient pu être plus importants si la mesure est faite sur place ou si le feu est circonscrit aux alentours d'Alger.

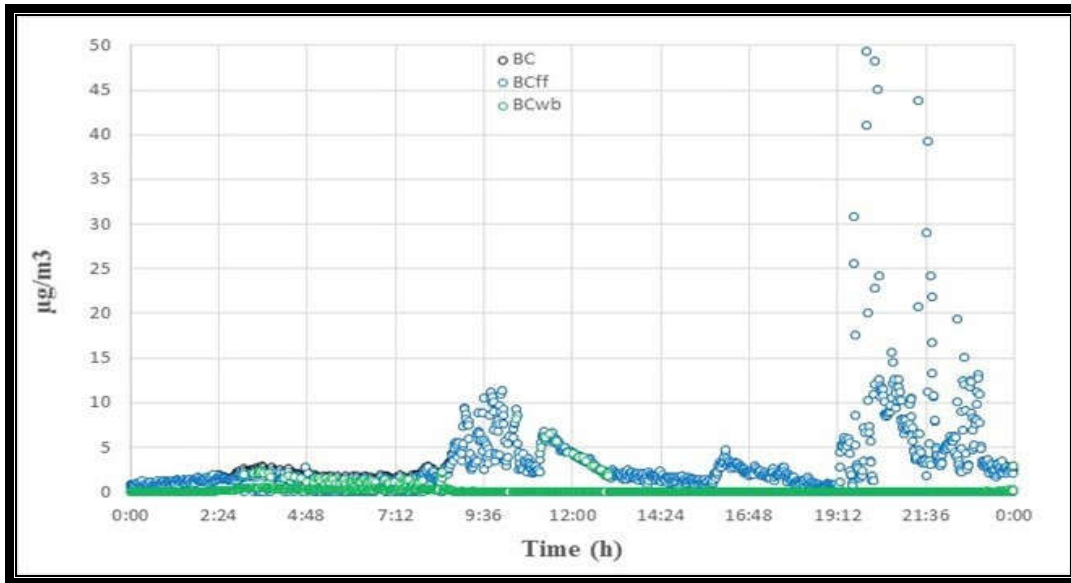


Fig. 60. Variation des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le 29 Août 2014

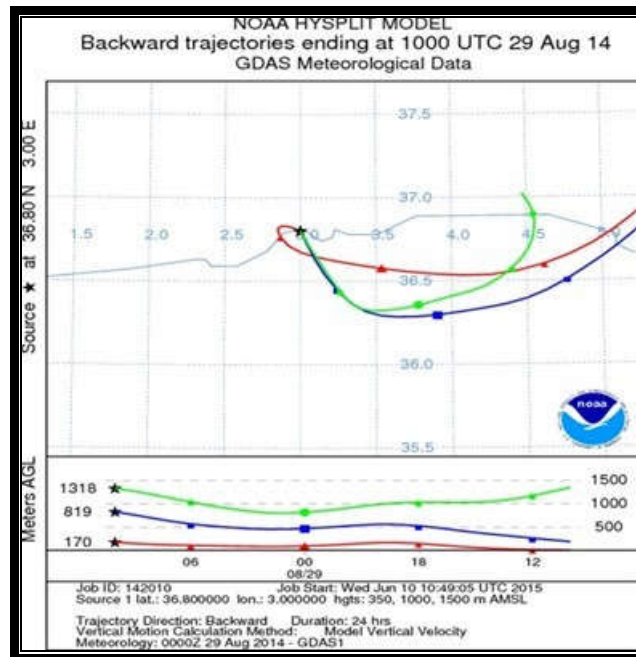


Fig. 61. Rétrotrajectoires des masses d'air du 29 Août 2014

A la figure 62, nous présentons les variations de niveaux des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant la journée du 7 Septembre 2014. Nous avons enregistré des niveaux élevés des BC et BC_{ff} atteignant 16,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et de haux niveaux de BC_{wb}, excédant 2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durant la matinée, avec une moyenne de 0,861 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre midi et 1AM.

Ces pics ont été confirmés par les feux de forêts enregistrés à Ain-Defla au Sud-Ouest d'Alger, et déclarés par la Direction Générale des Forêts, puis confirmés par Hysplit (figure 63). Les pics des BC et BC_{ff} sont expliqués par d'autres masses d'air venant du Sahara (figure 63).

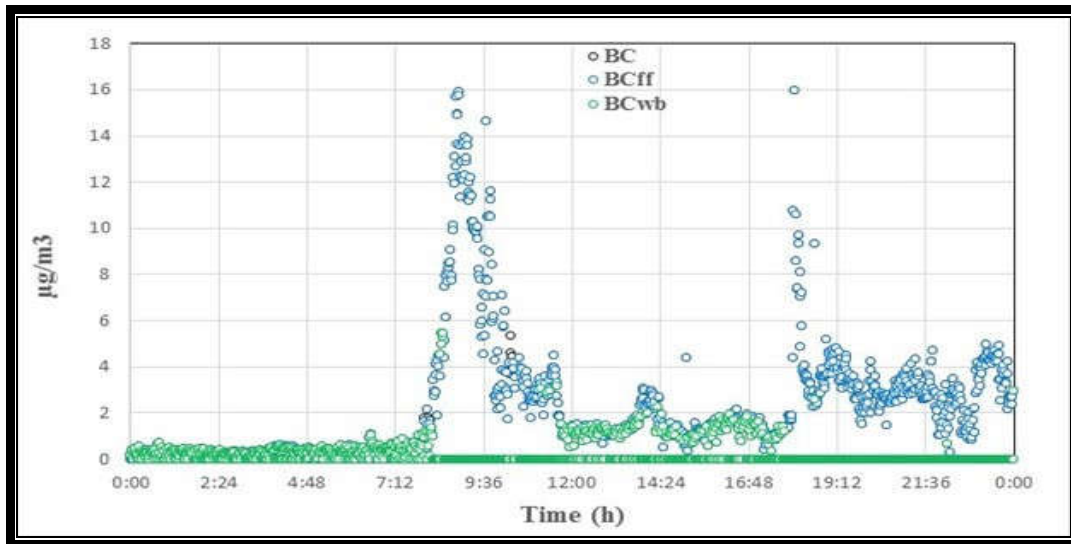


Fig. 62. Variation des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le 7 Septembre 2014

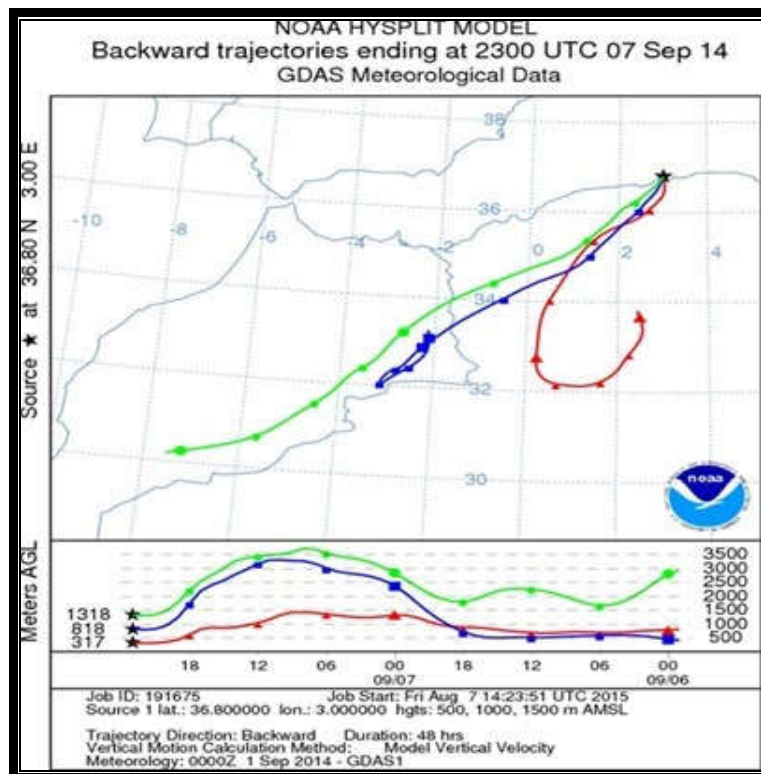


Fig. 63. Rétro-trajectoires des masses d'air du 7 Septembre 2014

✚ Pollution due à la célébration des fêtes religieuses

La Figure 64 compare l'évolution des niveaux de BC durant la célébration de deux fêtes successives du Mawlid Ennabawi, la veille du 2 Janvier 2015 et le 23 Décembre 2015 (la journée du 23/12/2015 est utilisée pour comparaison, même si elle est située en dehors de l'intervalle de temps étudié dans le présent travail). Nous avons observé des niveaux élevés de BC durant ces deux célébrations avec des pics excédant $9,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ le 23 Décembre et $5,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ le 2 Janvier, et des moyennes journalières de BC atteignant $3,477 \mu\text{g}/\text{m}^3$ le 23 Décembre et $0,559 \mu\text{g}/\text{m}^3$ le 3 Janvier. Ces niveaux élevés de BC s'expliquent par la grande utilisation, durant la célébration, des pyrotechniques qui sont, partiellement, constitués de charbon. Seidel et al., (2015), ont observé une augmentation de la moyenne nationale des $\text{PM}_{2,5}$ atteignant $21,000 \text{ mg}/\text{m}^3$, le 4 Juillet aux Etats-Unis, entre 9PM et 10PM, et une diminution à $0,000 \text{ mg}/\text{m}^3$ le 5 Juillet vers midi.

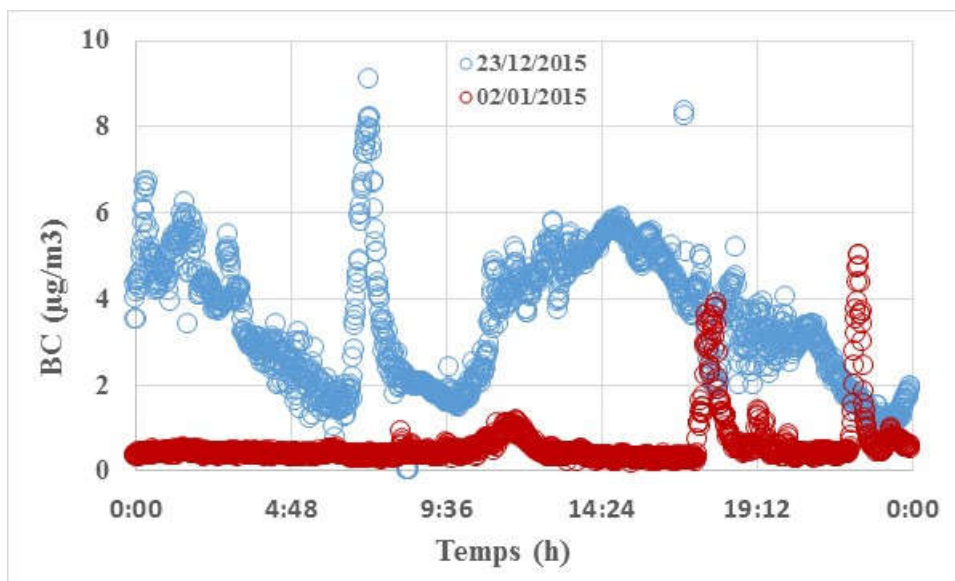


Fig. 64. Comparaison des variations du BC durant les deux dernières célébrations de la fête du Mawlid Enabawi

Afin de comparer les variations des niveaux de pollution durant la journée du 24 Septembre 2014 correspondant à la fête de l'Aid El Adha, où il y a un sacrifice de milliers de moutons, nous avons présenté les concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} à la Figure 65. Nous avons enregistré des niveaux élevés des BC et BC_{ff} excédant $14,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durant la matinée, en raison du trafic routier dense par suite de la prière d'El Aid dans les mosquées. Toutefois, nous avons observé une absence totale de BC_{ff} ($0,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de 11:35AM à 3PM ; par contre, les concentrations de BC_{wb} étaient élevées avec $0,971 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui s'explique par le cooking et le dépilement des têtes et pieds de moutons par le feu.

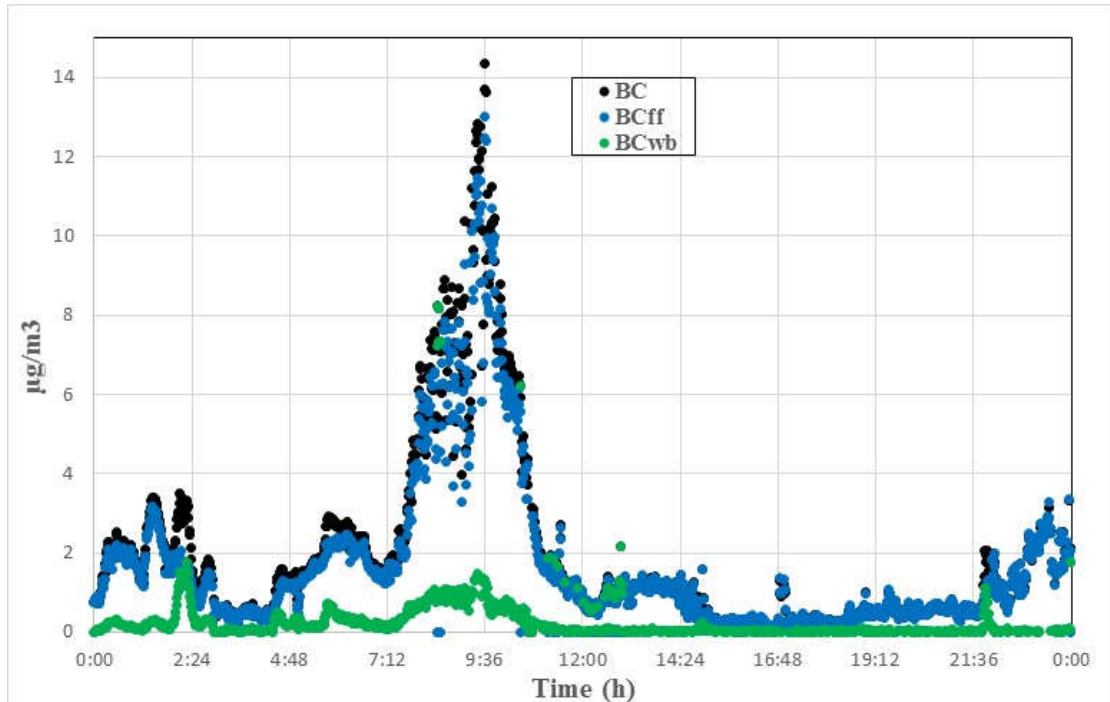


Fig. 65. Variation des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant la célébration de la fête de l'Aid El Adha le 24 septembre 2014

🚦 Pollution due au parc automobile

La Figure 66 présente une comparaison entre la variation du BC entre une journée sans voitures à Alger (31 Juillet 2015) et la moyenne annuelle en BC. Il est à mentionner que ces journées se situent en dehors de l'intervalle de l'année de mesure, mais, elles ont été étudiées afin de suivre l'interaction de la pollution atmosphérique par le BC avec quelques événements. Nous avons remarqué une diminution du BC durant la journée sans voitures, avec une moyenne de 36,92% comparé à la moyenne annuelle. Cette diminution aurait pu être plus importante si la journée sans voiture, a concerné tout le territoire national.

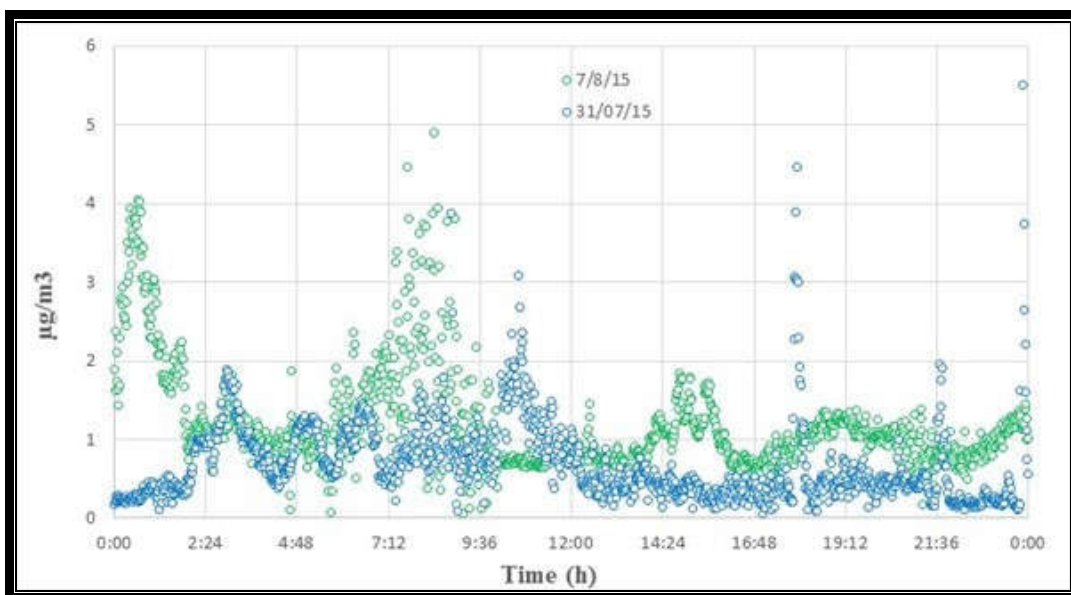


Fig. 66. Comparaison des variations du BC entre une journée sans voitures et la moyenne annuelle

La même comparaison de la journée sans voitures avec la moyenne annuelle a été faite pour les variations du BC_{ff} (figure 67). Nous remarquons aussi une diminution du BC_{ff} durant la journée sans voitures, avec une moyenne de 47,93%, ce qui confirme les résultats précédents, vu la relation directe entre le BC_{ff} et le trafic routier.

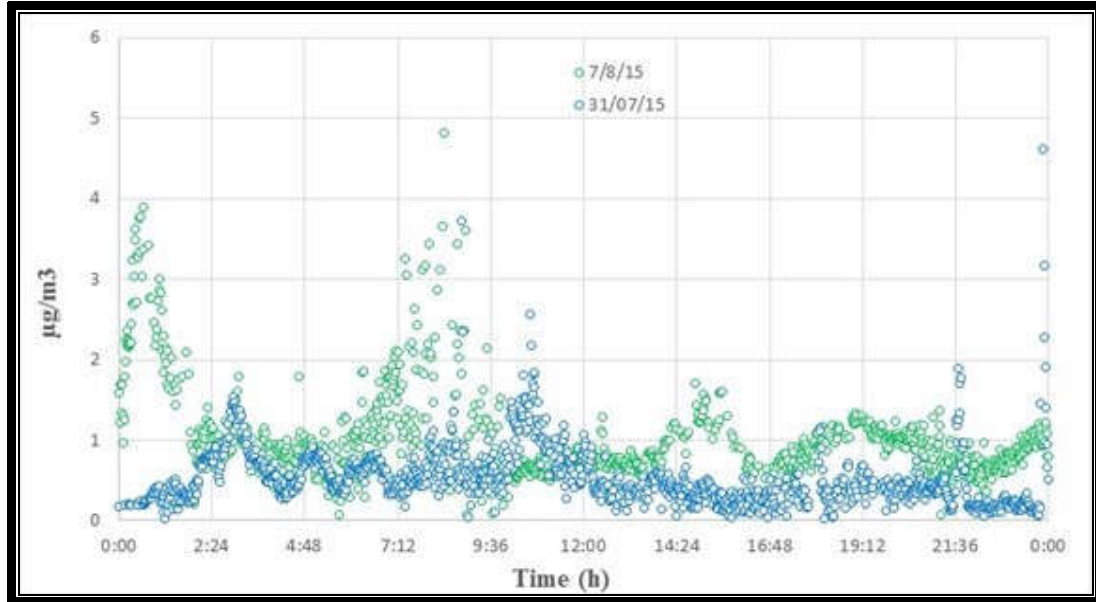


Fig. 67. Comparaison des variations du BC_{ff} entre une journée sans voitures et la moyenne annuelle

✚ L'exposant Angström

La figure 68 présente la variation des moyennes journalières de l'exposant Angström (α) durant l'année de mesure. Cet exposant est un autre facteur important pour la caractérisation de la source de BC mesuré au cours de l'année d'étude. Favez et al., (2009) ont révélé une faible dépendance spectrale de l'absorption de la lumière du noir de carbone ($\alpha \sim 1$), en revanche, c'est beaucoup plus élevé pour les autres composants d'aérosol, à savoir l'hématite et le carbone brun. Sandradewi et coll. (2008) ont enregistré une absorption lumineuse avec un exposant de 1,1 pour le trafic et de 1,8–1,9 pour le chauffage au bois, calculé à partir de l'absorption lumineuse à 470 et 950 nm. Soni et coll. (2011) ont observé des valeurs minimales de l'exposant Angström en mai et des valeurs maximales en période hivernale (Décembre et janvier), liée à une diminution progressive de la concentration de particules grossières de l'été à l'hiver.

L'exposant Angstrom (calculé à 470 et 950 nm) illustré à la figure 68 variait principalement entre 0,5 et 1,5 avec une moyenne annuelle de 1,07. Ce résultat indique que la principale source de BC durant l'année de mesure était la combustion de carburants fossiles, conformément aux résultats présentés précédemment.

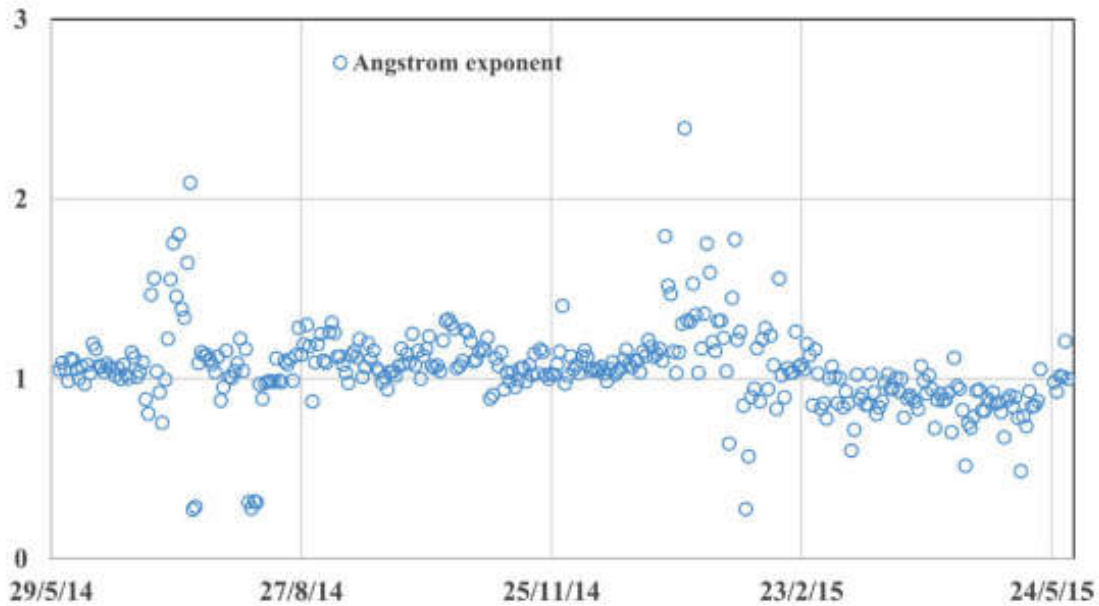


Fig. 68. Variation journalière de l'exposant Angstrom durant l'année de mesure

✚ La section efficace d'absorption massique

La section efficace d'absorption massique (MAC) est également un bon indicateur de la source et du vieillissement des particules de BC. Les valeurs de MAC sont liées à l'état, à la taille et à la morphologie du mélange de l'aérosol (Bond et Bergstrom, 2006) et augmentent avec l'épaisseur du revêtement ou l'eau à une humidité relative élevée (Schnaiter, 2005). Laborde et coll. (2013) ont révélé que la moyenne de la MCA est de $7,3 \text{ m}^2/\text{g}$ pour les émissions de trafic dues aux noyaux réfractaires de BC (rBC), qui sont principalement non enrobés et petits. Cependant, dans le cas du chauffage au bois, la moyenne de la MAC est de $7,8 \text{ m}^2/\text{g}$, expliquée par un revêtement plus épais et une plus grande taille du noyau du BC (rBC). Une MAC moyenne plus élevée ($\sim 8,8 \text{ m}^2/\text{g}$) a été enregistrée avec des aérosols vieillis en raison du revêtement plus épais par rapport aux aérosols provenant de la circulation et de la combustion du bois (Schnaiter, 2005). Cao et coll. (2015) ont rapporté des valeurs de MAC médianes de 20,0 ; 33,7 ; 29,1 et $27,6 \text{ m}^2/\text{g}$, respectivement au printemps, en été, en automne et en hiver en Chine. Toutefois, les moyennes saisonnières des valeurs de MCA enregistrées en Suisse sont plus faibles avec, respectivement, 8,9 ; 9,5 ; 10,0 et $9,9 \text{ m}^2/\text{g}$ au printemps, en été, en automne et en hiver, respectivement (Lavanchy et al., 1999). Les valeurs élevées de MAC enregistrées en Chine pourraient être dues à la combustion de la biomasse, une augmentation relativement forte des particules symétriques, des amas de structures émises par les véhicules à moteur, ainsi que les aérosols vieillis sous une humidité relative élevée (60-80%) et une forte radiation solaire.

Dans la présente étude, les moyennes saisonnières de MAC pendant l'été, l'automne, l'hiver et le printemps étaient de 10,97 ; 15,56 ; 30,27 et $17,12 \text{ m}^2/\text{g}$, respectivement. Ces valeurs élevées en MAC pourraient être dues au vieillissement des aérosols provenant d'Europe et aux aérosols secondaires étant sous une humidité élevée et un fort rayonnement solaire, sachant que l'humidité relative saisonnière était de 58,38 ; 61,12 ; 64,12 et 62,03%, en été, automne, hiver et printemps, respectivement. Les moyennes mensuelles les plus élevées en MAC ont été enregistrées en février, décembre et mars, avec, 36,18 ; 30,54 et $26,92 \text{ m}^2/\text{g}$, respectivement, lorsque l'humidité relative était élevée, atteignant 63,94 ; 65,44 et 65,44%, respectivement.

Les valeurs les plus basses en MAC ont été enregistrées en juillet, septembre et octobre avec 9,61 ; 1,75 et 11,88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement, et une humidité relative basse de 58,00 ; 58,77 et 55,53%, respectivement. Cette différence entre les variations mensuelles de MAC pourrait également être due au ciel dégagé notamment en février et mars, contrairement, aux autres mois, et au vent en hiver, qui apporte des aérosols vieillissants. Les mois de juillet et mars étaient également caractérisés par des aérosols frais dus à des incendies de forêts, tel que présenté dans les sections précédentes.

1. Le Black Carbon et la vitesse et direction du vent

📊 Données mesurées

Dans cette partie, nous nous focalisons sur la relation entre les niveaux de BC et la vitesse et direction des vents (WS) responsable de la dilution des polluants (figure 69). Ces résultats ont été obtenus par le réseau CHEMS du CDER du 01/06/2014 au 31/05/2015 et sont importants pour déterminer la source de pollution par le BC. La moyenne de BC était de $0,725 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lorsque la vitesse du vent était supérieure à 4 m/s, toutefois, elle a atteint $1,806 \mu\text{g}/\text{m}^3$, avec des vitesses de vents inférieures à 2 m/s. La figure 70 montre que les principales d'émission de BC sont le Sud, Nord-Est et Nord-Ouest avec des concentrations atteignant $3,170 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pour des vitesses de vents inférieures à 2 m/s. Cependant, malgré des vitesses élevées de vents (4 m/s) venant du Sud, nous avons enregistré des pics en BC atteignant $3,170 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pouvant être dû à l'industrie pétrolière.

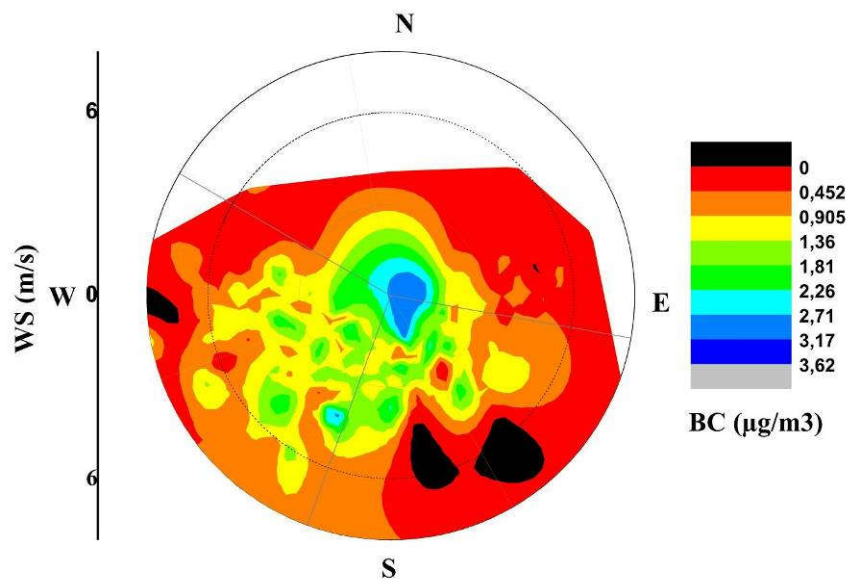


Fig. 69. Variation du BC avec la vitesse et la direction du vent

📊 Données modélisées

En vue d'une meilleure compréhension de la source de vents, et le transport de polluants à grande distance, une analyse des ensembles de masses d'air de chaque 6h du 01/06/2014 au 31/05/2015 a été élaborée. Cette étude a exploité 1460 cartes des rétro-trajectoires obtenues par Hysplit, et a permis de déduire l'évolution des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} , selon les ensembles des masses d'air. Ces intervalles de temps ont été fixés comme suit : minuit, 6AM, midi et 6PM, puis, nous avons calculé les moyennes de concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} , de chaque interval des six directions des vents (E, O, N-E, N-O, S et L).

La direction Nord-Ouest a été prédominante avec des taux atteignant 69, 66, 65 et 62% à 18:00, 12:00, 00:00 et 06:00, respectivement, suivie par le Sud avec 15, 14, 13 et 12% à 12:00, 06:00, 00:00 et 18:00, respectivement. La figure 70 présente les pourcentages des BC, BC_{ff} et BC_{wb} pour les six ensembles durant les quatre intervalles de temps de l'année de mesure. Pour l'ensemble de 00:00, les moyennes maximales des BC et BC_{ff} ont été enregistrées de l'Ouest, suivi par le Sud avec 1,417 et 1,402 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pour le BC, et 1,263 et 1,212 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement. Ces résultats s'expliquent par la raffinerie d'Arzew située à l'Ouest et l'industrie pétrolière (pompage, processing, stockage et transport) au Sud. Les moyennes maximales de concentrations des BC et BC_{ff} observées avec l'ensemble 06:00 sont de l'Est et du Nord-Est pour le BC avec 1,336 et 0,994 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et de l'Est et l'Ouest pour le BC_{ff} avec 1,215 et 0,917 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement.

L'occurrence de quelques concentrations de BC peut être liée aux activités portuaires, aux raffineries de l'Est et de l'Ouest, au parc automobile, et à la combustion du bois en Europe.

En ce qui concerne l'ensemble de minuit (00:00), les sources des BC et BC_{ff} sont, principalement, de l'Est, suivi par l'Ouest avec des concentrations de 2,354 et 2,200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC et 2,238 et 2,156 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC_{ff}, respectivement, dues aux activités portuaires et raffineries de Bejaia et de Skikda à l'Est et d'Arzew à l'Ouest.

Pour le cas de l'ensemble de 18:00, les moyennes prédominantes en BC et BC_{ff} sont enregistrées du Sud associées à des vents locaux avec des teneurs de 1,942 et 1,696 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC et 1,889 et 1,683 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC_{ff}, respectivement, pouvant s'expliquer par l'industrie pétrolière au Sud et le parc automobile local.

A minuit (00:00), les moyennes maximales en BC_{wb} sont, principalement, du Nord-Est avec 0,090 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui est dû au chauffage au bois en Europe, suivi par le Sud avec 0,051 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, proche de la moyenne annuelle, venant des feux de forêts au Sud d'Alger.

A 06:00 et à l'ensemble de midi (12:00), les sources prédominantes de BC_{wb} sont de l'Est et du Nord-Est, avec des moyennes élevées atteignant 0,121 et 0,092 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et, 0,106 et 0,106 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement, expliquées par la combustion de bois en Europe de l'Est et en Tunisie.

Finalement, pour l'ensemble de 18:00, les moyennes annuelles de BC_{wb} sont proches de la moyenne annuelle et viennent du Sud avec 0,053 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dues au cooking aux villes situées au Sud d'Alger, et à l'Ouest avec 0,043 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, très probablement issues le cooking aux villes de l'Ouest et à la combustion du bois au Maroc.

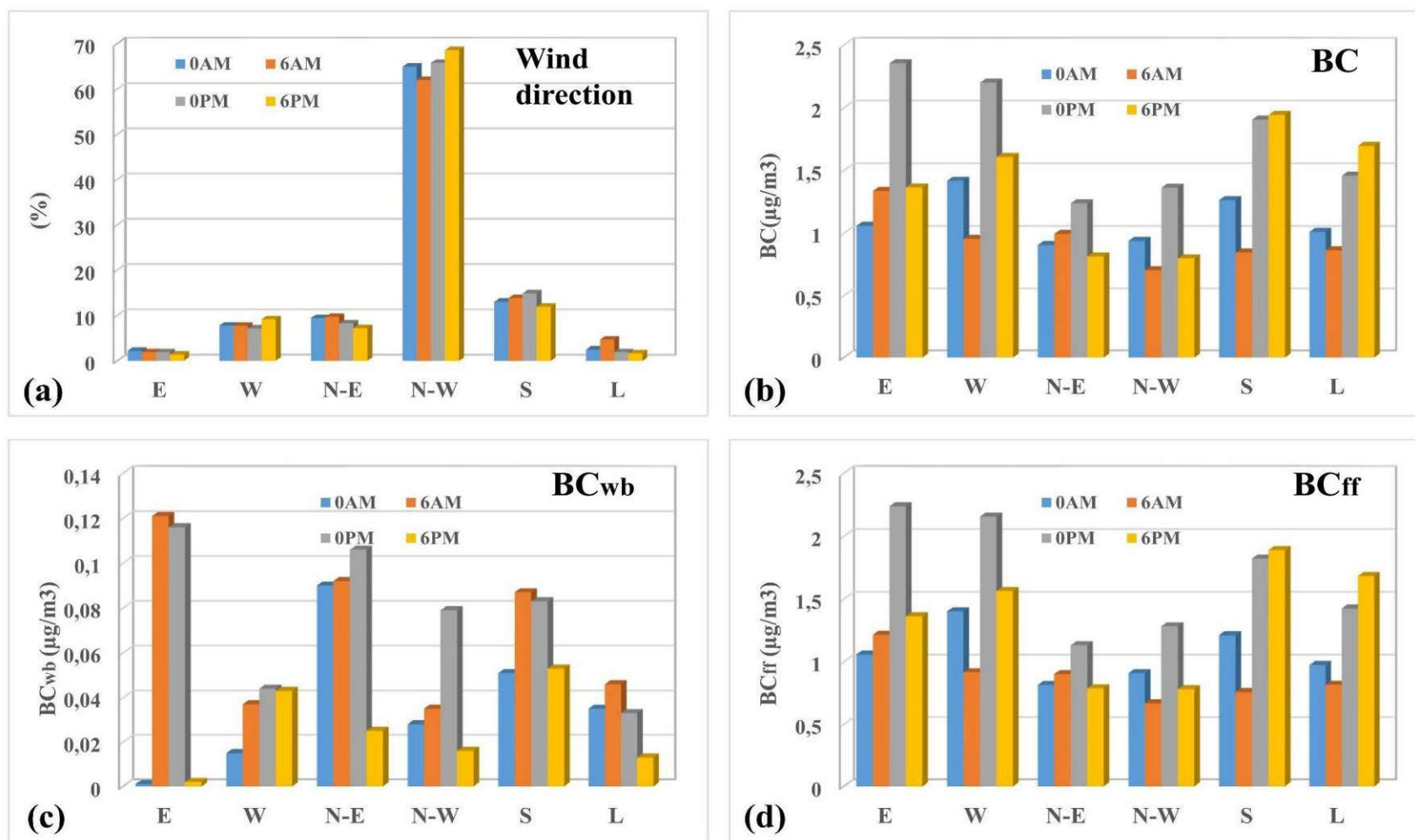


Fig. 70. Variation des moyennes des BC, BC_{ff} et BC_{wb} avec l'analyse des ensembles de rétro-trajectoires

Pour une meilleure interprétation des résultats précédents, des cartes de fréquence des rétro-trajectoires ont été établies à l'aide du modèle Hysplit. La figure 71 présente la carte de fréquences des rétro-trajectoires en été (juillet-août) 2014, où les vents viennent, principalement, du Nord-Est et Nord-Ouest, ce qui est en adéquation avec les résultats précédents de BC et BC_{ff} émis par les feux de forêts et les activités humaines.

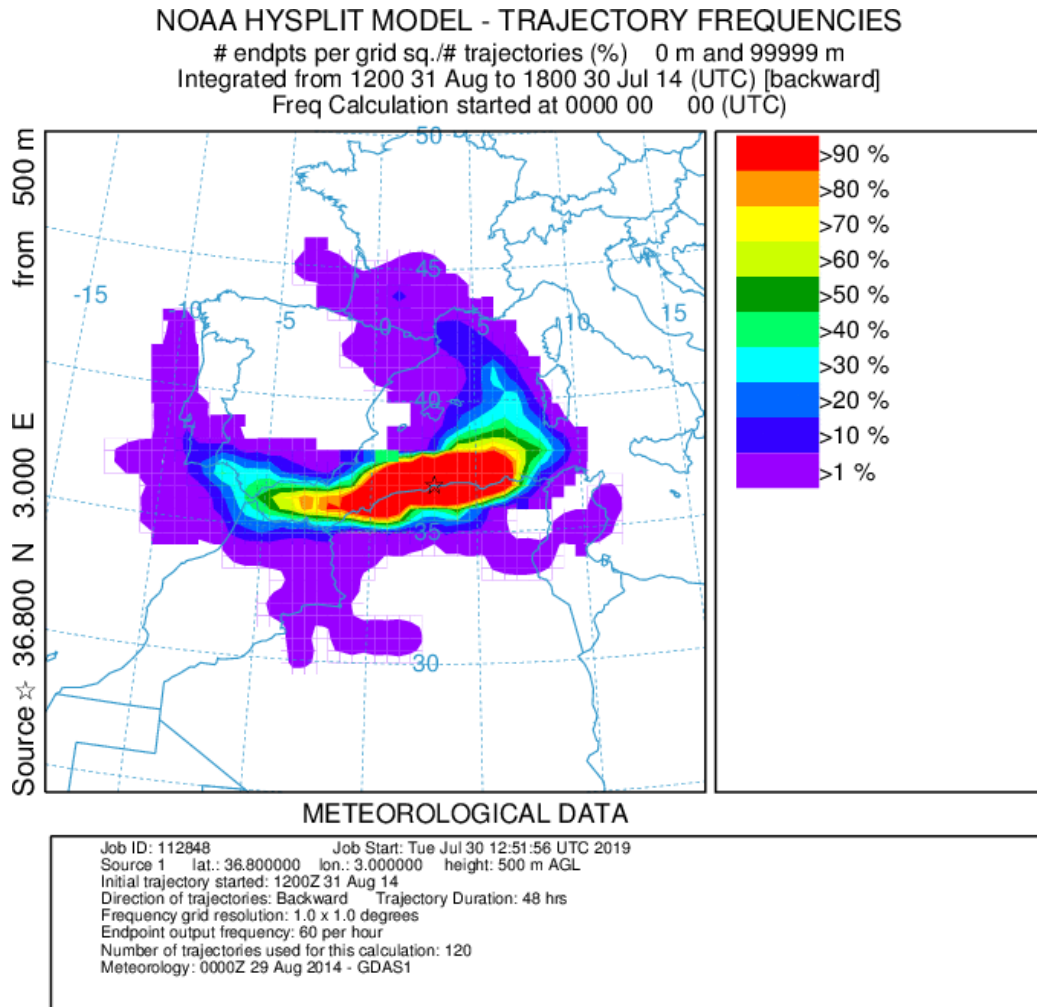


Fig. 71. Carte de fréquence des rétro-trajectoires en été (juillet-août) 2014

La figure 72 présente la carte de fréquences des rétro-trajectoires en automne (Septembre-Octobre) 2014. Il est clair que les vents prédominants étaient de l'Ouest, Sud et Nord-Est, ce qui conforte les résultats présentés sur la carte des vents élaborée.

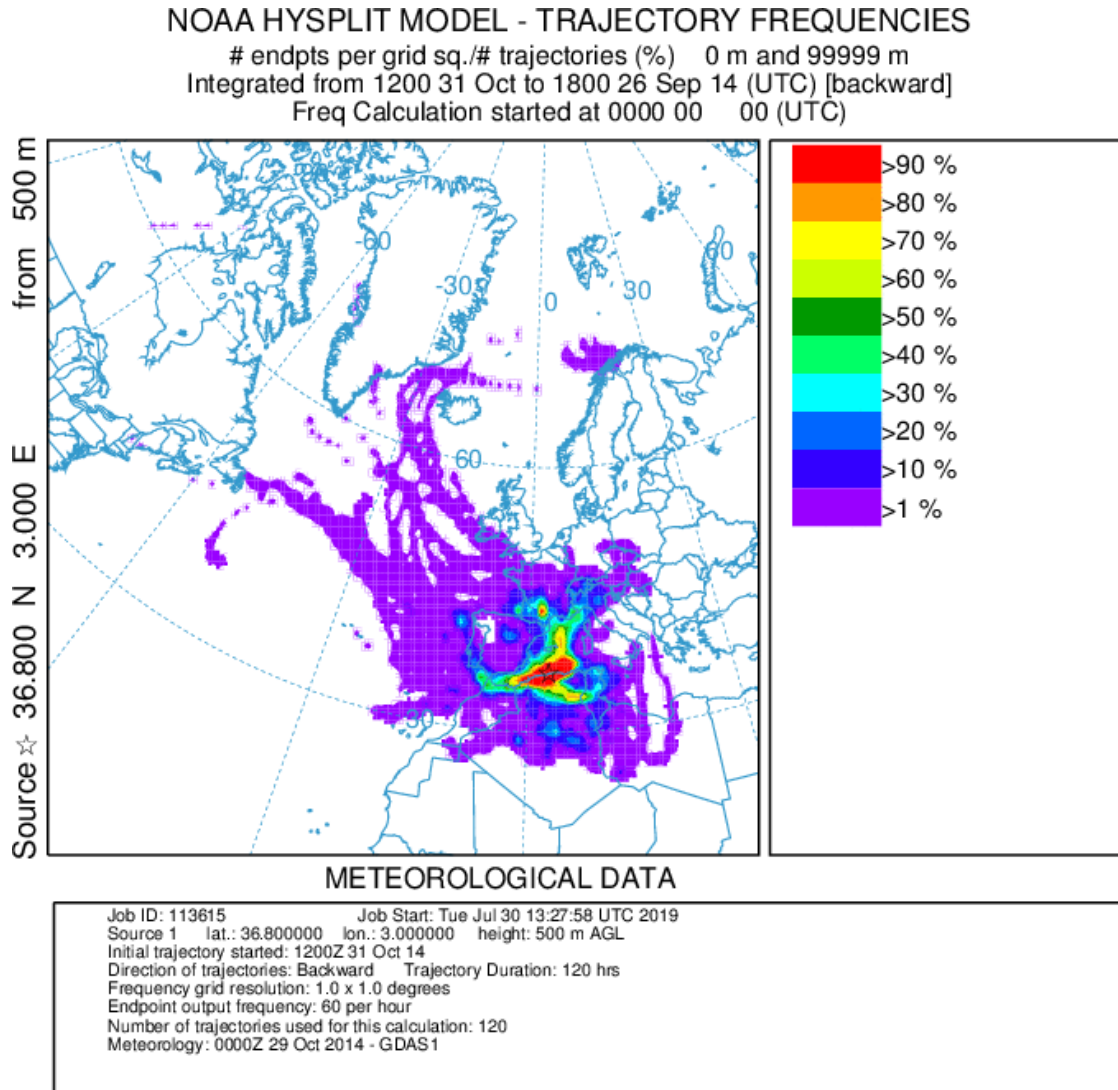


Fig. 72. Carte de fréquences des rétro-trajectoires en automne (septembre-octobre) 2014

La figure 73 présente la carte de fréquences des trajectoires en hiver (Décembre 2014-Janvier 2015). Les vents prédominants sont d’Ouest, du Sud et du Nord-Est, ce qui est en adéquation avec les résultats de la carte des vents.

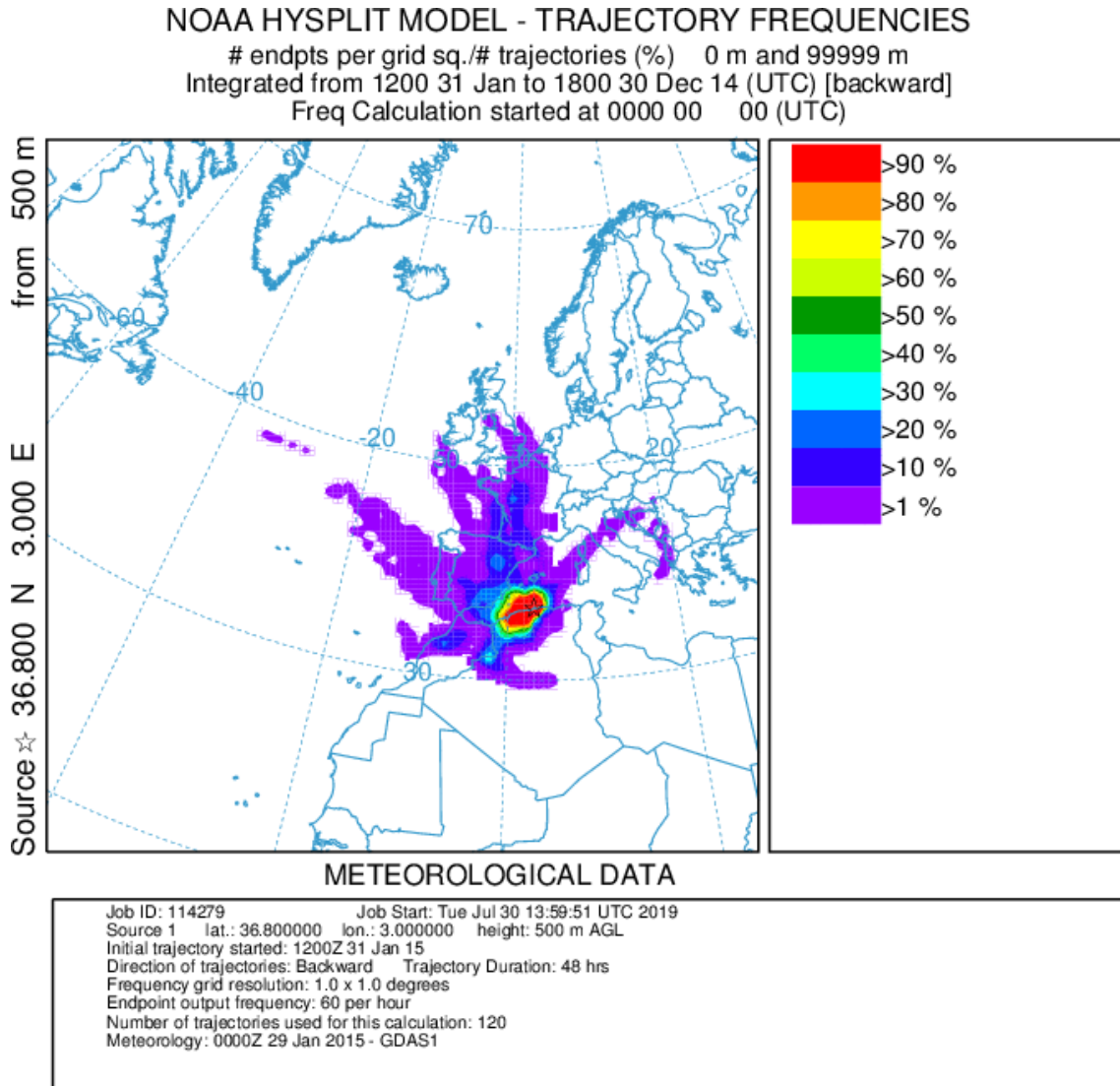


Fig. 73. Carte de fréquences des rétro-trajectoires en hiver (décembre 2014-janvier 2015)

La figure 74 présente la carte de fréquences des rétro-trajectoires au printemps (mars-avril) 2015. Il a été remarqué que les vents viennent, principalement, du Nord-Est, Nord-Ouest et Sud, ce qui est en adéquation avec les résultats, précédemment, obtenus.

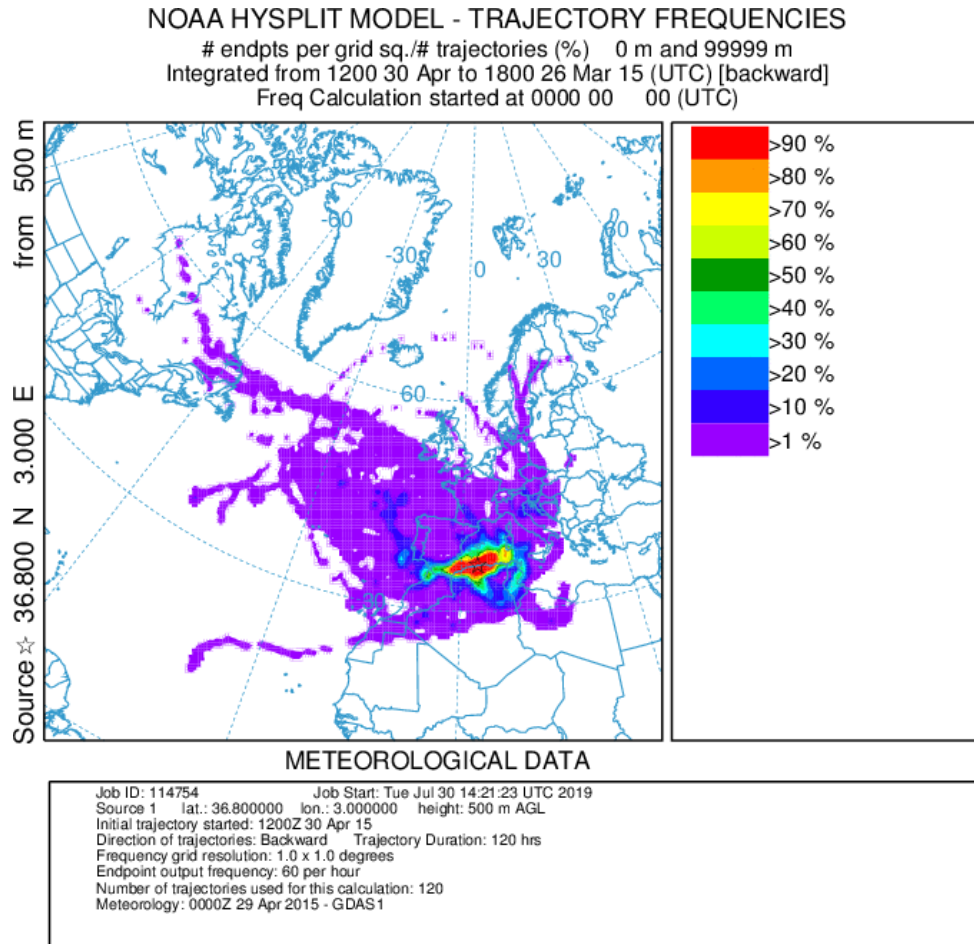


Fig. 74. Carte de fréquence des rétro-trajectoires au printemps (mars-avril) 2015

m. Variation saisonnière du black carbon et la direction du vent

La direction des vents joue un rôle déterminant dans l'interprétation des pics de pollution. La carte des vents présentée (figure 34), précédemment, détaille la source des vents (mesurés) durant la période de mesure du BC, selon leur direction. Un filtrage des moyennes en BC selon les directions des vents (huit secteurs des sources de vents) a été effectué (Figure 75). En été, le BC provient, principalement, de l'Ouest (23,94%) et de l'Est (23,08%).

Les masses d'air pollué provenant, principalement, de l'Ouest et du Sud ont atteint des concentrations moyennes de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le flux d'air du Sud et $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'Ouest. Les masses d'air venant de l'Est sont moins chargées (concentrations inférieures à $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Durant l'automne, les fractions de masse prédominantes en BC proviennent de l'Ouest (32,39%), du Sud-Ouest (18,99%) et de l'Est (12,96%).

Les concentrations moyennes en BC ont atteint $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'Ouest et $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les secteurs Sud-Ouest et Est. En hiver, les masses d'air dominantes viennent de l'Ouest (34,40%), du Nord-Ouest (13,10%), du Nord-Est (12,94%) et du Nord (11,14%).

Les concentrations moyennes en BC provenant de l'Ouest et du Nord-Ouest ont atteint $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$; par contre, celles venant du nord-est et du nord ne dépassent pas les $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Au printemps, le BC provient, essentiellement, de l'Est (26,88%) et de l'Ouest (22,88%). Les concentrations moyennes en BC atteignent les $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le Sud et $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'Est et l'Ouest.

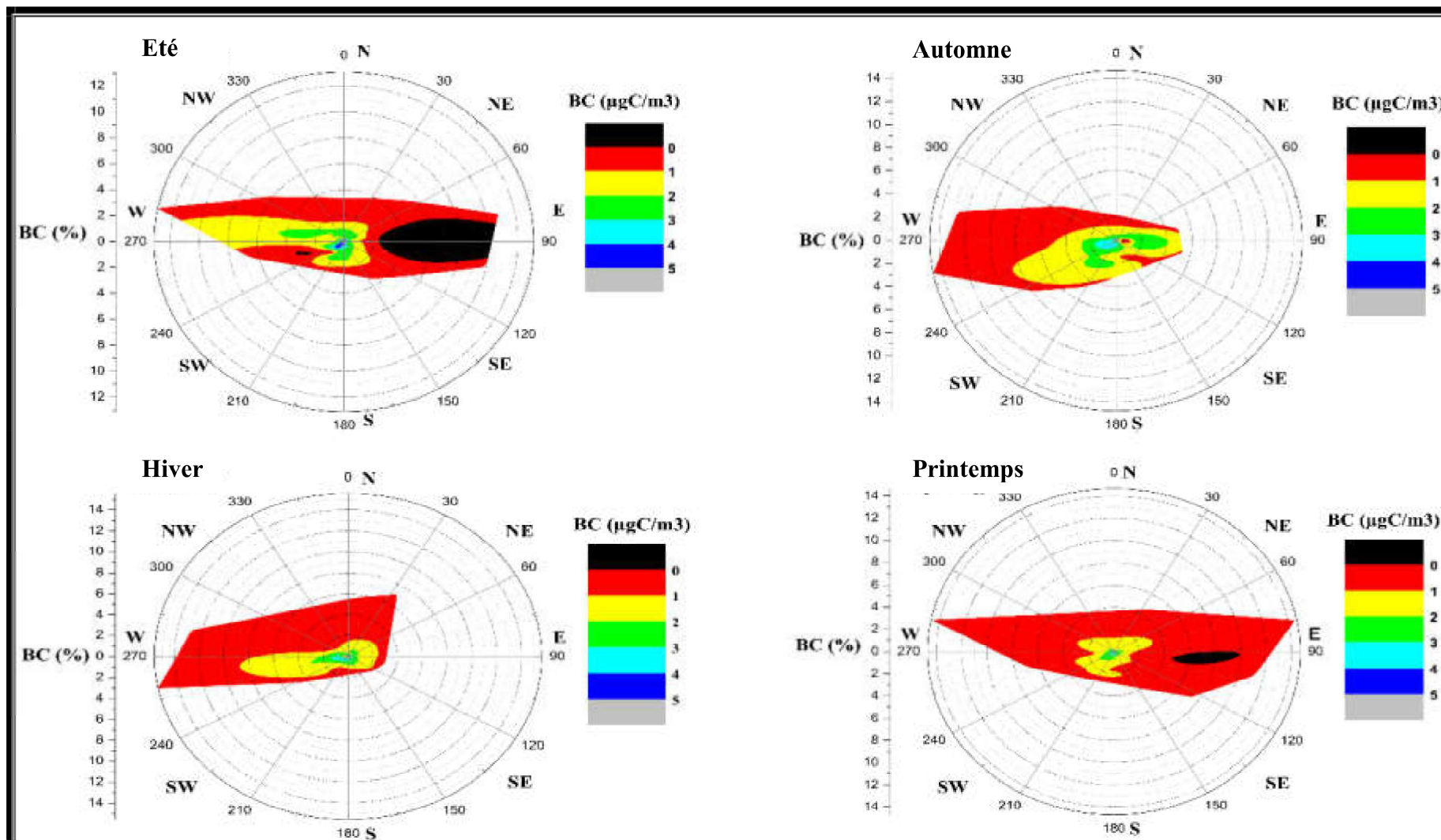


Fig. 75. Distribution des niveaux de BC selon la direction des vents

n. La distribution des sources de BC durant les périodes humide et sèche

Dans cette partie, nous allons examiner la relation entre les moyennes journalières de BC et les rétro-trajectoires établies par Hysplit durant la période humide et la période sèche.

• **Période humide**

Nous avons suivi les moyennes de BC selon la source des masses d’air du mois d’octobre à avril, période où les pluies sont fréquentes dans la région d’Alger (figure 76).

Nous remarquons que les sources prédominantes des masses d’air durant la période humide sont de Nord-Ouest (34,91%), Sud (27,83%) et Ouest (22,14%). Toutefois, les moyennes de BC prédominantes sont observées suivant la direction Sud avec $1,333 \pm 0,740 \mu\text{g}/\text{m}^3$, suivie de la source Locale avec $1,238 \pm 0,506 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ce résultat est dû aux forts niveaux de BC venant du Sud, qui, malgré la dispersion par le vent, arrivent à Alger avec des niveaux élevés, d’une part, et au fait que la source Locale d’émission de BC est proche du lieu de sa mesure, d’autre part. Pour le cas des moyennes de BC enregistrées durant les vents venant d’Est, Ouest, Nord-Est et Nord-Ouest, nous remarquons qu’elles sont très proches avec, respectivement, $0,830$, $0,934$, $0,883$ et $0,890 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui s’explique par la dispersion du BC par les vents et son lessivage par la pluie.

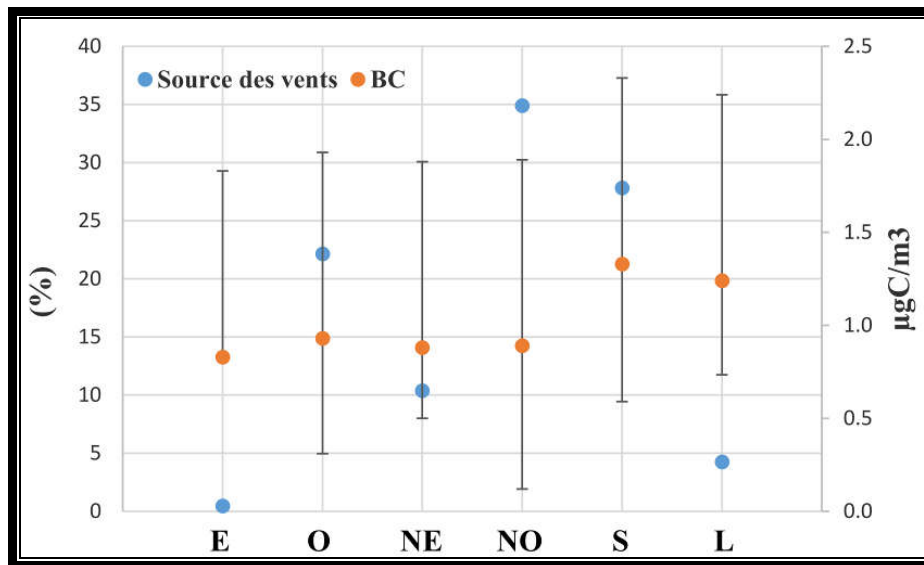


Fig. 76. Distribution des sources de BC durant la période humide

• **Période sèche**

Les moyennes de BC, selon les sources des masses d’air durant la période sèche de Mai à Septembre, sont présentées à la figure 77.

Nous remarquons que les sources de vents prédominants durant la période sèche sont d’Ouest (29,53%) et du Sud (25,50%). Par contre, les moyennes de BC les plus élevées ont été enregistrées suivant les directions Est avec $1,380 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et Ouest avec $1,377 \pm 0,668 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces résultats s’expliquent par la rareté des vents venant d’Est (0,671%) et les feux de forêts enregistrés durant la période sèche à l’Ouest du pays (Oran et Sidi Bel Abbès). Pour ce qui est des autres directions ; Nord-Est, Nord-Ouest, Sud et Locale, les moyennes de BC sont, respectivement, de $0,717 \pm 0,338$, $0,836 \pm 0,501$, $1,101 \pm 0,720$ et $1,085 \pm 0,653 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cette diminution des moyennes de BC durant la période sèche, comparativement à la période humide, résulte de décroissance du BC_{wb} , dû au chauffage, et du BC_{ff} imputable aux activités humaines durant l'été (activités pétrolières, parc automobile et industries). Sachant que la moyenne des vitesses des vents enregistrés durant la période humide, est de 4,24 m/s, nous pouvons déduire que les niveaux de BC auraient été plus élevés si les vitesses des vents étaient moindres comme, tel le cas en période sèche 3,33 m/s.

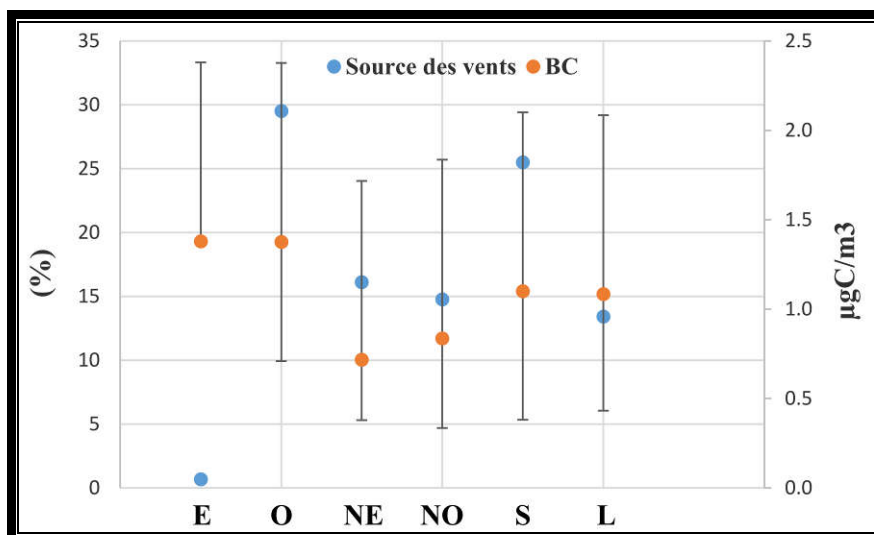


Fig. 77. Distribution des sources de BC durant la période sèche

o. Comparaison des niveaux de BC à Alger et Athènes (Grèce)

Dans le but de comparer les niveaux de pollution par le BC, enregistrés à Alger (Bouzaréah), et une des mégacités de la méditerranée, nous avons choisi Athènes (Grèce), où nous avons pu avoir les résultats de EC (Carbone élémentaire) mesuré par l'Observatoire National d'Athènes (NOA) entre le 01/06/2014 et le 31/05/2015.

▪ Variation journalière

La figure 78 présente les variations journalières de BC mesuré en site semi-urbain à Bouzaréah (Alger) et Athènes sur une année. Bien que les types de site ne sont pas les mêmes (Semi-urbain à Bouzaréah et urbain à Athènes), nous relevons que les niveaux de BC sont assez proches. Les moyennes annuelles s'élèvent respectivement à 1,113 et 1,725 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Toutefois, la période située entre le début de novembre et la fin de janvier est caractérisée par des moyennes journalières situées entre 4,000 et 11,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Athènes, contrairement à Alger où la plupart des valeurs sont inférieures à 2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, par suite de l'utilisation massive du bois de chauffage à Athènes et en Grèce, en général (voir comparaison mensuelle ci-dessous).

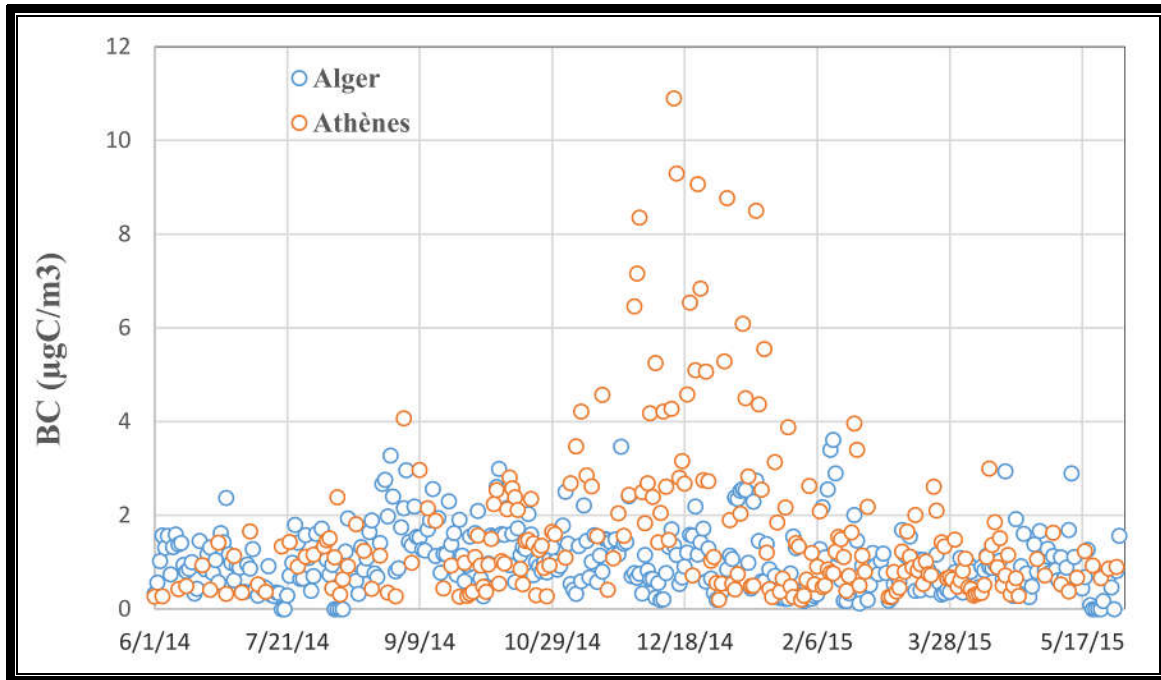


Fig. 78. Comparaison des moyennes journalières de BC à Alger et Athènes (Grèce)

▪ **Variation mensuelle**

La figure 79 présente la variation des moyennes mensuelles de BC, enregistrées à Alger et Athènes. Nous remarquons que les moyennes mensuelles de BC mesurées à Athènes sont supérieures à celles d’Alger durant les mois de novembre, décembre et janvier, avec, respectivement, 2,949, 3,819 et 2,364 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, contre 1,278, 0,907 et 1,099 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Alger. Ces moyennes doubles, voire, triples, sont dues au chauffage par le bois pour Athènes et le gaz et l’électricité pour Alger, sources moins polluantes. Par contre, le parc automobile est identique aussi bien pour Athènes que pour Alger vu l’importante de la population de ces deux villes d’environ 5 millions d’habitants chacune. Pour ce qui est des mois d’été, nous remarquons que pour Alger les niveaux de BC sont supérieurs, avec 1,094 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ contre 0,570 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Athènes (presque le double), ce qui peut s’expliquer par la diminution des émissions de BC par le chauffage au bois à Athènes, d’une part, et la poursuite des activités pétrolières en Algérie, d’autre part.

Il est important de signaler que, si le BC mesuré à Alger est en milieu urbain comme pour Athènes, la comparaison aurait été différente, avec des niveaux beaucoup plus élevés à Alger.

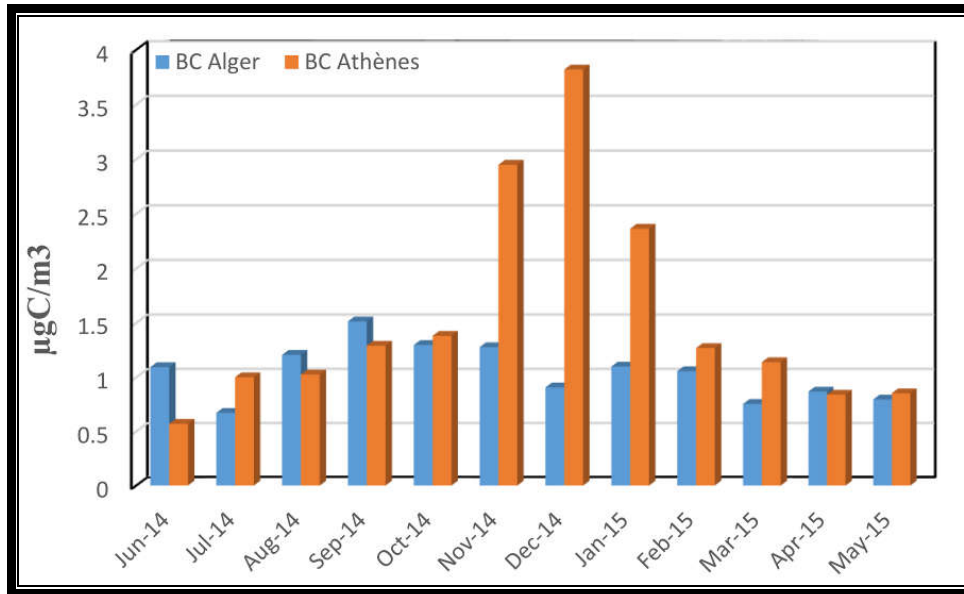


Fig. 79. Comparaison des niveaux mensuels de BC à Alger et Athènes (Grèce)

p. Comparaison des niveaux de BC à Alger et Crète (Grèce)

Nous présentons dans ce qui suit une étude comparative des variations des concentrations de BC mesuré à Alger et celles enregistrées sur un site rural à Crète (Grèce) durant la période allant du 01/06/2014 au 31/05/2015. Le site de Crète choisi, situé à Finokalia (figure 80), est représentatif de l'Est de la Méditerranée, vu qu'il reçoit les vents du nord de l'Europe et ceux du Sud Saharien. Ce site est situé à 70 km à l'Est de la ville la plus peuplée de l'île (Heraklion), qui compte 150 000 habitants. Cette station a été installée au Nord-Est de l'île de Crète à (35°20'N, 25°40'E), à 250 m d'altitude et à quelques mètres de la méditerranée. Les vents prédominants, enregistrés entre 1997 et 2006, sont de Nord-Est, Nord-Ouest et Sud/Sud-Ouest.



Fig. 80. Site de la station de la qualité de l'air de Finokalia (Crète)

○ Variation horaire

La figure 81 présente les concentrations horaires du BC enregistré à Alger (Bouzaréah) et en Crète (Grèce) durant l'année de mesure.

A Crète les teneurs horaires de BC sont en général inférieures à $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, avec quelques pics atteignant $5,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A Bouzaréah, par contre, les moyennes horaires sont beaucoup plus élevées avec des pics excédant $18,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les moyennes annuelles en BC enregistrées à Bouzaréah et Crète, sont, respectivement, de $1,113$ et $0,314 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les faibles niveaux enregistrés à Finokalia, sont dus, seulement, aux vents venants d'Europe, vu que le parc automobile n'est pas très dense, excepté l'aéroport de Heraklion, qui est très fluide en été, ainsi que son port. Il y a également l'influence des vents du Sud/Sud-Ouest venant du Sahara où il y a des activités pétrolières (Libye et Algérie).

La différence de niveaux de pollution entre Crète et Bouzaréah est due, principalement, au fait que Bouzaréah fait partie de la grande agglomération d'Alger où on retrouve un trafic routier très dense et qui est exposée à d'importantes sources de pollution (Europe au Nord, Activités pétrolières au Sud et Sud-Est, émissions de cimenteries, etc.). Bouzaréah qui se trouve sur le point le plus élevé de la ville d'Alger subit la pollution provenant de toutes les directions.

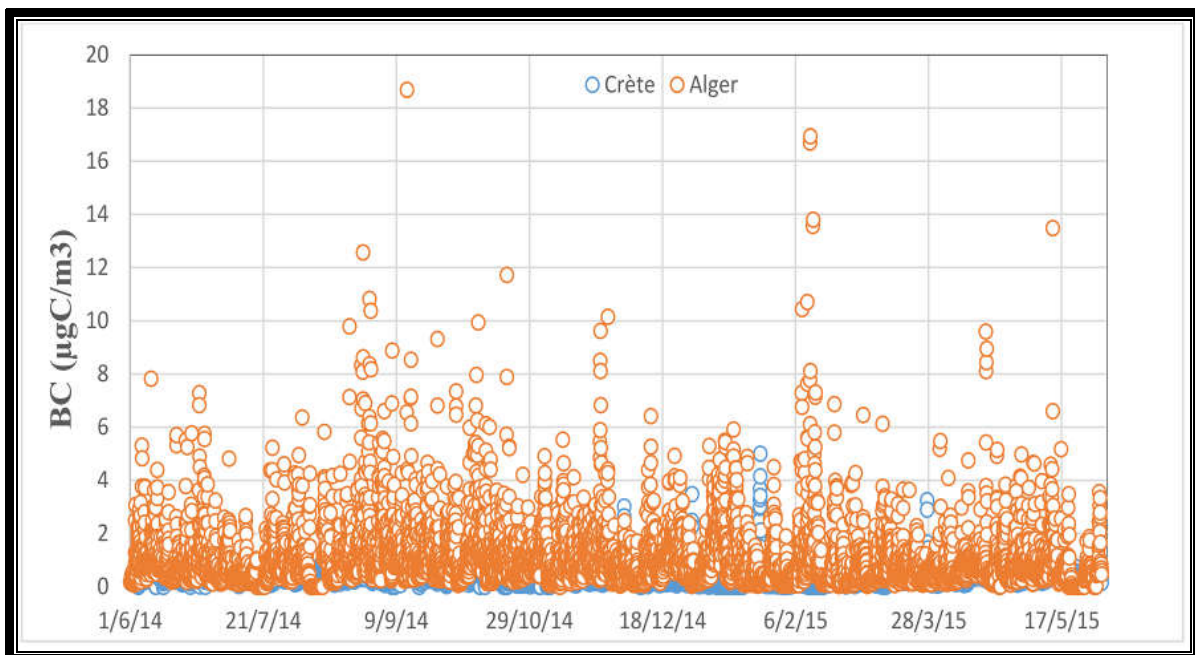


Fig. 81. Variation horaire des niveaux de BC à Alger et Crète (Grèce)

○ Variation journalière

Les niveaux journaliers de BC enregistrés à Alger (Bouzaréah) et Crète durant l'année de mesures sont présentés sur la figure 82.

Nous remarquons que les moyennes journalières de BC à Alger varient de $0,000$ à $4,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, quant à celles de Crète, elles se situent entre $0,000$ et $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ces résultats montrent que le niveau de pollution par le BC est trois fois plus élevé à Alger qu'en Crète, ce qui confirme l'effet de la pollution dû au parc automobile d'Alger, et qu'Alger est plus proche de la source principale de pollution que la Crète, qui se situe au milieu de la mer.

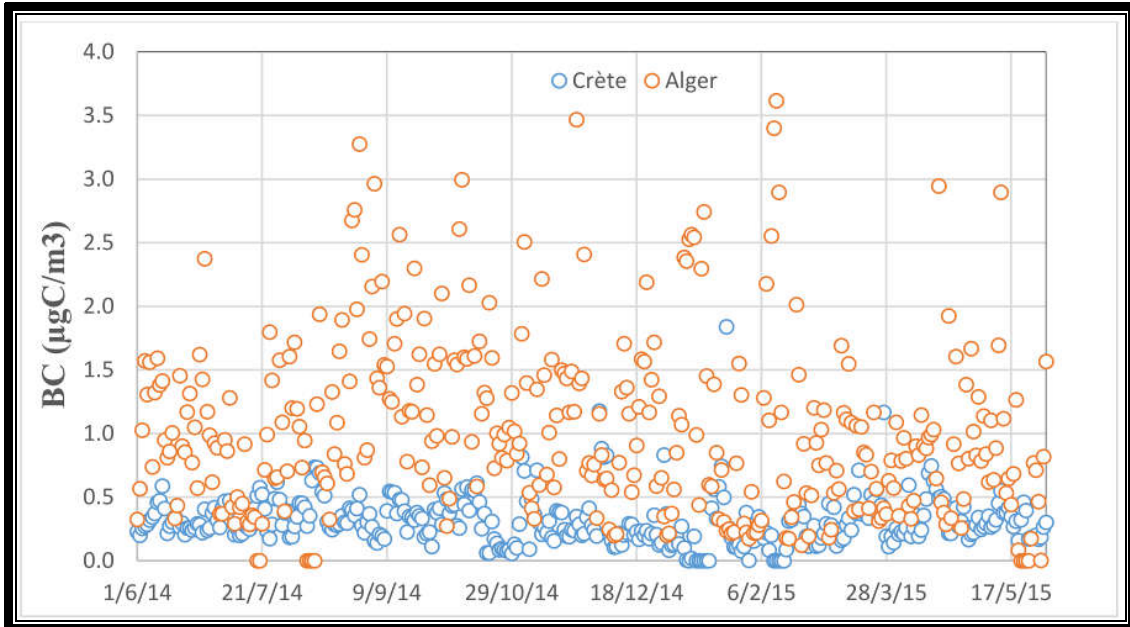


Fig. 82. Variation journalière des niveaux de BC à Alger et Crète (Grèce)

○ Variation mensuelle

Les variations mensuelles des niveaux de BC enregistrés à Alger (Bouzaréah) et en Crète durant l'année de mesures sont présentées dans la figure 83.

Nous remarquons que les moyennes mensuelles de BC enregistrées à Alger varient de 0,600 à 1,500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Toutefois, celles de Crète se situent entre 0,180 et 0,400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Le mois de septembre représente le maximum de BC à Alger, ce qui équivaut 5 fois la moyenne de BC enregistrée en Crète, en raison des feux de forêts enregistrés durant ce mois-ci en Algérie et au Sud-Ouest de l'Europe. Le mois de février est caractérisé par une moyenne mensuelle plus faible en BC avec 0,194 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, malgré l'utilisation du bois de chauffage par les citoyens de l'île et en Europe, ce qui donne les mêmes niveaux de BC_{wb} à Alger en hivers (0,199 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en janvier 2015), confirmant les mêmes sources d'émission.

Les moyennes mensuelles enregistrées en Crète sont très proches, malgré le nombre de touristes visitant l'île entre avril et octobre, d'environ 3 500 000⁵, représentant 6 fois la population de l'île. Ces résultats confirment que la source de BC, enregistrée à Finoklia, est, principalement, due à des sources extérieures.

⁵ (www.flashnews.gr).

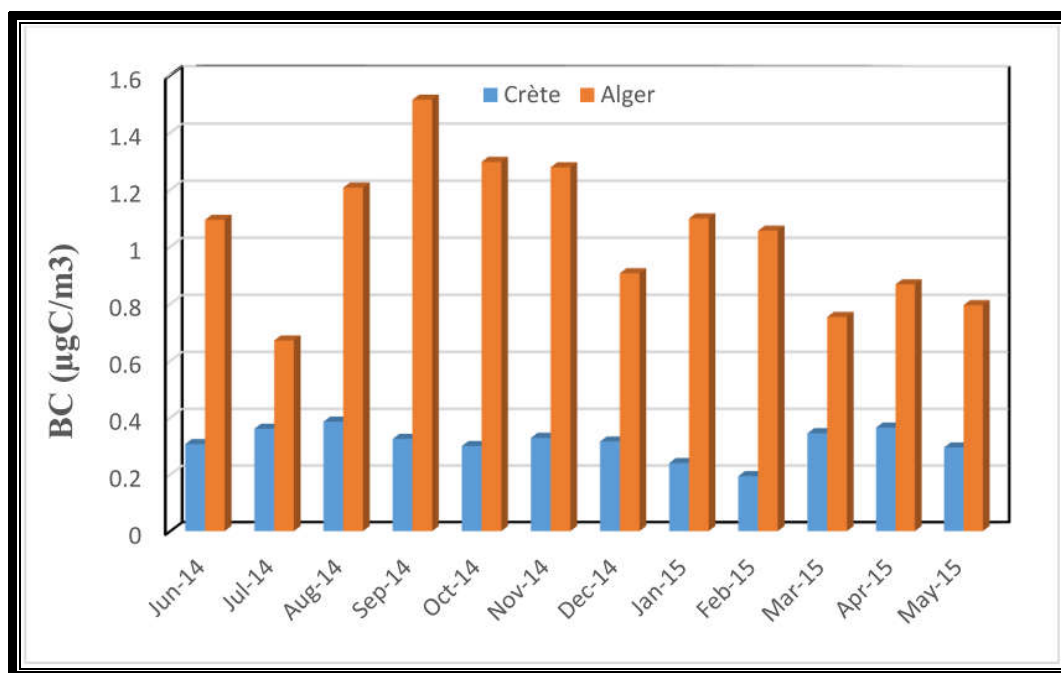


Fig. 83. Variation des moyennes mensuelles du BC à Alger et Crète

III.2. Variation des niveaux de BC à Alger-centre

Les teneurs moyennes mensuelles des polluants BC, BC_{ff} et BC_{wb} mesurées en un site urbain ouvert sur la mer à Alger-centre (Poste de mesure implanté à l'intérieur du CHU Mustapha Bacha) du 01/05/2017 au 31/10/2017 sont illustrées en figure 84.

III.2.1. Variation instantannée des niveaux de BC à Alger-centre

Les teneurs instantannées en BC et BC_{ff} enregistrées à Alger centre étaient élevées par rapport à celles enregistrées à Bouzaréah avec des concentrations majoritairement inférieures à $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, avec des pics atteignant $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour le cas des teneurs en BC_{wb} , elles étaient aussi élevées avec des concentrations inférieures à $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, et des pics atteignant $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Il est à mentionner que les rapports entre les moyennes des teneurs en BC, BC_{ff} et BC_{wb} enregistrées au site urbain d'Alger-centre et celles enregistrées à Bouzaréah ont atteint respectivement, 8,35 ; 6,83 et 41,33. Ce rapport est inquiétant vu les niveaux élevés en black carbon respiré par les habitants d'Alger-centre et des malades résidant au CHU Mustapha.

Ces niveaux élevés en BC, BC_{ff} et BC_{wb} sont dus aux activités humaines accentuées à Alger centre (parc automobile, industrie, port et aéroport et cooking), ainsi que la pollution transfrontalière.

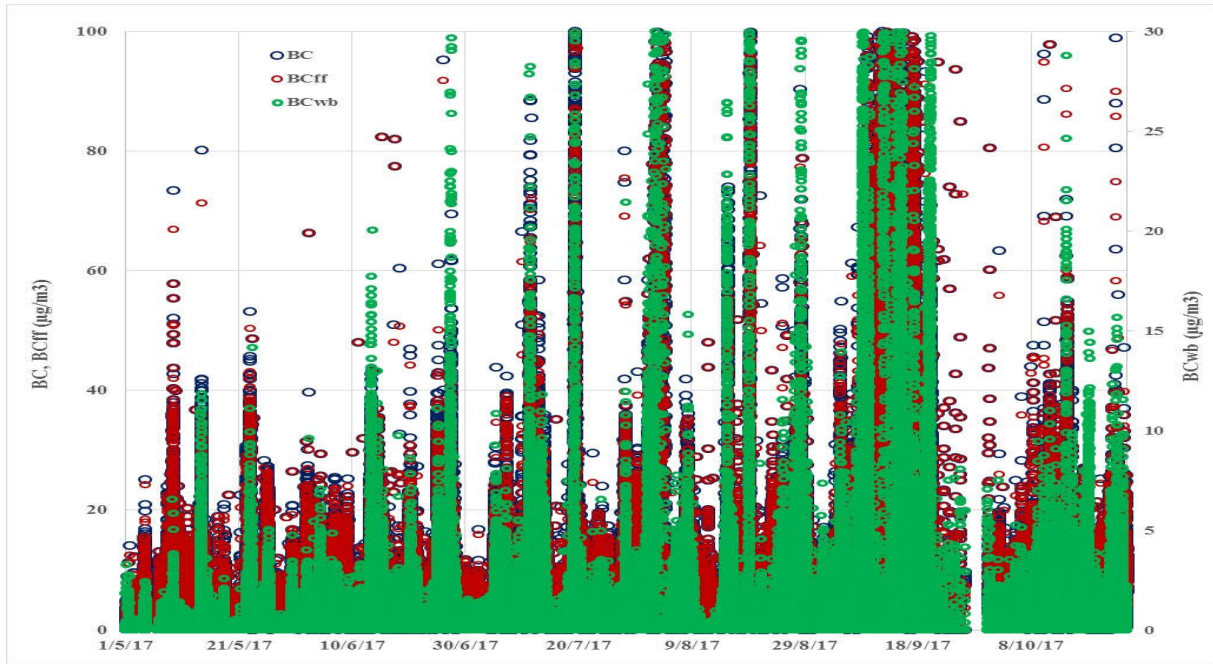


Fig. 84. Variation des concentrations du BC mesuré à Alger-centre en site urbain

III.2.2. Variation journalière des teneurs en BC à Alger-centre

La figure 85 illustre la variation des teneurs journalières en BC, BC_{ff} et BC_{wb} à Alger centre durant la période d'étude. Les teneurs moyennes journalières en BC et BC_{ff} étaient élevées avec des pics atteignant 114 µg/m³. Pour ce qui est des teneurs journalières en BC_{wb}, elles étaient très élevées comparées à celles de Bouzaréah avec des pics franchissant les 52 µg/m³.

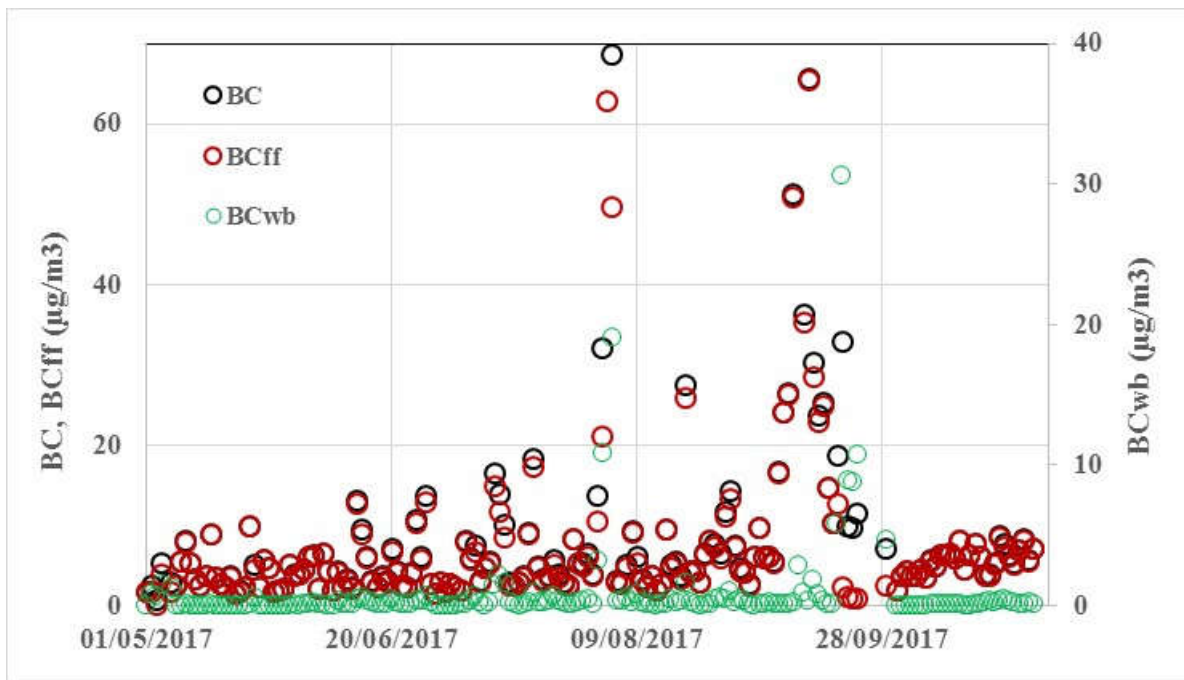


Fig. 85. Evolution des moyennes journalières du BC en site urbain à Alger-centre

III.2.3. Tenueurs annuelles moyennes, journalières et extrême du BC à Alger-centre

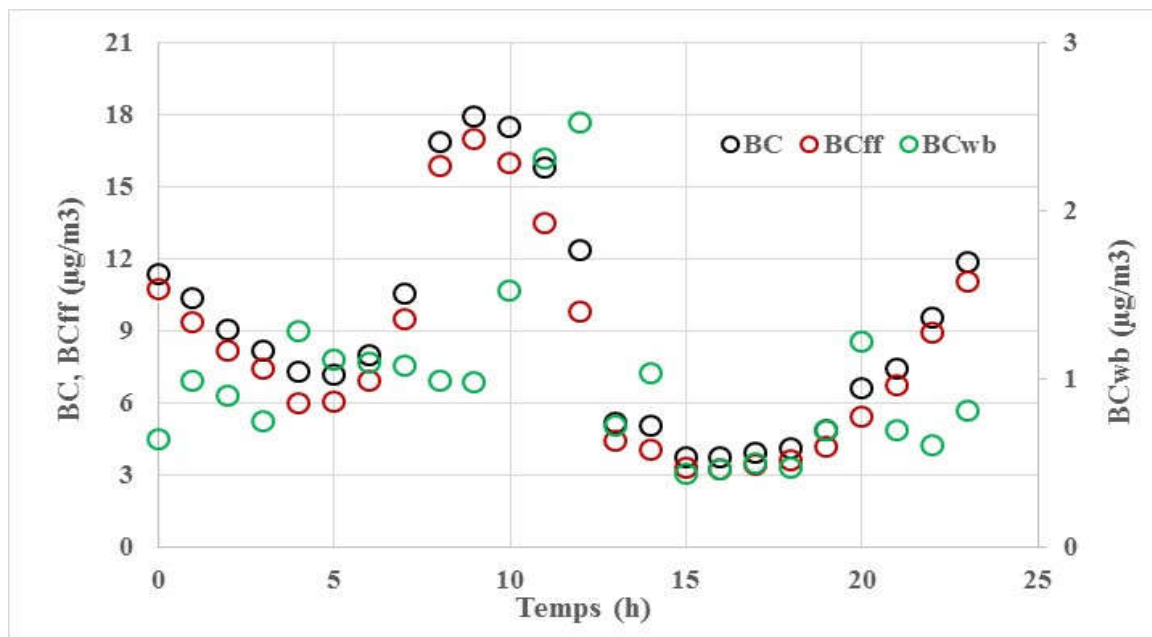
Le tableau 3 résume les teneurs annuelles, teneurs journalières moyennes et les teneurs extrêmes du BC mesuré à Alger-centre. Les résultats enregistrés à Alger-centre résumé dans le tableau 3 révèlent des rapports très élevés par rapport à ceux mesurés en site semi-urbain de Bouzaréah.

Tableau 3. Teneurs annuelles moyennes et extrêmes des trois types de black carbon à Alger-centre

	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC _{ff} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC _{wb} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC _{ff} /BC
Teneur annuelle moyenne	32,799	32,421	4,378	86,65%
Teneur journalière moyenne	8,891	7,783	1,108	87,54 %
PC95	25,923	20,487	3,325	79,03%
Teneur maximale	439 350,17	439 350,17	22 727,80	100%
Teneur journalière maximale	114,903	109,954	52,105	95,69%
Ecart-type	14,704	12,170	4,937	82,77%

III.2.4. Cycle diurne des BC mesurés à Alger-centre

La figure 86 illustre l'évolution du cycle diurne du BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant la période d'étude. Il a été remarqué que l'évolution des concentrations en BC et BC_{ff} enregistrés au site urbain d'Alger sont élevées avec des pics enregistrés entre 8h et 10h, ce qui est expliqué par le trafic routier enregistré pendant les heures de pointe. Pour le cas du BC_{wb}, les pics sont enregistrés entre 11h et midi (activités de cooking). Toutefois, les pics des concentrations en BC, BC_{ff} et BC_{wb} sont très élevés comparés à ceux du site de Bouzaréah avec un rapport de 10,72 ; 10,13 et 31,90, respectivement.



86. Cycle diurne des BC mesurés à Alger-centre en site urbain

Fig.

III.2.5. Variation des teneurs mensuelles en BC à Alger-centre

La figure 87 illustre l'évolution des teneurs mensuelles en BC, BC_{ff} et BC_{wb} en site urbain d'Alger-centre durant les mois étudiés. Les moyennes mensuelles en BC, BC_{ff} et BC_{wb} variaient entre (3,703 ; 3,532 et 0,171 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en mai et (23,416 ; 20,178 et 3,238 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en septembre, respectivement.

Les moyennes mensuelles élevées durant les mois d'août et septembre sont expliquées par l'absence de précipitations d'une part et par les feux de forêts enregistrés, d'autre part. L'impact des incendies est confirmé par des moyennes mensuelles assez élevées en BC_{wb} de 3,031 et 3,238 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en août et septembre, respectivement. Les teneurs mesurées à Alger sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par Jose et al., (2016) à Hyderabad en Inde (9,84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et dépassent ceux mesurés par Reche et al., (2011) à New York (7,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et à Mexico (3,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Ces résultats élevés doivent susciter l'attention des décideurs pour prendre des mesures de réduction de ces polluants toxiques. Ces résultats élevés en BC à Alger-centre, sont, supérieurs aussi à ceux mesurés à Athènes (Grèce), confirmant la supposition précédente. Ces niveaux élevés en BC au site urbain d'Alger est dû aux multiples sources de pollution naturelles et anthropiques, locales et régionales.

Nous remarquons des pics très élevés durant les 02, 03 et 04/08/2017, avec (33,932 ; 21,066 et 10,866 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durant le 02/08/2017, (114,903, 62,798 et 52,105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour le 03/08/2017 et (68,641 ; 49,622 et 19,019 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) durant le 04/08/2019 pour le BC, BC_{ff} et BC_{wb} , respectivement. Ces moyennes très élevées en carbone suie avec des pics journaliers de BC_{wb} atteignant 68,641 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ peuvent être liés aux feux de forêts (1 604 incendies) enregistrés dans plusieurs forêts en Algérie à Béjaia, Blida, Annaba, Chlef, Aïn Defla, Tizi Ouzou, Jijel et Skikda durant la période du 1er au 5 Aout 2017. Ces feux ont ravagé une surface de 14 310 hectares, dont 4 848 ha de couvert forestier, 4 656 ha de maquis et 4 806 ha de broussailles⁶. La figure 88 présente les rétro trajetcoires des masses d'air enregistrées durant la journée du 03/08/2017 au site de mesure. La figure confirme l'arrivé des masses d'air de la région d'Ain Defla emportant les polluants dus aux feux de forêts.

⁶ (<https://cnma.dz/wp-content/uploads/2017/08/QUOTIDIEN-07-08-2017.pdf>).

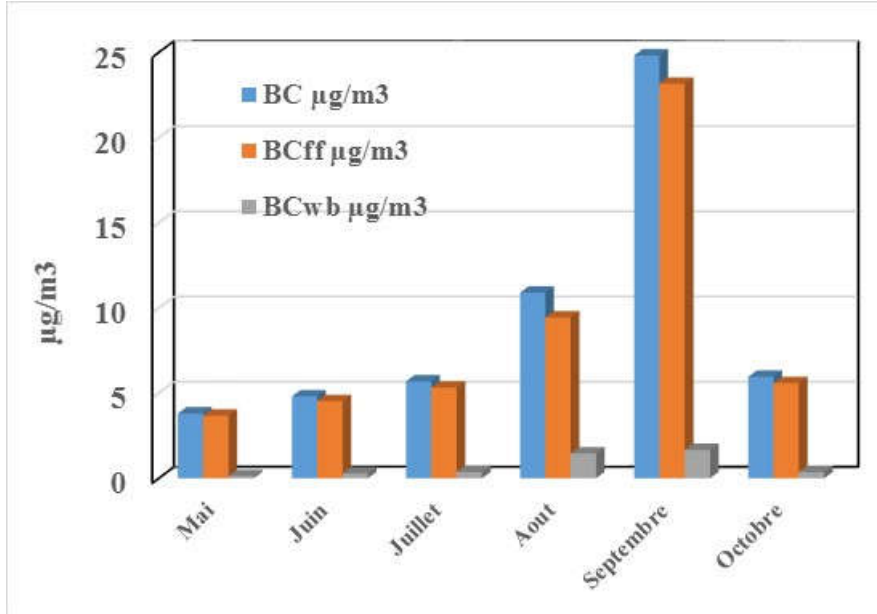


Fig. 87. Evolution des concentrations moyennes mensuelles des BC, BC_{ff} et BC_{wb} à Alger-centre

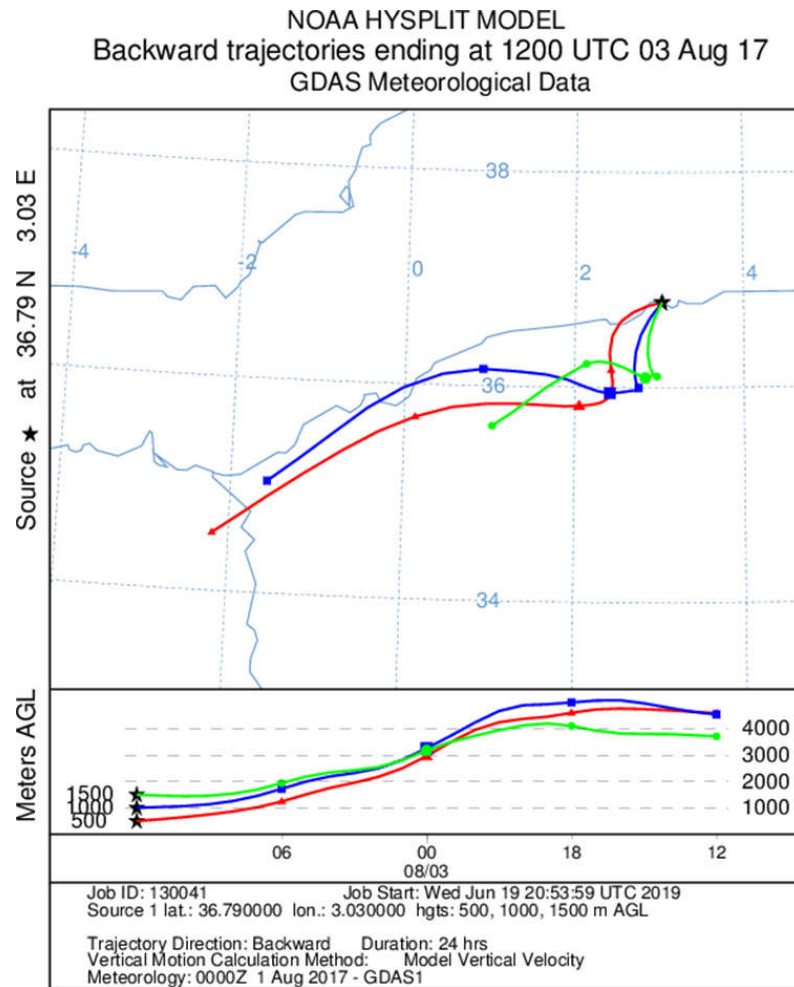


Fig. 88. Rétro trajectoires des masses d'air du 03 Août 2017 réalisées par le modèle Hysplit

D'autres pics journaliers ont été enregistrés durant les 10, 11, 12, 13 et 14/09/2017 avec (51,120 ; 112,773 ; 36,156 ; 65,634 et 30,328 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour le BC, (50,908 ; 109,954 ; 35,252 ; 65,361 et 28,496 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour le BC_{ff} et (0,213 ; 2,819 ; 0,904 ; 0,273 et 1,832 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour le BC_{wb}, respectivement. Il a été remarqué que ces pics élevés en BC et BC_{ff} ont été accompagnés par des moyennes basses en BC_{wb}, ce qui révèle que la source de ces pics élevés en BC n'est pas due aux feux de forêts. En vu de confirmer la source des masses d'air durant la journée du 11 septembre 2017, une carte des rétro trajectoires des masses d'air a été réalisée à l'aide du modèle Hysplit (figure 89). La carte des rétro trajectoires montre que la source de pollution par le BC_{ff} était d'Espagne, où, il y'a eu une utilisation massive de carburants fossiles dans le domaine du transport routier, ferroviaire, aérien et naval.

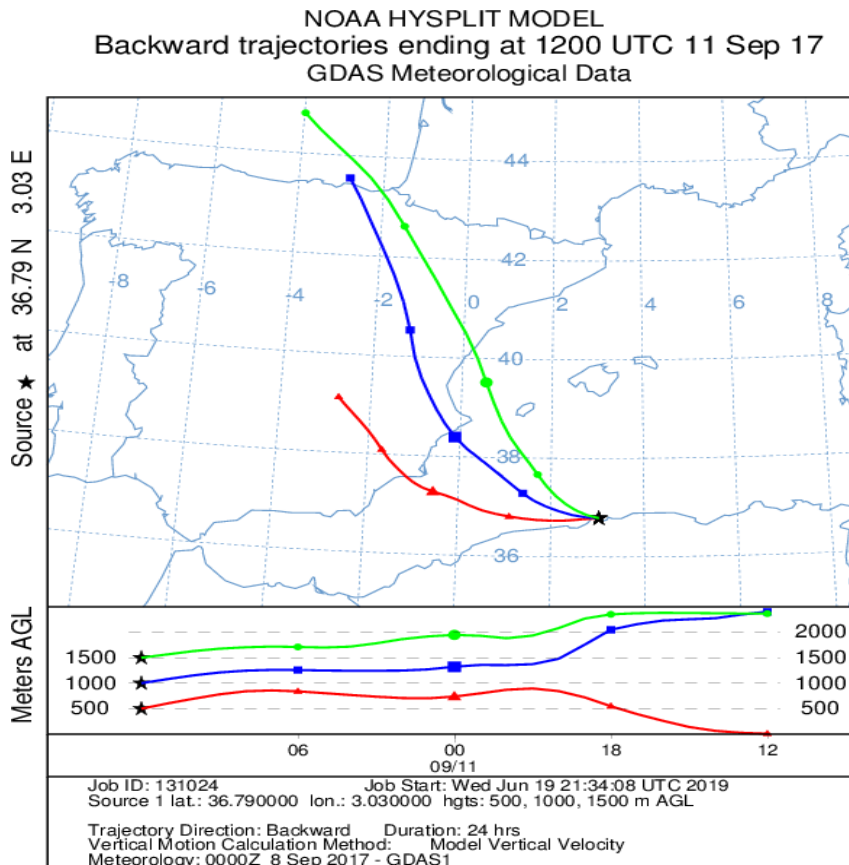


Fig. 89. Rétro trajectoires des masses d'air du 11 Septembre 2017 réalisées par le modèle Hysplit

III.2.6. Variation hebdomadaire - Effet du week-end à Alger-centre

La figure 90 illustre la variation hebdomadaire des teneurs en BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant la période d'étude. En Algérie, c'est surtout le vendredi, premier jour du week-end qui est considéré comme jour de repos. Le samedi, deuxième jour du week-end, connaît d'intenses activités du secteur privé et est souvent comparable à un jour normal de semaine.

Les teneurs moyennes en BC et BC_{ff} variaient de 6 à 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec un pic le jeudi, suivi par le mercredi. Toutefois le samedi a enregistré la valeur la plus faible contrairement au vendredi (week-end). Le BC_{wb} a enregistré un optimum le jeudi (3,829 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), suivi par le mercredi (2,893 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et un minimum le dimanche (0,611 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Ces résultats peuvent être expliqués par le trafic routier dense à Alger-centre indépendamment des jours de la semaine d'une part, et aux sources de pollution venant des autres villes d'Algérie et des sources transfrontalières d'autre part (cooking et chauffage au bois et au charbon).

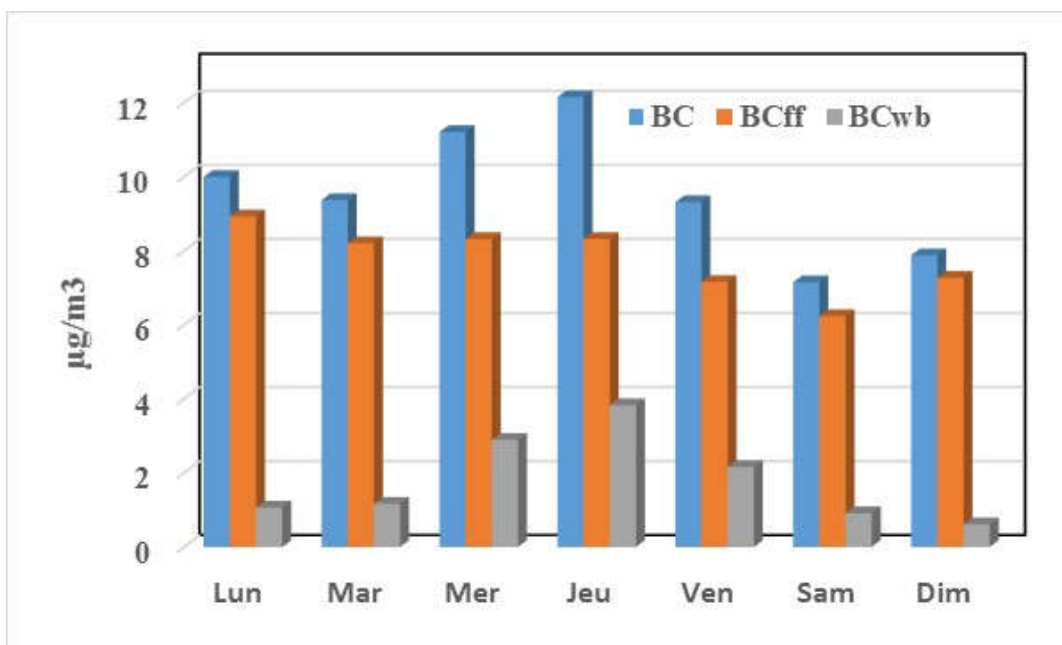


Fig. 90. Teneurs moyennes en BC, BC_{ff} et BC_{wb} des jours de la semaine durant l'année de mesure

III.2.7. Variation des teneurs en BC durant les heures de pointe à Alger-centre

La figure 91 présente l'évolution des teneurs en BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant les heures de pointe à Alger centre (7h-9h). Les teneurs en BC et BC_{ff} sont généralement inférieures à 15 µg/m³ avec des pics atteignant 60 µg/m³. Ces teneurs élevées en BC et BC_{ff} sont dues aux trafic routier dense à Alger-centre lors des heures de pointe. Par contre, les teneurs en BC_{wb} étaient très faibles durant les heures de pointe, ce qui s'explique par l'absence des activités de cooking la matinée, d'une part, et du chauffage au bois en Algérie, d'autre part.

Toutefois, les moyennes des teneurs en BC, BC_{ff} et BC_{wb} enregistrées durant les heures de pointe à Alger-centre sont très élevées par rapport à celles mesurées à Bouzaréah d'un rapport de 11,88 ; 11,50 et 23,59, respectivement.

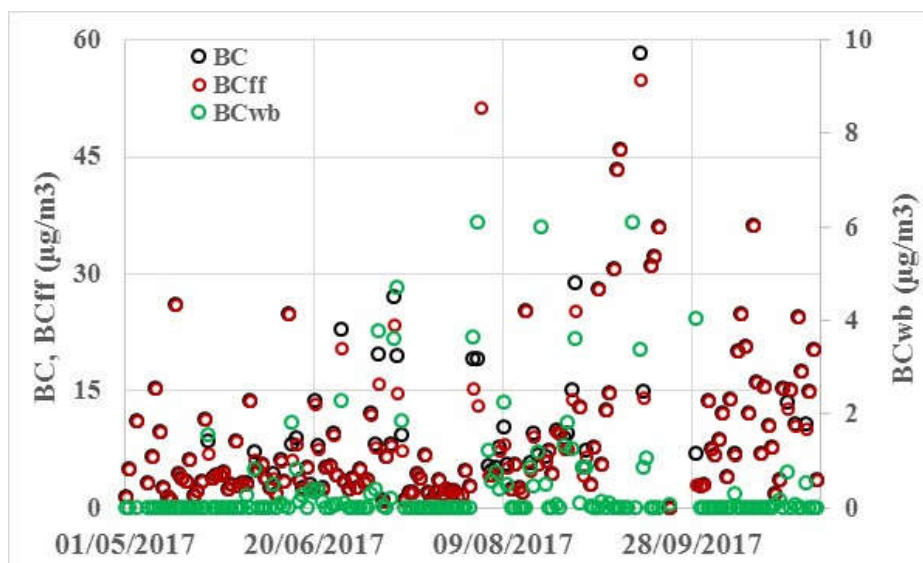


Fig. 91. Teneurs moyennes en BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant les heures de pointe à Alger-centre (7h-9h)

III.2.8. Comparaison des niveaux de BC mesuré à Alger et à Tamanrasset

Dans ce qui suit, nous allons établir une comparaison des niveaux de BC enregistrés à Alger avec ceux de la station de l'Organisation Météorologie Mondiale (OMM) à l'Assekrem (Tamanrasset), où l'environnement est loin de toute influence anthropique. La station est à 2 370 m d'altitude, une latitude 22,79°N et une longitude 5,53°E.

Le but de cette comparaison est d'examiner les niveaux de BC en l'absence de toute activité humaine, bien que les données soient anciennes (1997), contrairement à Alger, mégacité pleine de sources de pollution.

Nous remarquons que les niveaux de BC entre les mois d'avril et mai 1997, obtenus à la station Assekrem de Tamanrasset, varient de 0 à 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, contrairement à Bouzaréah où les concentrations de BC se situent entre 0 et 10,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figure 92).

Les moyennes mensuelles de BC, enregistrées en avril et mai, à Tamanrasset sont, respectivement, de 0,147 et 0,190 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, contre 0,868 et 0,794 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Bouzaréah.

Les niveaux de pollution en BC à Bouzaréah durant les mois d'Avril et Mai 2015 sont 5 fois plus élevés que ceux de Tamanrasset, imputables aux activités humaines à Alger et les wilayas limitrophes, ainsi que la pollution venant d'Europe et celle des activités pétrolières. Les faibles niveaux de pollution atmosphérique à l'Assekrem expliquent le choix de ce site par l'OMM, et révèlent que la source anthropique de pollution par le BC à Alger est évaluée à 79,78%.

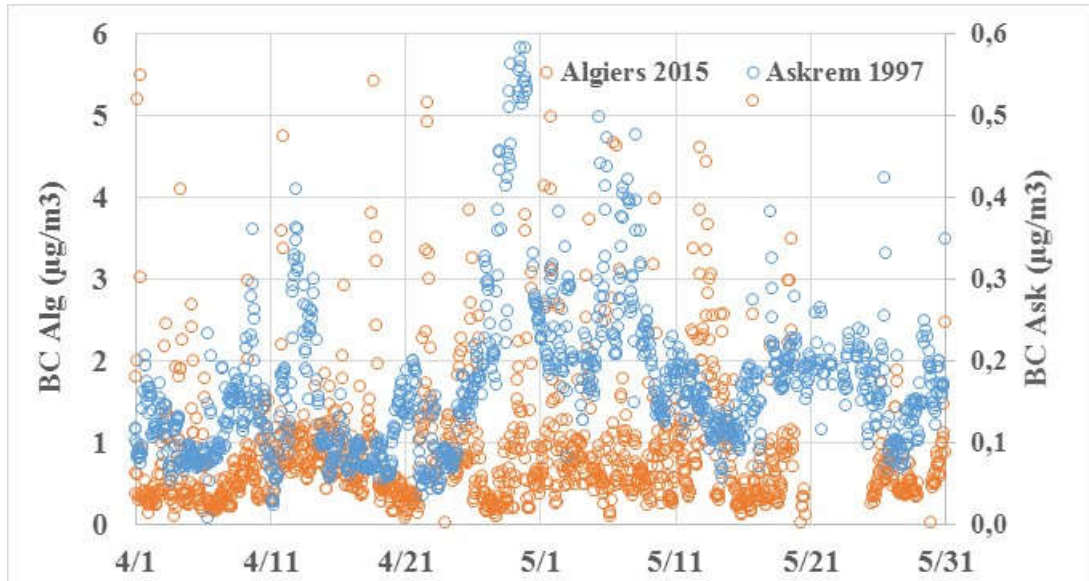


Fig. 92. Comparaison des niveaux de BC mesurés à Alger et à Tamanrasset

La comparaison intersites que nous donnons en tableau 4 montre clairement les différences dans les niveaux de pollution par le BC atteint selon la nature du site.

Tableau 4. Comparaison des niveaux de pollution par le BC selon la nature du site

Type de site	Lieu	BC Moyenne journalière en $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Site urbain	Alger-centre	8,891
	Athènes (Grèce)	1,541
Site semi-urbain	Bouzaréah (Alger)	1,113
Site rural	Crête (Grèce)	0,314
Site naturel	Assekrem (Tamanrasset)	0,168

Dans le même ordre d'idée, on relève que, comparé au niveau de fond naturel de Tamanrasset, la part de la source anthropique du BC à Alger-centre (en milieu urbain) contribue à plus de 98,11% du taux global enregistré.

III.2.9. Le black carbon et le rayonnement solaire

Comme suite à l'étude préliminaire, allons examiner dans cette partie la relation existant entre la variation des niveaux de BC et l'irradiation normale directe à l'observatoire de Bouzaréah (Alger). Cette étude permet, donc, d'introduire l'impact de la pollution atmosphérique par le BC sur le rendement des énergies renouvelables (mirroirs et héliostats et panneaux photovoltaïques).

a. Variation du DNI avec le BC durant l'année de mesure

La figure 93 présente les variations de concentrations de BC et les niveaux de DNI durant l'année de mesure.

Nous constatons qu'il existe une relation entre les pics de BC et la diminution du DNI. Cette relation, inversement proportionnelle, est due à l'absorption du rayonnement solaire direct par des niveaux élevés de BC. Nous observons des pics de DNI excédant 950 Wh/m^2 , et d'autres inférieurs à 600 Wh/m^2 , tel le cas du 24 novembre 2014, où les pics de BC ont dépassé $45,000 \mu\text{g/m}^3$. Vu que la diminution du DNI dépend aussi de l'état du ciel (nuages et poussières), nous allons détailler cette relation dans la suite de cette étude.

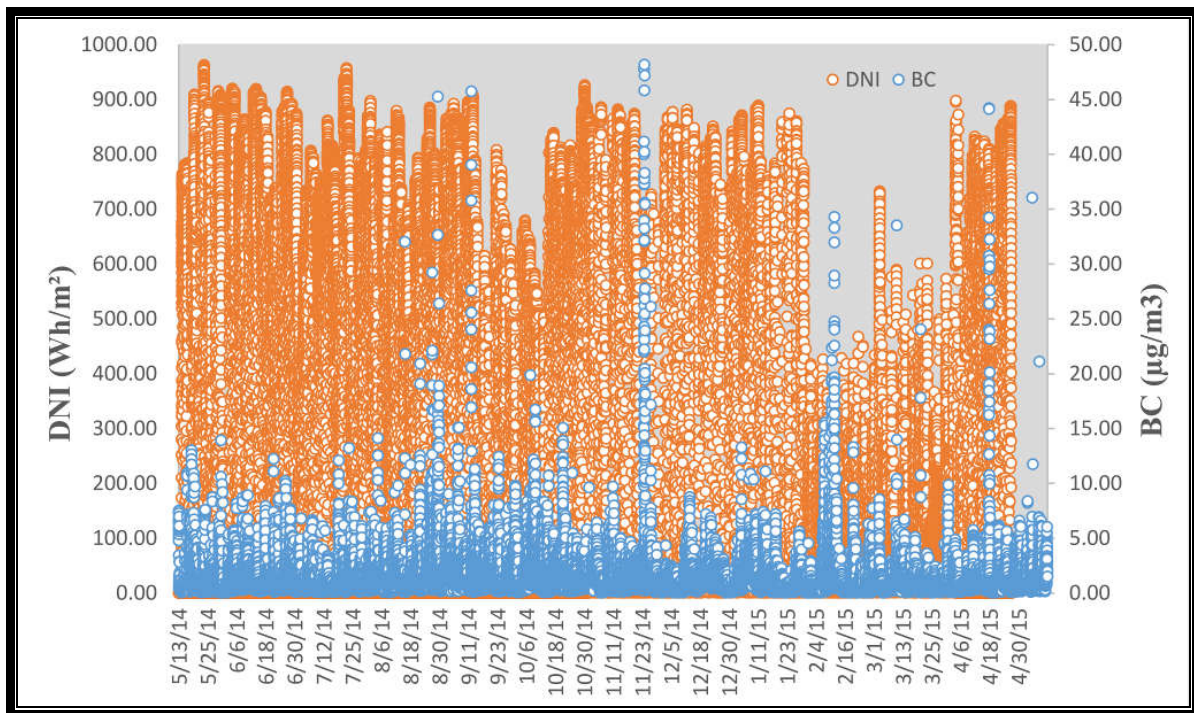


Fig. 93. Variation des niveaux de BC et DNI durant l'année de mesure

b. Variation du DNI avec le BC dans les journées à ciel clair

Afin d'étudier la diminution du DNI due seulement à la pollution par le BC, nous avons choisi d'étudier les résultats obtenus durant les jours sous ciel clair (nébulosité = 0) entre 8AM et 6PM. Les niveaux de nébulosité ont été mesurés par l'Office Nationale de la Météorologie. Les journées étudiées, ci-après, sont caractérisées par un ciel clair.

Les résultats de l'impact de la nébulosité sur le ciel clair ont été confirmés par le modèle MODIS établi par la NASA comme le présente les deux figures 94 et 95.

Nous remarquons que le ciel est dégagé durant la semaine qui inclut la journée du 9 Juin 2014, ce qui confirme les résultats de l'ONM.

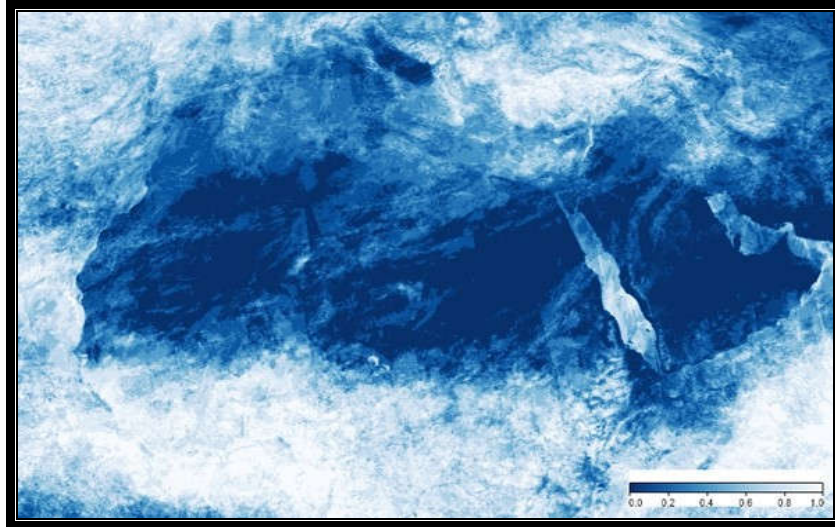


Fig. 94. Etat du ciel dans la semaine incluant la journée du 9 Juin 2014

La Figure 95, obtenue par le modèle MODIS, présente l'état du ciel durant la semaine incluant la journée du 25 Août 2014. Nous remarquons que le ciel dans le Nord Algérien est dégagé, ce qui confirme les résultats de l'ONM (nébulosité).

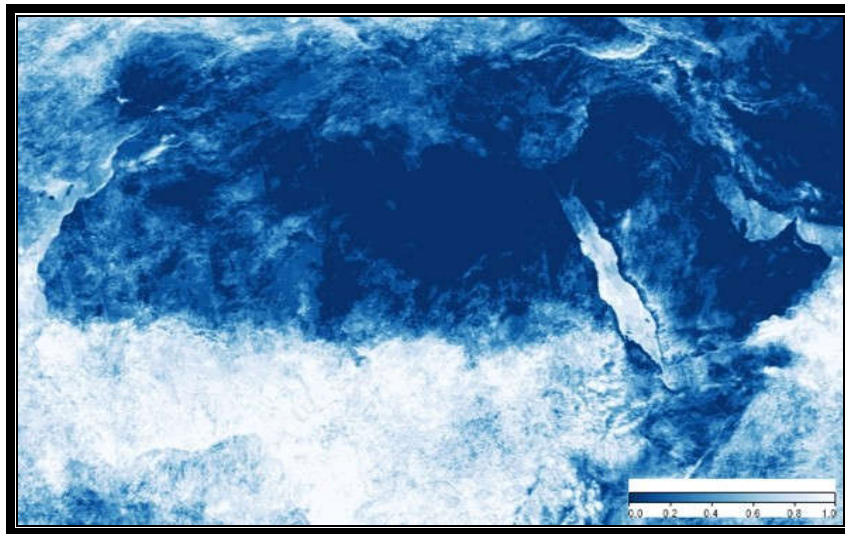


Fig. 95. Etat du ciel dans la semaine incluant la journée du 25 Août 2014

Nous présentons aux Figures 96 et 97 la variation de l'épaisseur optique des aérosols durant les semaines incluant les journées du 9 Juin 2014 et du 25 Août 2014 ; cette variation est obtenue par MODIS. Nous remarquons que l'épaisseur optique tourne autour de 0,3 dans les zones cotières Algériennes pour la semaine du 9 Juin et 0,2 pour celle du 25 Août, ce qui confirme la présence d'aérosols dans la zone d'étude.

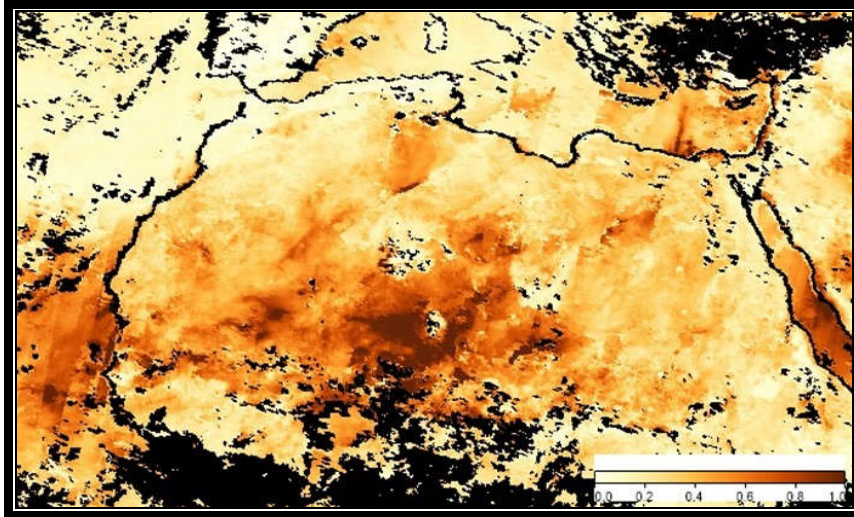


Fig. 96. Epaisseur optique des aérosols durant la semaine incluant le 9 Juin 2014

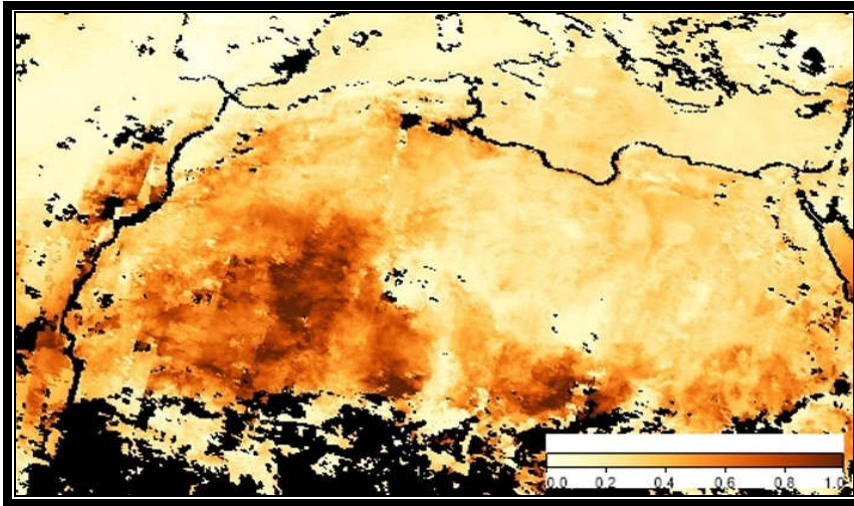


Fig. 97. Epaisseur optique des aérosols durant la semaine incluant le 25 Août 2014

La Figure 98 présente les pourcentages de particules fines durant la semaine incluant la journée du 9 Juin 2014. Nous remarquons que la région du nord Algérien a connu des pourcentages de particules fines allant de 0 à 20% de la totalité des matières particulaires, ce qui confirme la présence de fines et micro-particules comme le BC. Pour le cas de la méditerranée, nous remarquons que la fraction de particules fines varie de 50 à 90%, soit 60% environ du côté des villes cotières Algériennes.

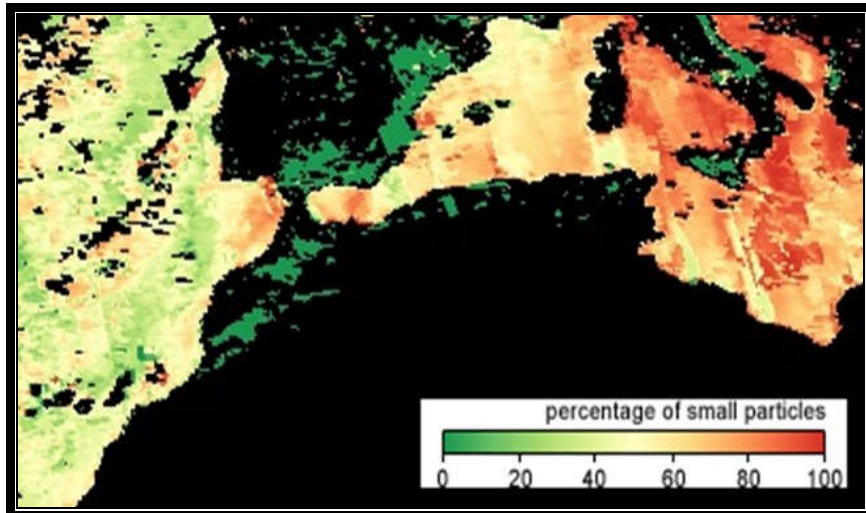


Fig. 98. Pourcentage des particules fines durant la semaine du 9 Juin 2014

Nous présentons, également, les fractions de particules fines durant la semaine incluant la journée du 25 Août 2014, dans la Figure 99 obtenue par MODIS. Nous remarquons que les régions centre du Pays sont caractérisées par des pourcentages de 0 à 20% de particules fines, alors que les zones cotières présentent, environ, 100% de ces particules fines, ce qui nous donne une information importante sur l'absence de grosses particules (poussières), qui absorbent, également, le rayonnement. Pour le cas de la méditerranée, elle est caractérisée par des pourcentages allant de 60 à 90% de ces paricules fines.

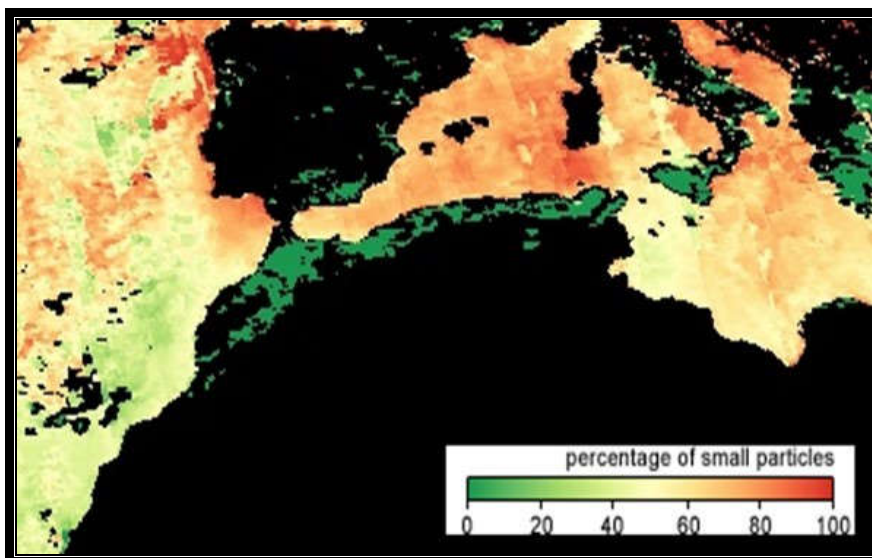


Fig. 99. Pourcentage des particules fines durant la semaine du 25 Août 2014

Le Figure 100 présente les variations des niveaux de DNI avec les concentrations de BC durant la journée du 7 Juin 2014. Nous observons une variation des concentrations de BC entre 0,000 et 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Toutefois, les niveaux de DNI diminuent de 850 à 600 Wh/m^2 . Nous observons que le DNI diminue avec l'augmentation du BC.

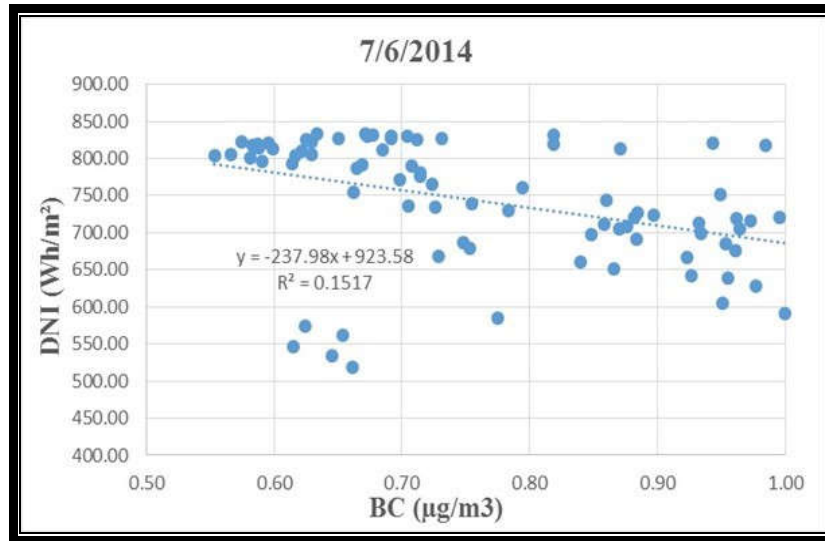


Fig. 100. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 07/06/2014

Les variations de niveaux de BC et DNI durant la journée du 9 Juin 2014 sont présentées à la Figure 101. Nous observons que le BC varie entre 0,250 et 2,400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cependant, le DNI diminue de 900 à 450 Wh/m^2 . La relation, inversement proportionnelle, est, également, observée durant cette journée. Le 9 juin 2014, nous avons enregistré une forte diminution du DNI, estimée à 30,2%.

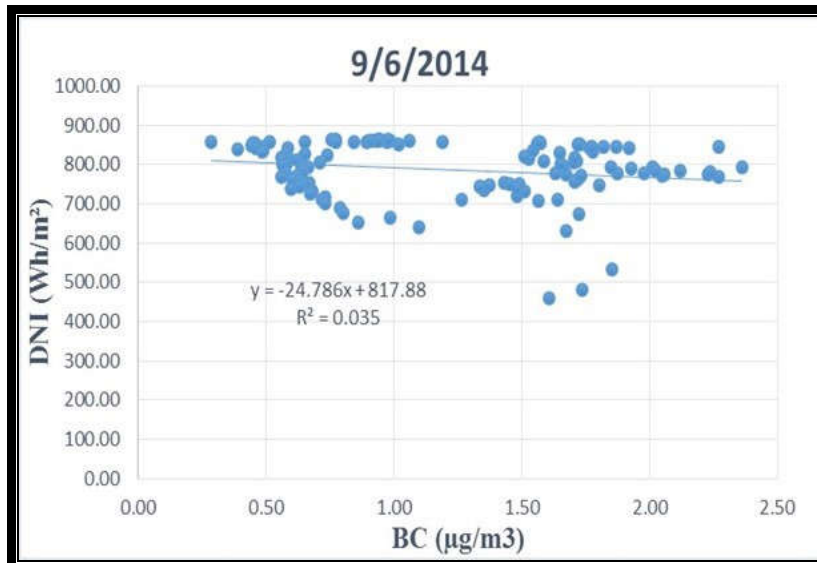


Fig. 101. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 09/06/2014

Nous présentons à la Figure 102 la variation du DNI avec le BC durant la journée du 5 Juillet 2014. Les concentrations de BC varient de 0,200 à 2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, quant au DNI, les valeurs diminuent de 750 à 500 Wh/m^2 . La relation, inversement proportionnelle, entre le BC et le DNI est vérifiée aussi pour cette journée.

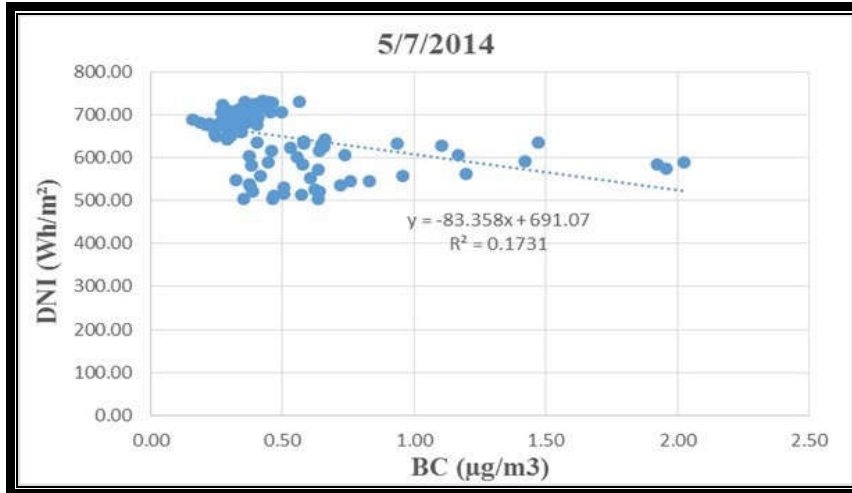


Fig. 102. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 05/07/2014

La Figure 103 présente l'évolution du DNI en fonction des niveaux de BC durant la journée du 17 Juillet 2014. Les niveaux de BC varient de 0,800 à 2,800 µg/m³ ; par contre, le DNI diminue de 800 à 460 Wh/m². Il ressort que le DNI diminue avec l'augmentation du BC.

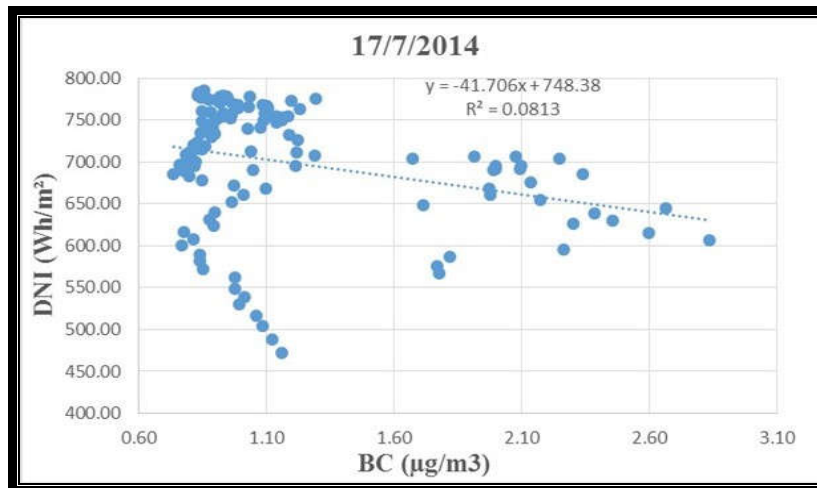


Fig. 103. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 17/07/2014

Les variations des niveaux de DNI avec le BC durant la journée du 31 Juillet 2014 sont présentées à la Figure 104. Les concentrations de BC varient de 0,200 à 3,500 µg/m³. Toutefois, les niveaux de DNI diminuent de 900 à 600 Wh/m². Il apparaît que le DNI diminue avec l'augmentation du BC.

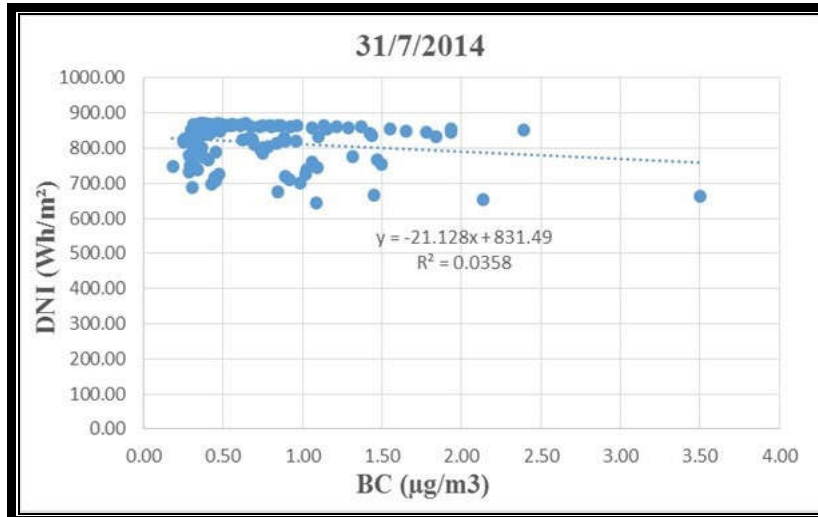


Fig. 104. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 31/7/2014

Les variations des niveaux du DNI avec le BC durant la journée du 1^{er} Août 2014 sont présentées à la Figure 105. Nous observons que le BC varie de 0,500 à 3,200 µg/m³; cependant, le DNI diminue de 900 à 500 Wh/m². Une relation, inversement proportionnelle, à été remarquée entre le BC et le DNI.

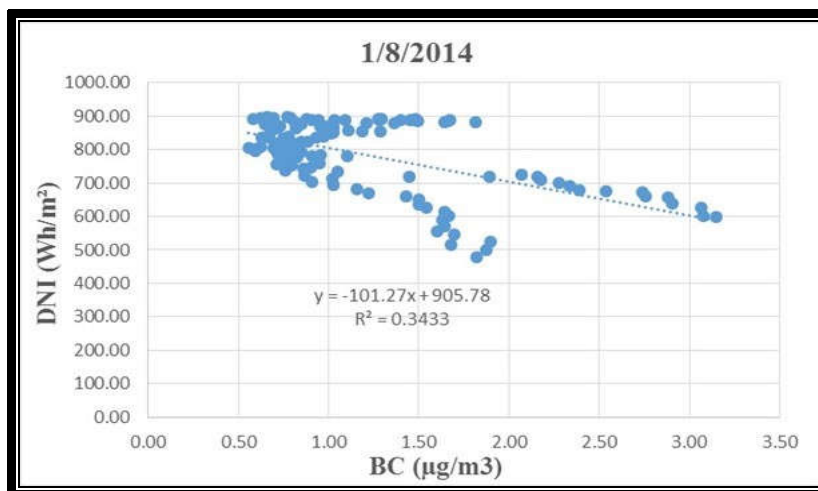


Fig. 105. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 01/08/2014

La figure 106 présente les variations des niveaux de DNI en fonction des concentrations de BC durant la journée du 25 Août 2014.

Nous observons des variations de BC allant de 0,600 à 6,500 µg/m³; par contre, les niveaux de DNI diminuent de 850 à 550 Wh/m² suivant une relation inversement proportionnelle.

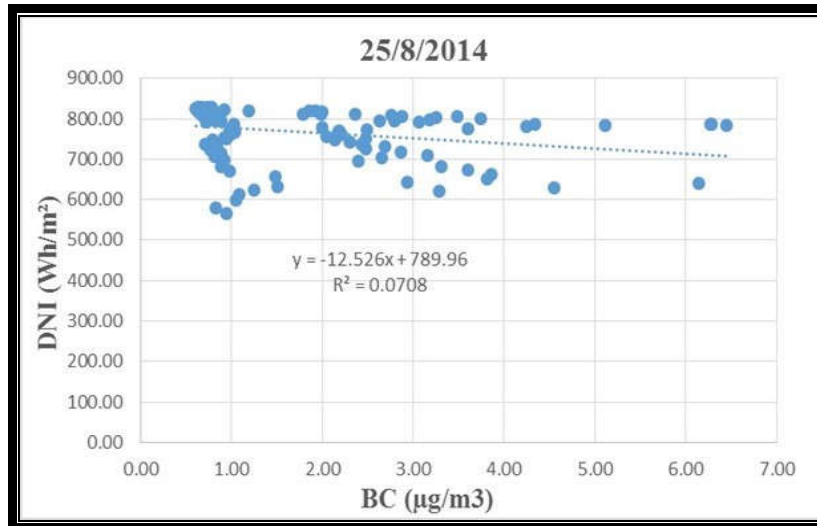


Fig. 106. Variation du DNI avec le BC durant la journée du 25/08/2014

Le tableau 5 présente les taux optimums de diminution du DNI selon le niveau de la couche limite atmosphérique des journées étudiées. Nous remarquons que le maximum a été enregistré le 9 Juin 2014 avec 30,2%, suivi de la journée du 31 Juillet 2014 avec 26,6%. Les niveaux de la CLA étaient pourtant élevés durant ces journées, ce qui montre que cette pollution par le BC est indépendante de la CLA, et qu'elle aurait pu donner des taux de diminution de DNI plus élevés, si la CLA était plus basse.

Tableau 5. Variation de la baisse des taux d'énergie lors de deux journées à ciel clair (les 18 avril 2017 et 10 mars 2017) due au BC

Jour	Teneur en BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Diminution maximale du DNI (%)	Couche limite (m)
7/6/2014	0,774	19,9	4 545
9/6/2014	1,590	30,2	5 172
27/6/2014	1,424	19,3	5 005
14/6/2014	0,858	25,9	4 120
5/7/2014	0,368	24,9	4 871
17/7/2014	0,357	13,3	5 166
31/7/2014	0,702	26,6	5 293
1/8/2014	1,604	15,3	4 817
13/8/2014	1,939	18,5	4 828
25/8/2014	1,409	16,4	5 302

L'énergie perdue le 09 Juin 2014 durant 10 heures estimée est de 4681 Kwh/m², ce qui paraît très important pour une grande superficie (4412 GWh pour Alger et 12 992 396 GWh pour tout le territoire).

III.2.10. Le BC et les énergies renouvelables

La comparaison des données enregistrées par les trois stations solaires photovoltaïques du CDER, composées de 30 panneaux chacune, avec les niveaux de pollution en BC durant les jours à ciel clair a donné les résultats portés au tableau 6. Les taux journaliers d'énergie solaire perdue, lorsque la moyenne journalière de BC était de 1,507 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, varient de 13,82 à 16,61%. Les taux d'énergie horaire perdue ont atteint 21,5%, lorsque la moyenne horaire de BC était maximale (2,45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Les taux d'énergie perdue ont atteint des maximums de 36,5%, lorsque la moyenne horaire de BC était de 1,71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. On observe qu'il y a, également, une importante diminution, même lorsque la moyenne horaire de BC était minimale (0,24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), induisant ainsi des taux d'énergie perdue allant, selon la station, de 13,75 à 19,30%. Ces résultats montrent que la diminution peut être due à l'absorption du rayonnement solaire par d'autres aérosols, d'une part, et au dépôt de poussières, d'autre part.

Tableau 6. Variation de la baisse des taux d'énergie lors de deux journées à ciel clair (les 18 avril 2017 et 10 mars 2017) due au BC

BC et la variation de l'énergie	Station 1	Station 2	Station 3
Moyenne journalière BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,507	1,507	1,507
Moyenne journalière des taux d'énergie perdue (%)	16,04	13,82	16,61
BC horaire max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,450	2,450	2,450
Taux horaire d'énergie perdue pour le BC max (%)	19,05	14,29	21,49
Taux horaire d'énergie perdue max (%)	27,38	36,51	33,33
Moyenne horaire de BC pour l'énergie max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,710	1,710	1,580
BC horaire min ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,240	0,240	0,240
Energie horaire produite pour BC min (%)	15,79	13,75	19,30

La figure 107 présente une comparaison de l'éclairement horizontal global et la variation de puissance maximale (Pmax) d'un panneau propre et d'un autre poussiéreux. Il est clair que le panneau nettoyé connaît une production d'énergie supérieure à celle du panneau souillé. La pollution par les particules atmosphériques entraîne une diminution de l'énergie solaire de l'ordre de 6 à 15%, contre 2,76% résultant du dépôt de poussière sur les panneaux solaires.

Ainsi, tous ces résultats montrent clairement que le carbone suie et les poussières diminuent, globalement, l'intensité du rayonnement incident et joue par-là un effet direct sur le réchauffement climatique et induit la diminution de la productivité des panneaux solaires photovoltaïques.

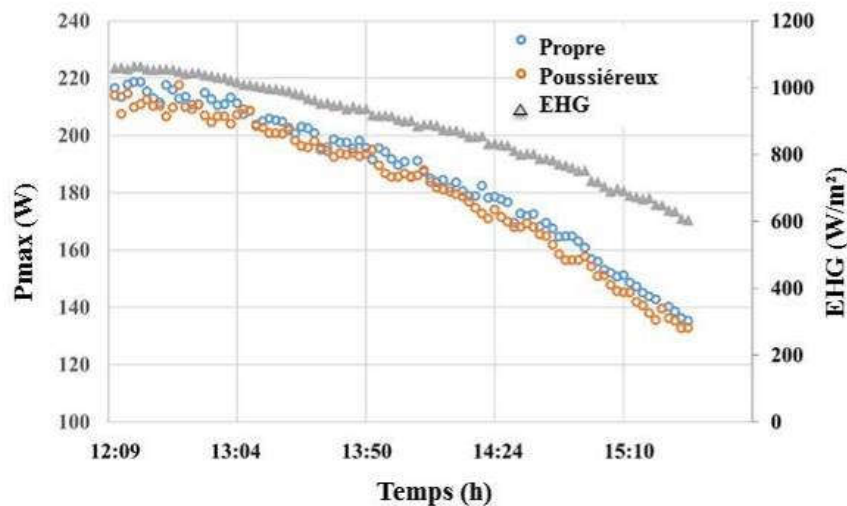


Fig. 107. Comparaison de l'éclairement horizontal global avec la variation de la puissance maximale des panneaux propre et poussiéreux.

III.3. Evolution des particules PMi

Dans la présente partie nous allons étudier l'évolution de la pollution atmosphérique par les matières particulaires.

III.3.1. PMi à Alger-centre

Les classes granulométriques des particules en suspension étudiées en milieu urbain en un site implanté à l'intérieur de l'hôpital Mustapha sont les PM1, PM2,5, PM4, PM10 et PM totales. Les PM totales représentent l'ensemble des particules en suspension qui ont une vitesse de chute négligeable, c'est en général les particules qui ont un diamètre aérodynamique inférieur à 40-50 μm . Durant la période d'étude, les PMi ont été mesurés sur 365 jours.

L'évolution des teneurs journalières en PMi mesurées à Alger-centre du 01/05/2017 au 30/04/2018, est présentée en figure 108. Le tableau 7 résume les moyennes annuelles des teneurs journalières et et les maximums journaliers des PMi mesurées.

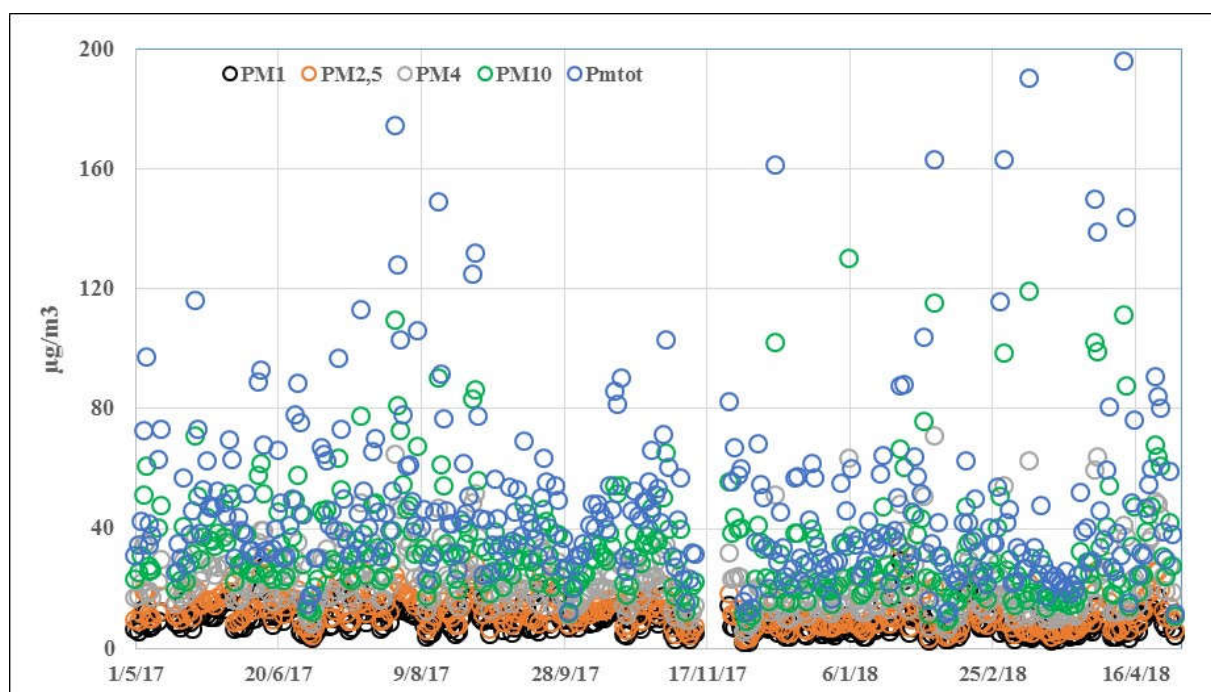


Fig. 108. Evolution des teneurs journalières des PMi mesurées à Alger-centre en site urbain

Tableau 7. Teneurs moyennes des PMi mesurées à Alger-centre en 2017/2018

	PM1	PM2.5	PM4	PM10	PMtot
Moyenne annuelle	8,739	12,135	22,063	33,626	48,163
Max	7,223	18,822	63,358	130,050	219,815

Ces résultats montrent qu'il existe, comme c'est souvent le cas en pollution atmosphérique, d'importantes fluctuations temporelles. Ces fluctuations dépendent souvent aussi bien des variations des activités humaines, du trafic routier que de l'influence des facteurs météorologiques (direction, vitesse du vent, humidité, et température).

Comme résumé en tableau 7, les teners moyennes annuelles des PM_i suivies s'élèvent respectivement à 8,739 ; 12,135 ; 22,063 ; 33,626 et 48,163 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement pour les PM₁, PM_{2,5}, PM₄, PM₁₀ et PM_{tot}.

Le rapport PM₁₀ / PM_{tot} s'élève à 0,69, ce qui signifie que les PM₁₀ qui ont un impact sur la santé constituent environ 70% de la masse des particules totales en suspension dans l'air.

Une comparaison avec les directives de l'OMS montre que :

- Pour les PM_{2,5}, la limite de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a été dépassée pendant 212 jours de l'année étudiée.
- Pour les PM-10, la limite de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a été dépassée 286 jours de l'année étudiée.

Les particules fines PM₁ ne sont pas encore réglementées.

La comparaison avec les normes algériennes (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'objectif de la qualité de l'air et 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les valeurs limites) qui sont moins sévères que celles de l'OMS ou celles de l'Union Européenne, montre que les PM_{2,5} n'ont pas dépassé les normes Algériennes, contrairement aux PM₁₀ qui ont dépassé 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 47 fois et la limite 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 15 fois durant l'année de mesure.

Ainsi les teneurs observées à Alger-centre lors de cette étude peuvent engendrer des nuisances sur les personnes hospitalisées au site de Mustapha et les résidents des zones avoisinantes. Une étude de cause à effet en collaboration avec les spécialistes des maladies pneumologiques de l'hôpital Mustapha Bacha va suivre ce travail.

En ce site de Mustapha Bacha, la journée du 6 janvier 2018 a permis d'enregistrer des maxima journaliers de pollution par les PM_{tot}, PM₁₀, PM₄, PM_{2,5} et PM₁ de 220; 130; 63; 19 et 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement, ce qui peut s'expliquer, en partie, par les vents venant du côté du Sud-Ouest algérien à Bechar et Tindouf (vent de sable) comme le montre la figure 109.

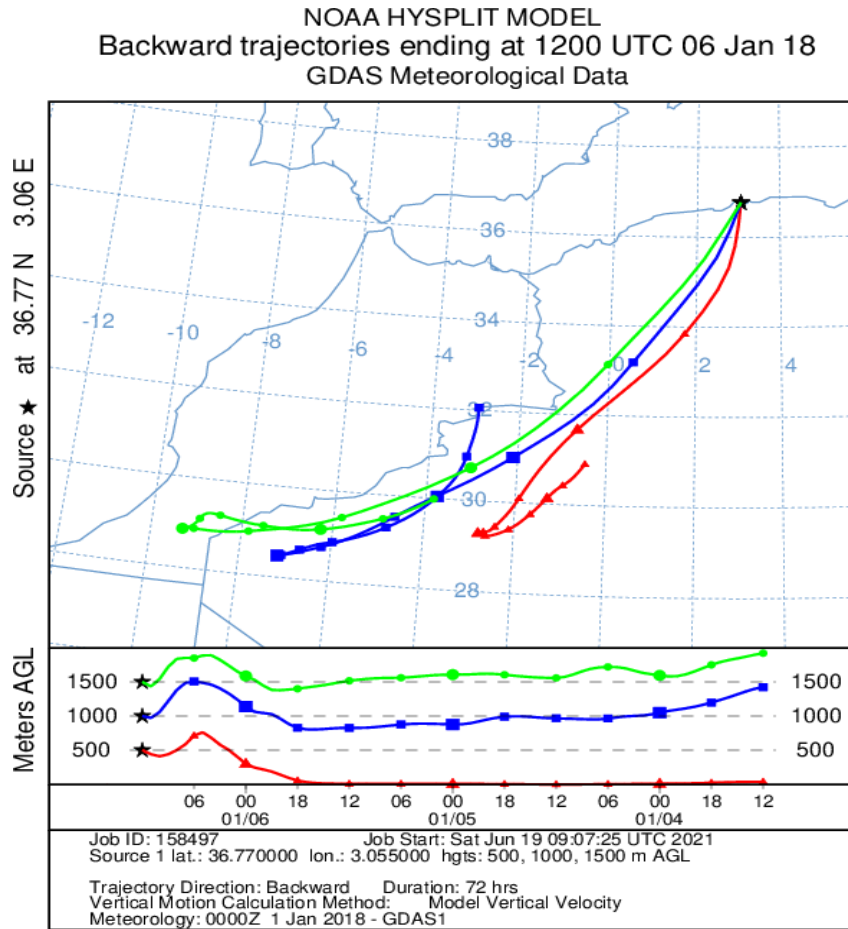


Fig. 109. Rétro-trajectoire des masses d'air du 6 Janvier 2018 suivant le Modèle Hysplit

a. Evolution mensuelle des PMi

Les moyennes mensuelles de teneurs journalières enregistrées à Alger-centre sont résumées en tableau 8 et illustrées en figure 110.

Tableau 8. Variation des moyennes mensuelles en PM1, PM2,5, PM4, PM10 et PMtot

Mois	PM1	PM2,5	PM4	PM10	Pmtot
mai-17	9,745	13,759	23,973	35,604	51,371
juin-17	11,390	15,008	24,617	35,134	49,147
juil-17	10,596	14,398	24,956	36,594	51,751
août-17	10,352	15,016	28,959	44,054	62,638
sept-17	9,919	12,864	20,871	29,833	40,882
oct-17	9,952	12,668	20,804	32,343	46,103
nov-17	7,414	10,305	19,254	31,996	47,047
déc-17	6,085	8,424	15,799	25,941	38,311
janv-18	8,642	11,688	21,374	33,882	49,369
févr-18	7,420	10,301	19,808	29,585	42,187
mars-18	4,833	7,645	16,100	25,600	38,224
avr-18	8,074	13,000	27,442	42,432	60,598

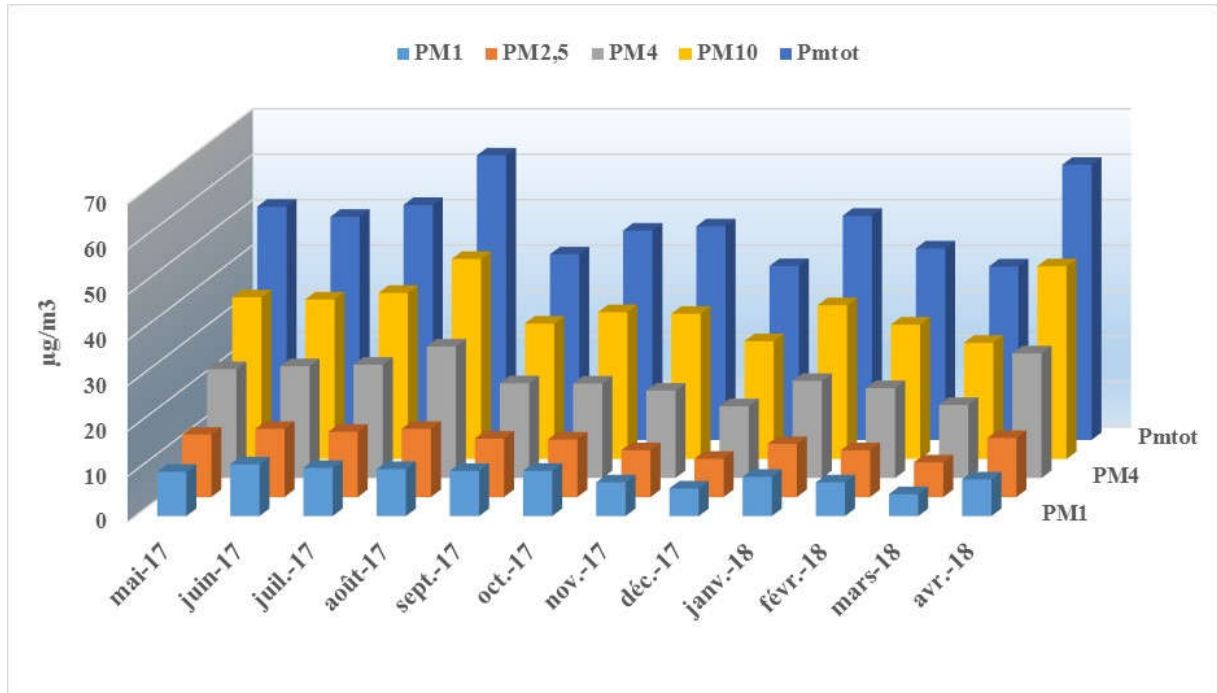


Fig. 110. Evolution des moyennes mensuelles en PM1, PM2,5, PM4, PM10 et PMtot

On relève que c'est surtout en été et particulièrement au mois d'août qu'on observe les teneurs les plus élevées dans toutes les classes granulométriques des PMi. Les teneurs les plus faibles sont mesurées en hiver et en particulier au mois de mars. Nous reviendrons plus loin sur l'étude de l'influence des facteurs météorologiques.

b. Evolution saisonnière des PMi

Les moyennes saisonnières de teneurs journalières enregistrées à Alger-centre sont résumées en tableau 9 et illustrées en figure 111.

On remarque que l'été est la saison la plus polluée en PM1, PM2,5, PM4, PM10 et PMtot, suivie par le printemps. Cependant, l'hiver est la saison la moins polluée.

Tableau 9. Variation des moyennes saisonnières en PM1, PM2,5, PM4, PM10 et PMtot

Saison	PM1	PM2,5	PM4	PM10	Pmtot
Eté	10,276	14,157	25,222	37,561	53,186
Automne	8,434	11,044	19,113	30,385	43,885
Hiver	6,950	9,846	19,009	29,728	43,434
Printemps	9,235	13,360	24,586	36,505	51,718

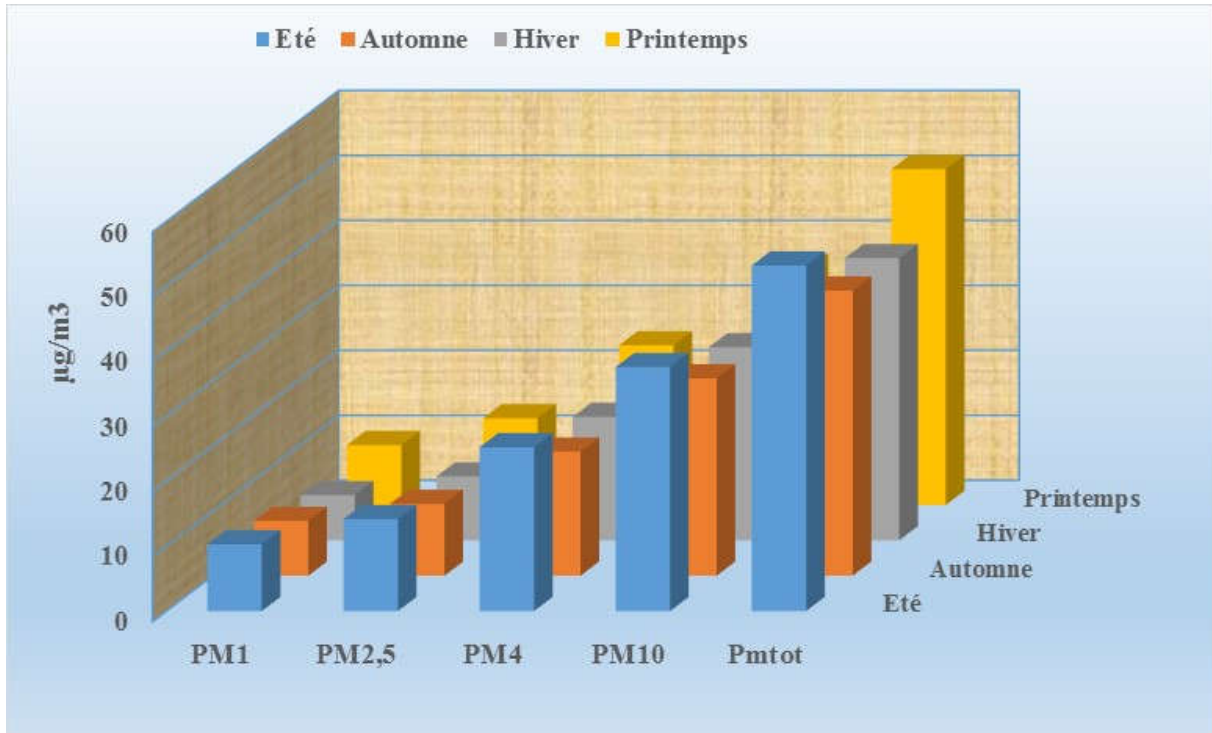


Fig. 111. Evolution des moyennes saisonnières en PM1, PM2,5, PM4, PM10 et PMtot

c. Evolution hebdomadaire

L'évolution hebdomadaire des PM1, PM2,5, PM4 et PM10 est illustrée en figure 112.

Il est à préciser que les teneurs en PM1, PM2,5 et PM4 durant les jours de la semaine et des week-ends sont proches, ce qui révèle qu'elles sont issues des mêmes sources d'émission (trafic routier, cooking et chauffage).

Cependant, les teneurs hebdomadaires en PM10 et PMtot présentent des écarts atteignant 15% entre l'optimum (mercredi) et le minimum (lundi) pour les PM10 et 21% entre l'optimum (mercredi) et le minimum (samedi). Ces résultats peuvent être dus aux sources d'émission des PM10 et PMtot qui sont différentes (vents de sable, carrières, ...).

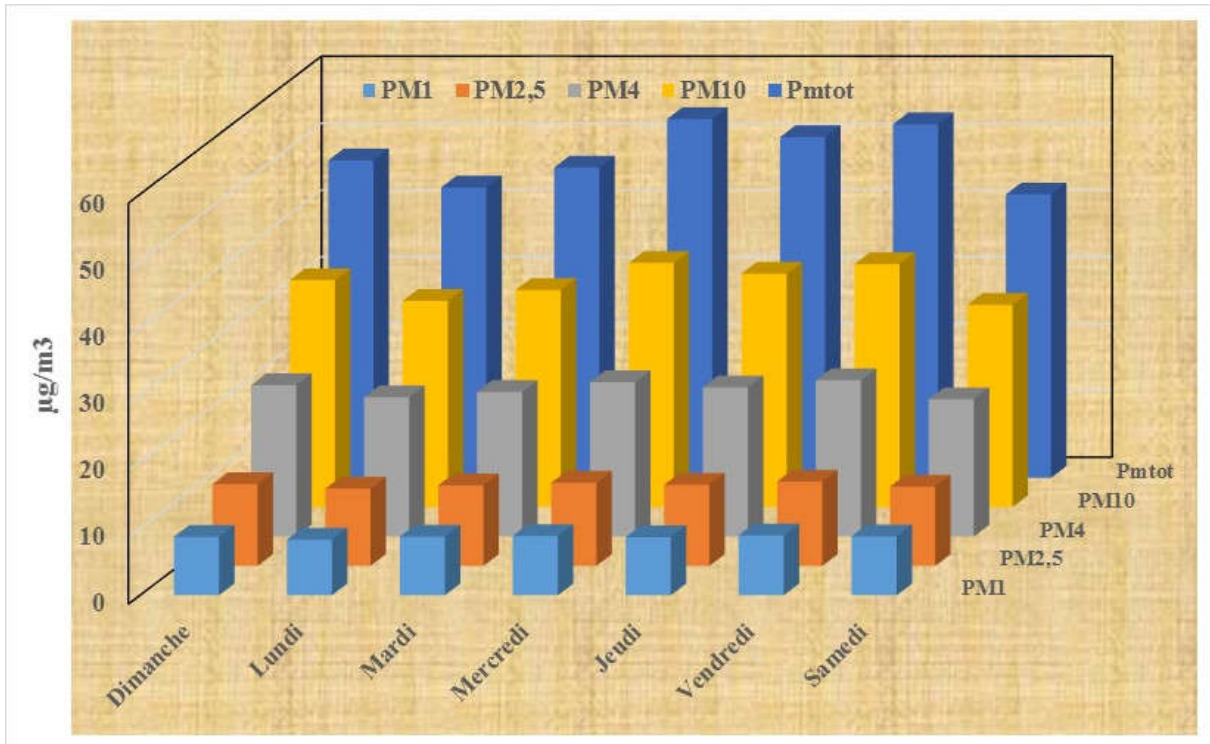


Fig. 112. Evolution hebdomadaire des PM1, PM2,5, PM4, PM10 et Pmtot

d. Impact des facteurs météorologiques

La comparaison des jours de fortes à faibles teneurs en PMi à ceux de faibles teneurs, permet de mettre en évidence l'influence des facteurs météorologiques (vitesse et direction du vent, précipitation, ...), et, l'activité humaine sur la concentration de particules dans l'air. En nous basant sur les données météorologiques (température, vitesse des vents et précipitation) fournies par la station météo de l'appareil FIDAS200 et celles de l'Office National de Météorologie de Dar El Beida, nous constatons que certaines séquences de pollution en particules fines sont liées à l'évolution des paramètres météorologiques (Figure 113).

➤ Site d'Alger-centre

- ✚ Une température moyenne relative (19,83 °C).
- ✚ Humidité moyenne de 70,41 %.

La figure 113 illustre la variation des moyennes mensuelles de la température et l'humidité durant l'année d'étude à Alger-centre. Il a été observé que l'humidité relative varie entre 65 et 74%, toutefois, la température a varié entre 12 et 28°C.

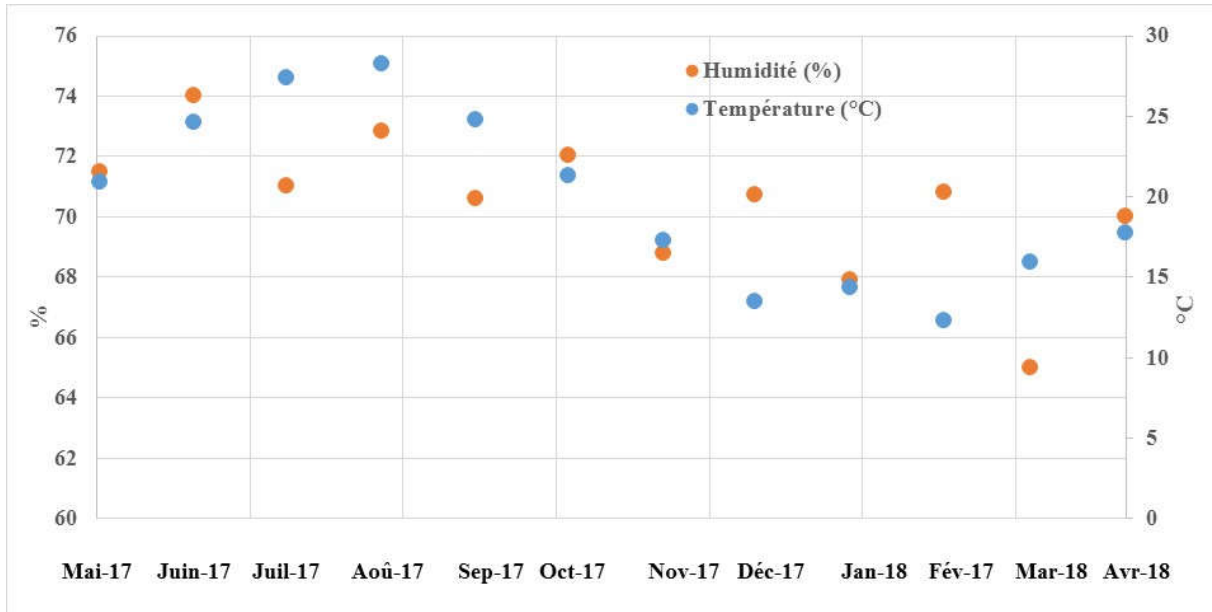


Fig. 113. Evolution des moyennes mensuelles de la température et l'humidité à Alger-centre

Cette situation génère des niveaux de pollution variables par les PMi.

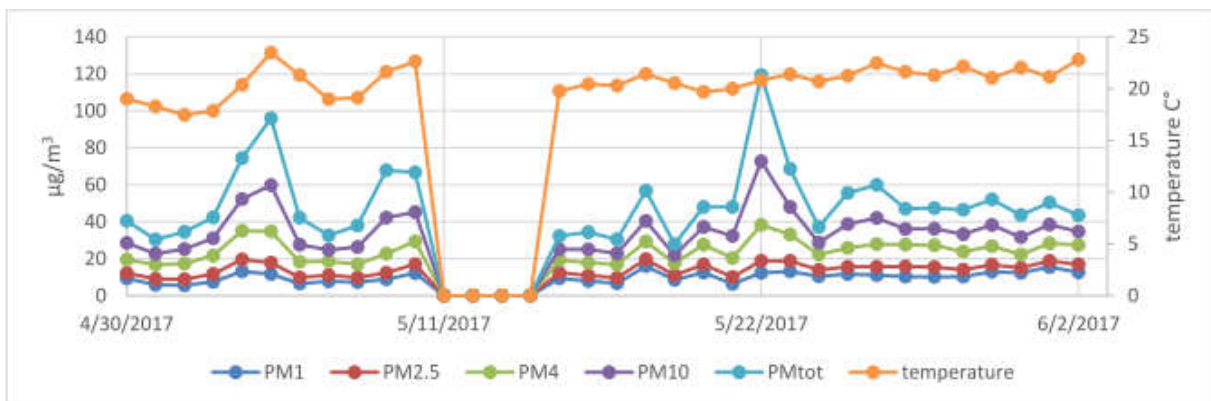
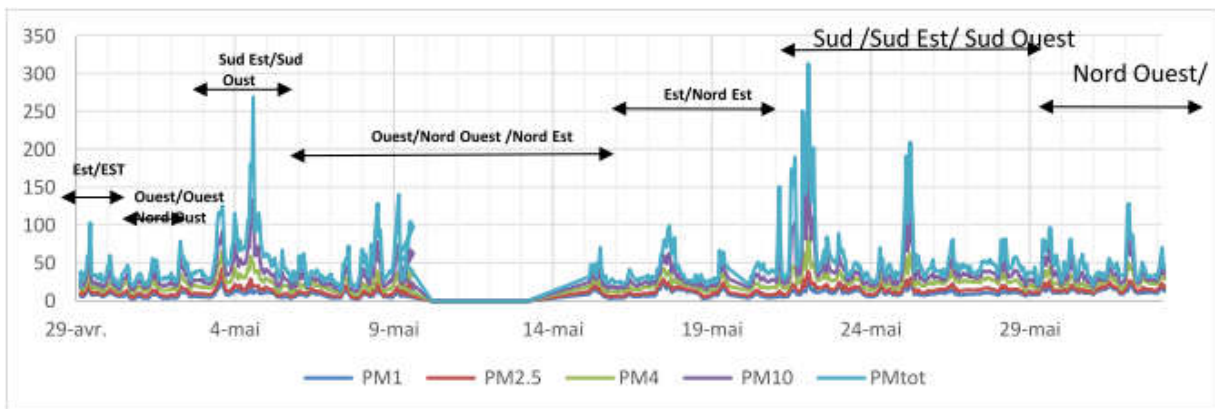
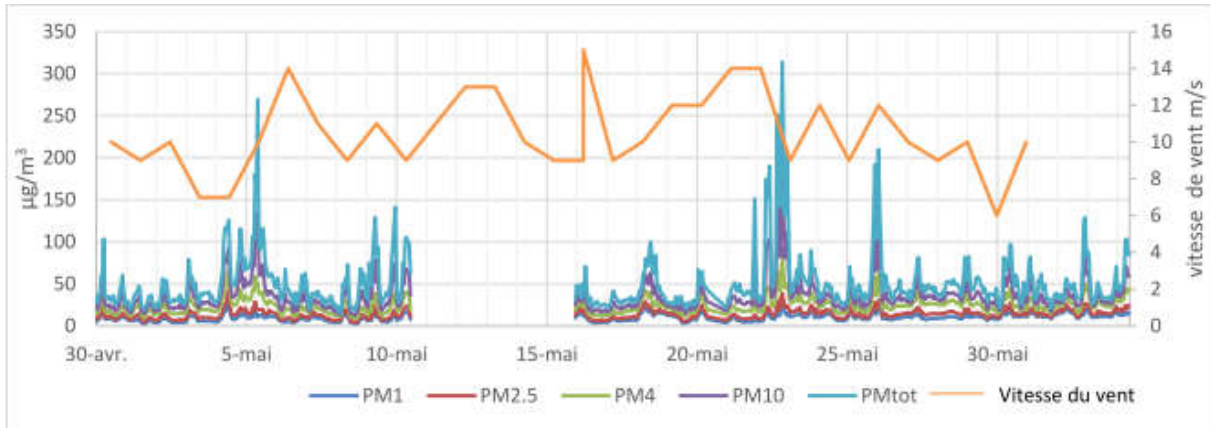
A titre d'exemple, nous allons étudier l'influence des facteurs météorologiques durant le mois de mai dont une partie coïncidant avec le début du Ramadhan (Figure 114).

Le suivi journalier sur ce site montre plusieurs pics de concentrations en mai, en termes de pollution totale. Cette pollution, particulièrement forte malgré les vitesses de vent moyennement élevées pouvant favoriser la dispersion des particules, peut être due à l'absence de précipitations, qui assurent un phénomène de lessivage de l'atmosphère et aux températures assez élevées favorisant la formation photochimique de particules secondaires entraînant cette pollution.

Le 22 mai 2017 a été une journée extrêmement polluée (un pic horaire en PMtot atteignant $313,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à 21h). Ce jour coïncide avec la manifestation des retraitées de l'Armée Nationale Populaire qui a entraîné d'importants embouteillages au niveau de la Wilaya d'Alger. D'autres pics horaires ont été atteignant $134,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ enregistrés le 5 mai 2017 avec des masses d'air tropicales continentales traversant le Sud-Est et le Sud-Ouest Algérien, ce qui nous laisse supposer que la source probable est les champs pétroliers au Sud-Est et les sables au Sud-Ouest qui viennent s'ajouter aux sources locales (Trafic routier, activités humaines diverses).

En général, le reste du mois, la pollution des particules varie en moyenne de 14 à $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{2,5} et de 25 à 60 jusqu'à $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM₁₀. On remarque que sur la dernière semaine de mai correspondant à la 1^{ère} semaine du mois de ramadhan une diminution importante de la pollution atmosphérique par rapport aux journées précédentes. Cette diminution est due à un ralentissement des activités humaines durant ce mois et au changement de rythmes de vie des citoyens. La circulation est fluide, sans congestions à Alger-centre.

Chapitre III: Résultats et discussions



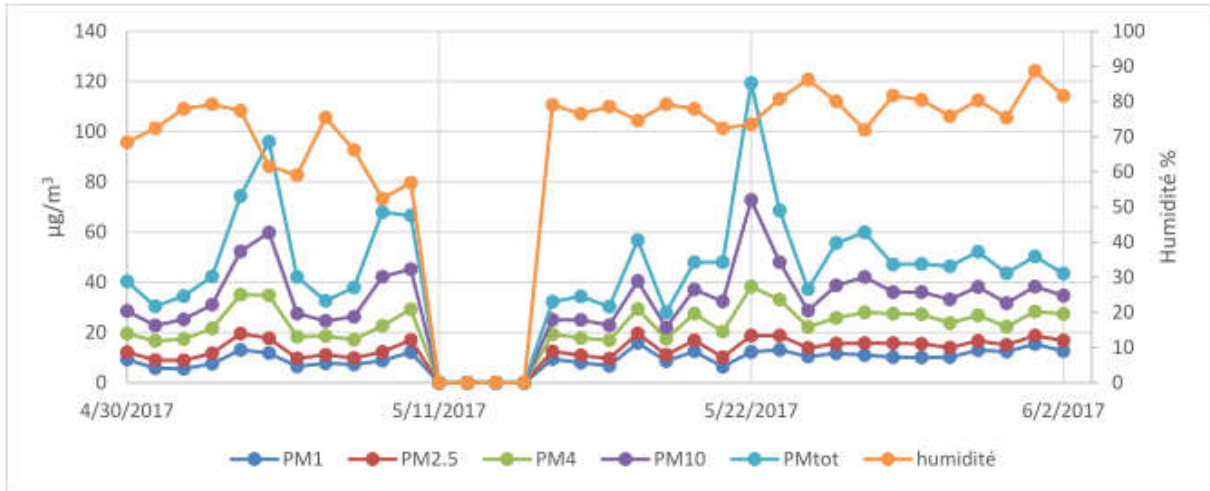


Fig. 114. Variation de la pollution particulaire à Mustapha Bacha en fonction des conditions météorologiques durant le mois de mai 2017

e. Distribution de taille des particules (PMi)

Afin d'évaluer la part de particules très fines qui sont très nocives (PM1 et PM2,5) dans les PM10, nous présentons en figure 115 les pourcentages de chacune des classes particulaires.

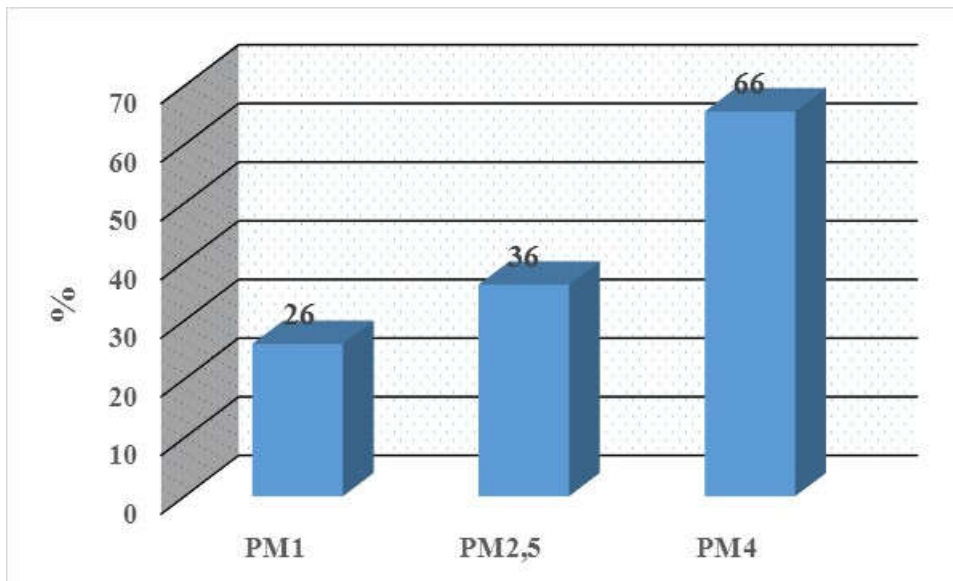


Fig. 115. Contribution en % des classes granulométriques PM1, PM2,5 et PM4 aux PM10

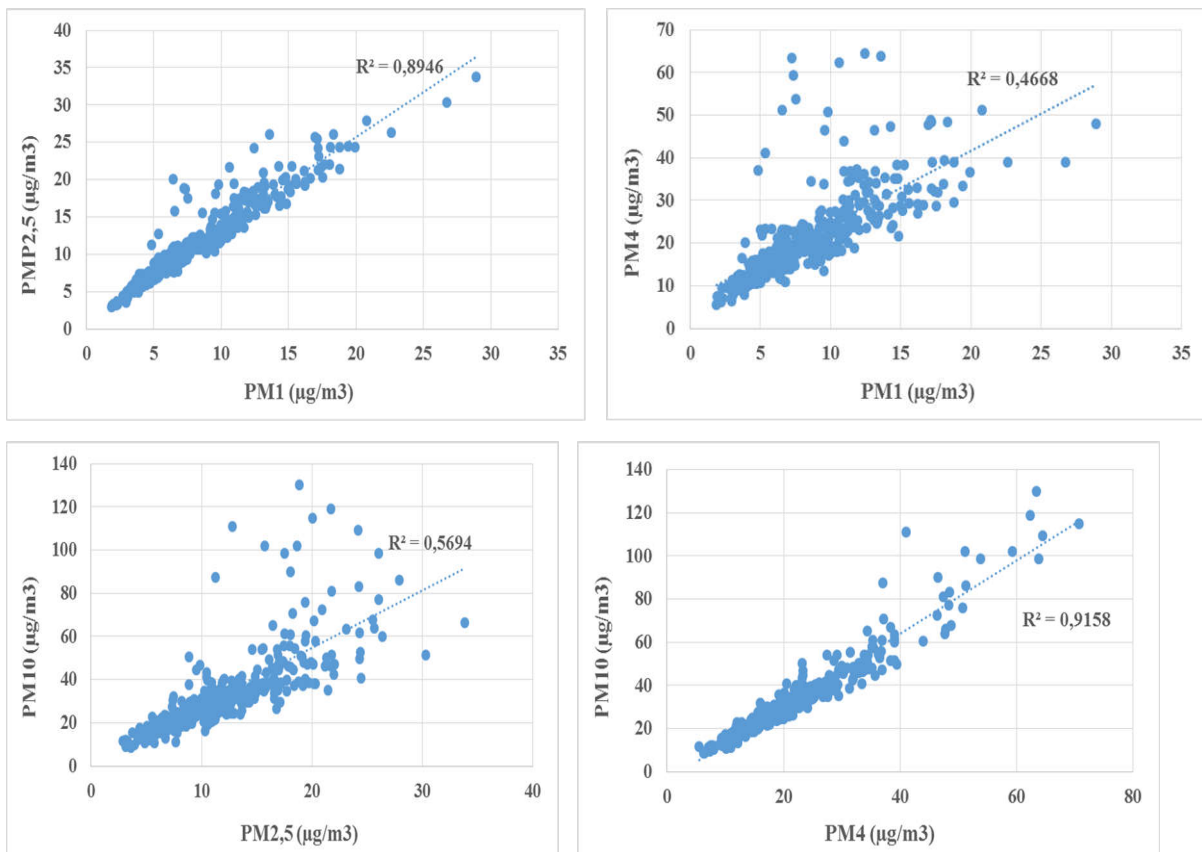
Il en résulte qu'à Alger centre, les PM1 et PM2,5 constituent respectivement 25,99 % et 36,09 % des PM10. La fraction grossière PM (4-10) est prédominante (65,61 %). Dans les villes européennes, par suite du trafic routier et des activités industrielles, les contributions des différentes fractions sont différentes. Les PM2,5 qui pénètrent profondément dans le système respiratoire sont prédominants et constituent en moyenne 60 % des PM10 (61% en Bulgarie, 69% en République Chèque, 70% en Espagne et 61% en Suisse (Oucher, 2007). Il est en effet connu que les particules fines PM2,5 sont d'origines anthropiques et que les particules grossières (de 2,5 à 10 µm) sont majoritairement d'origine naturelle.

f. Corrélation entre les teneurs massiques des différentes classes de particules

Pour mieux comprendre l'évolution des classes granulométriques ciblées par l'étude, et pouvoir distinguer les différentes sources et mécanismes de formation, il est utile d'étudier les corrélations entre les différentes classes granulométriques. Une bonne corrélation signifie qu'on est, probablement, en présence de la même source émettrice. La figure 116 présente la corrélation entre les classes granulométriques de particules étudiées.

Les deux classes PM_{2,5} et PM₁ sont, parfaitement, corrélées ($r = 0,89$) et associées ($R^2 = 0,79$), ce qui indique une très forte relation. Un tel résultat est dû au fait que ces particules fines ont les mêmes sources de pollution, qui sont, en générale, des particules secondaires ou bien des sources de combustion comme le trafic routier.

Si l'association des espèces PM_{2,5} et PM₁ est évidente pour de fines particules, comme indiqué ci-dessus, celle des PM₁₀ avec les PM₁, d'une part, et PM₁₀ avec les PM_{2,5}, d'autre part, l'est moins ($r^2 = 0,08$, $r^2 = 0,32$), respectivement. La raison est que l'on introduit dans la comparaison la fraction grossière dont les niveaux sont dus en grande partie aux émissions de la croûte terrestre (particules naturelles).



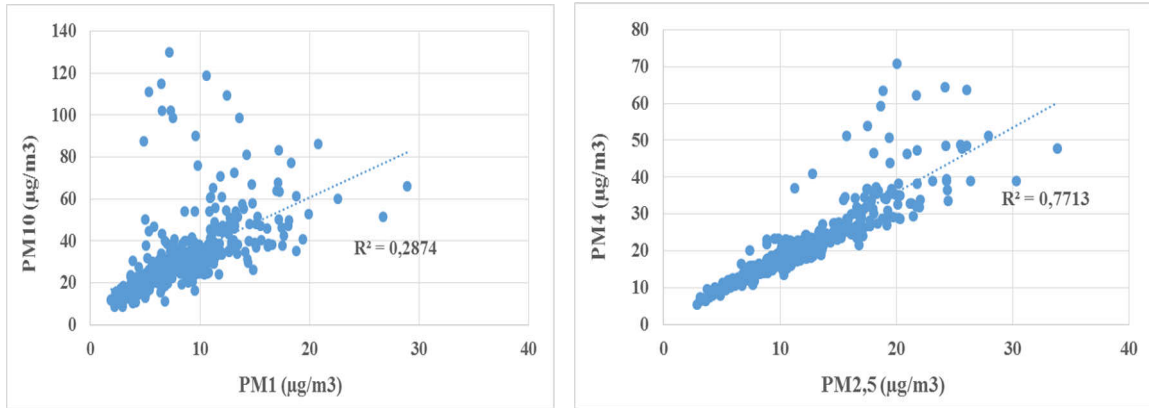


Fig. 116. Corrélation entre les PMi à Alger-centre

g. Teneurs des PM1 et PM2,5 en black carbon

Dans le but de déterminer la teneur en BC des PM1 et PM2,5, une comparaison des résultats obtenus à Alger-centre sur six mois est présentée au tableau 10. Le site urbain de notre étude est caractérisé par une très forte teneur des PM1 en BC allant de 38,0% (parc automobile et activités de cooking) à 100% (journées de feux de forêts). Ce taux élevé de particules de suie (taux moy de 65,24%) nous informe sur l'important risque d'accumulation dans les cellules, le cerveau et les autres organes, avec une absence de normes nationales ou internationales sur ce dangereux polluant.

Pour le cas des teneurs des PM2,5 en BC, elles varient de 29,9 à 100%, ce qui montre que deux tiers (taux moyen de 55,02%) des particules inhalables à Alger-centre sont constituées de BC, très nocif à la santé humaine.

Tableau 10. Teneurs des PM1 et PM2,5 en black carbon

Mois	BC/PM1 (%)	BC/PM2.5 (%)
mai-17	38,00	26,91
juin-17	42,36	32,15
juil-17	54,11	39,83
août-17	100	86,46
sept-17	100	100
oct-17	56,97	44,75

III.4. Autres aérosols analysés par l'ACSM

Nous présentons dans ce qui suit les résultats de mesures de cinq aérosols par l'ACSM à l'île de Crète (Grèce) du 01/5/2014 au 31/12/2014.

III.4.1. Variabilité horaire des aérosols mesurés par l'ACSM

La figure 117 présente la variation des niveaux de cinq aérosols mesurés par l'ACSM (les matières organiques, les sulfates, les nitrates, l'ammonium et les chlorures), mesurés à l'île de Crète (Grèce) entre le 01/05/2014 et le 31/12/2014.

Nous remarquons que les niveaux des aérosols organiques varient de 1,000 à 6,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec une moyenne de 2,058 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et un maximum excédant 14,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces résultats sont expliqués par la présence d'activités agricoles à l'île de Crète, émettant des matières organiques, ainsi qu'aux réactions chimiques induisant la production de matières organiques à travers les composés organiques volatils des activités industrielles.

Pour le cas des sulfates, les concentrations varient de 0,500 à 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec une moyenne de 2,589 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces résultats sont dus, d'une part, aux émissions industrielles locales et celles venant d'autres pays, et, d'autre part, aux émissions naturelles (sels marins) et réactions chimiques dans l'atmosphère. Boumechhour, 2004 révèle dans son étude élaborée à Alger que jusqu'à 95% de la masse des sulfates se trouve dans le mode des petites particules. Toutefois dans un air contaminé, la teneur moyenne en sulfate dans l'atmosphère varie de 1,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ jusqu'à 31.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans le bassin de Los Angeles (Boumechhour, 2004).

Les teneurs en nitrates varient de 0,200 à 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec une moyenne de 0,445 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces résultats sont expliqués par les réactions chimiques favorisant la production de nitrates à partir de sels marins et des matières organiques dans la phase gazeuse.

Les concentrations d'ammonium sont, généralement, inférieures à 2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec une moyenne de 0,680 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces résultats sont dus aux réactions chimiques des sources naturelles (feux de forêts et sécrétions d'animaux) et anthropiques (agriculture, carburants fossiles...).

Enfin, en ce qui concerne les chlorures, les concentrations sont proches de zéro, avec une moyenne de 0,029 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces résultats sont dus aux émissions de chlorures par l'industrie, l'incinération de déchets et les embruns marins.

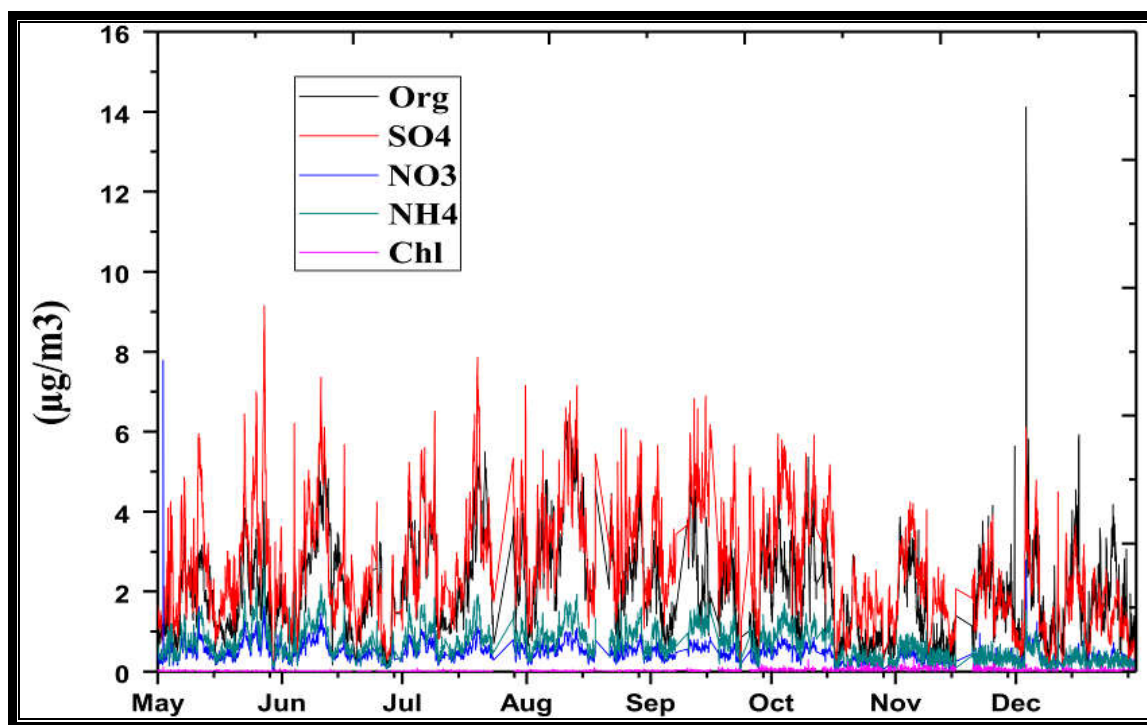


Fig. 117 . Variation des niveaux de cinq aérosols en Crète (Grèce)

III.4.2. Variabilité journalière des aérosols mesurés par l'ACSM

La figure 118 présente les moyennes journalières des concentrations d'aérosols mesurés par l'ACSM à l'île de Crète (Grèce).

Nous remarquons que les teneurs en matières organiques sont très élevées avec des moyennes journalières allant de 0,500 à 3,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec un maximum atteignant 5,837 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les teneurs en sulfates sont les plus élevées, avec des moyennes journalières variant de 0,500 à 4,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec un maximum de 6,150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pour le cas des NO_3 , les moyennes journalières varient de 0,000 à 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec un maximum de 2,600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les moyennes journalières des NH_4 varient quant à elles de 0,000 à 1,500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec un maximum de 2,604 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les chlorures présentent des moyennes journalières de 0,000 à 0,100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec quelques pics atteignant 2,604 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Il est à remarquer que les concentrations des cinq aérosols sont plus élevées en été qu'en hiver, ce qui est dû au lessivage par les pluies et aux réactions chimiques en présence des gouttelettes de pluie dans l'air.

L'île de Crète recoit également des vents de l'Ouest (l'Afrique), Nord (Europe) et Est (Asie), ce qui diversifie ses sources de pollution.

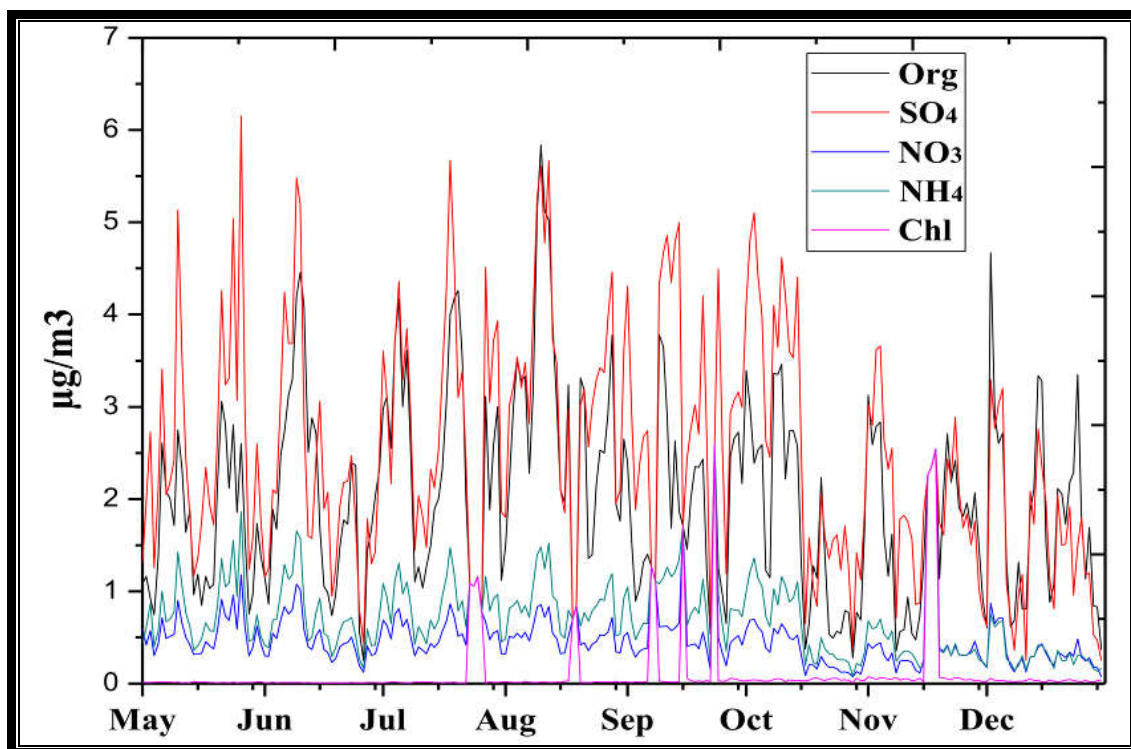


Fig. 118. Variation journalière des niveaux d'aérosols en Crète

III.4.3. Variabilité mensuelle des aérosols mesurés par l'ACSM

La figure 119 présente les moyennes mensuelles des concentrations d'aérosols mesurés par l'ACSM à l'île de Crète (Grèce).

Nous remarquons que les moyennes mensuelles des cinq aérosols varient de 0,000 à 4,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec des moyennes élevées en sulfates et matières organiques en été, atteignant, respectivement, 3,170 et 2,810 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au mois d'août.

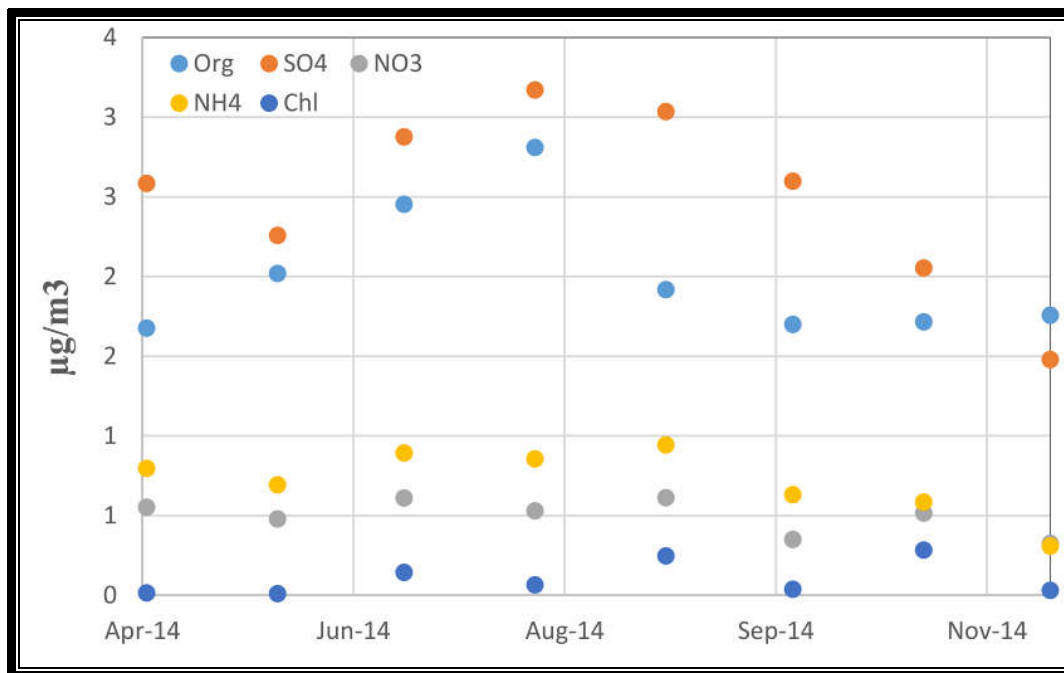


Fig. 119 : Moyennes annuelles des concentrations d'aérosols en Crète (Grèce)

III.5. Modélisation

III.5.1. Modèle TM4-ECPL de l'Université de Crète

Nous présentons dans ce qui suit les résultats du modèle global TM4-ECPL, développé par l'Université de Crète, sous la supervision du Professeur Maria KANAKIDOU.

a. Cartes globales

Les résultats globaux concernent la variation des aérosols à travers la planète, ce qui permet de comparer notre région (Algérie) avec les autres pays du monde.

Les Figure 120 et 121 présentent les cartes de la moyenne mensuelle du BC_{ins} (insoluble ou frais) et BC_{sol} (soluble ou âgé), cartes obtenues par le modèle global TM4-ECPL pour les mois de juillet et octobre 2014.

Les mois ont été choisis de telle sorte qu'il y ait une comparaison représentative des résultats mesurés et modélisés pour chaque mois, situé au milieu d'une saison.

Il est clair à travers les deux figures 120 et 121 que les moyennes mensuelles les plus élevées sont enregistrées en Afrique-centrale, en Chine et en Inde, avec des teneurs atteignant 2,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces résultats sont dus à l'usage massif du charbon et du bois dans ces régions et aussi à l'importance du parc automobile et la forte industrialisation en Chine et en Inde.

Toutefois, en Algérie, les teneurs en BC sont faibles et se situent autour de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\text{BC}_{\text{ins}} + \text{BC}_{\text{sol}}$), ce qui est en adéquation avec les résultats de cette étude.

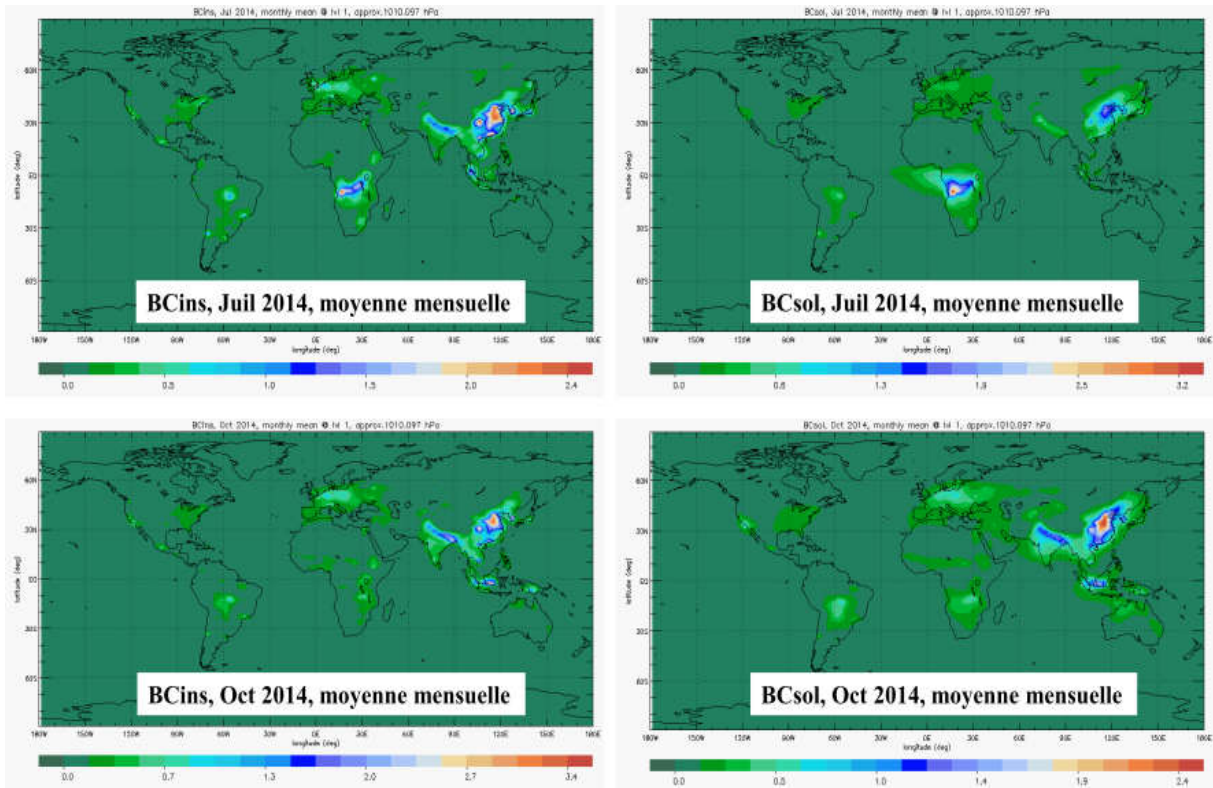


Fig. 120. Carte de la moyenne mensuelle du BC_{ins} et BC_{sol} durant les mois de juillet et octobre 2014

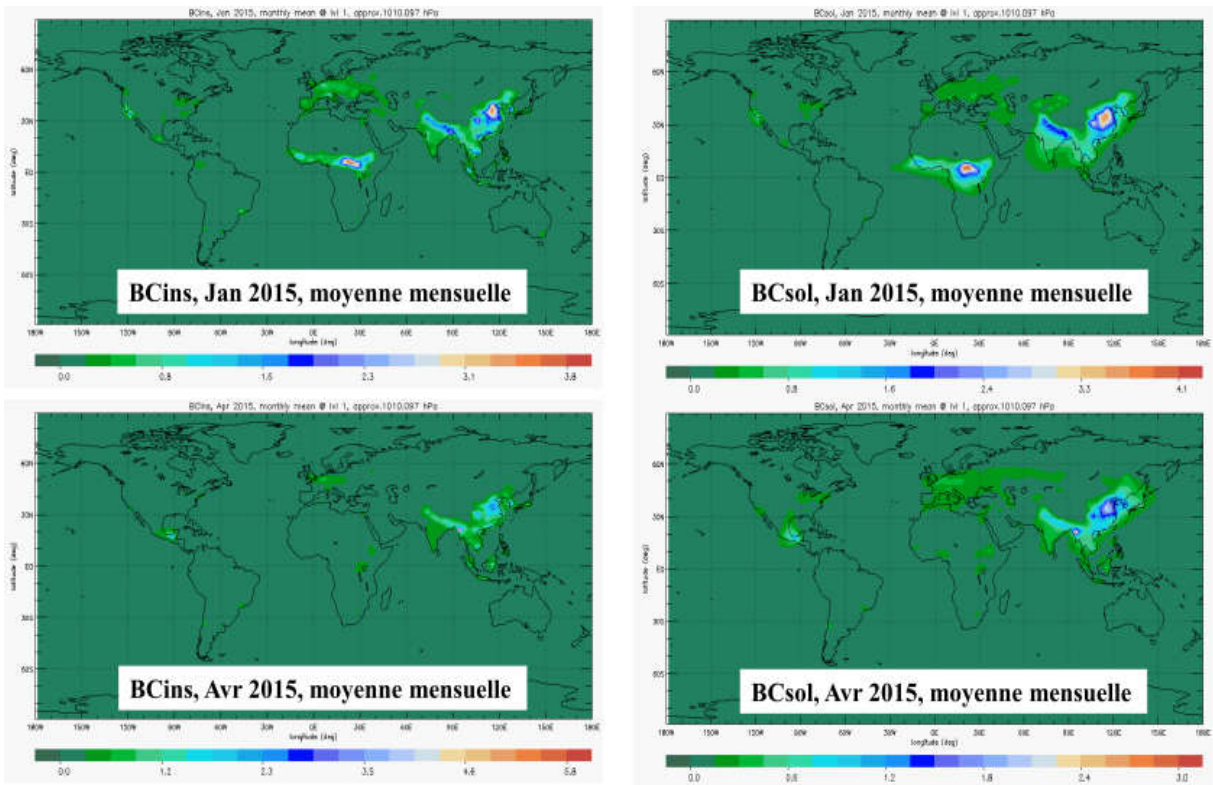


Fig. 121. Carte de la moyenne mensuelle du BC_{sol} et BC_{ins} durant les mois de janvier et avril 2015

b. Cartes régionales

Les résultats présentés, ci-après, concernent la région méditerranéenne, et cela, en vue de comparer les niveaux de pollution en Algérie par le BC avec les autres pays du pourtour. La modélisation des BC_{sol} et BC_{ins} est utile pour suivre les concentrations atmosphériques du BC insoluble et frais (BC_{ins}) et du BC soluble et vieux (BC_{sol}) qui peuvent être ramenés vers le sol et les eaux souterraines par lessivage humide.

Les figures 122 et 123 présentent le BC_{ins} et BC_{sol} modélisés en juillet et octobre 2014, ainsi que le BC_{ins} et le BC_{sol} en janvier et avril 2015, respectivement. Les niveaux de BC_{ins} et BC_{sol} sont plus élevés en Afrique-centrale et au nord de l'Europe, en raison des feux de forêts et chauffage au bois et charbon. Le BC_{ins} et BC_{sol} modélisés à Alger ont atteint, respectivement, $0,5$ et $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en juillet 2014, $0,5$ et $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en octobre 2014, $0,4$ et $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en janvier 2015 et $0,45$ et $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en avril 2015. Donc, les niveaux en BC total modélisé pour Alger, sont de $0,8$, $0,90$, $0,80$ et $0,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en juillet et octobre 2014 et janvier et avril 2015, respectivement. Il est à remarquer que ces résultats modélisés sont proches des moyennes mensuelles mesurées durant les quatre mois ($0,745$, $1,308$, $1,108$ and $0,917 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement), ce qui montre l'utilité de ce modèle pour la déduction des niveaux de pollution, lors d'absence de mesures.

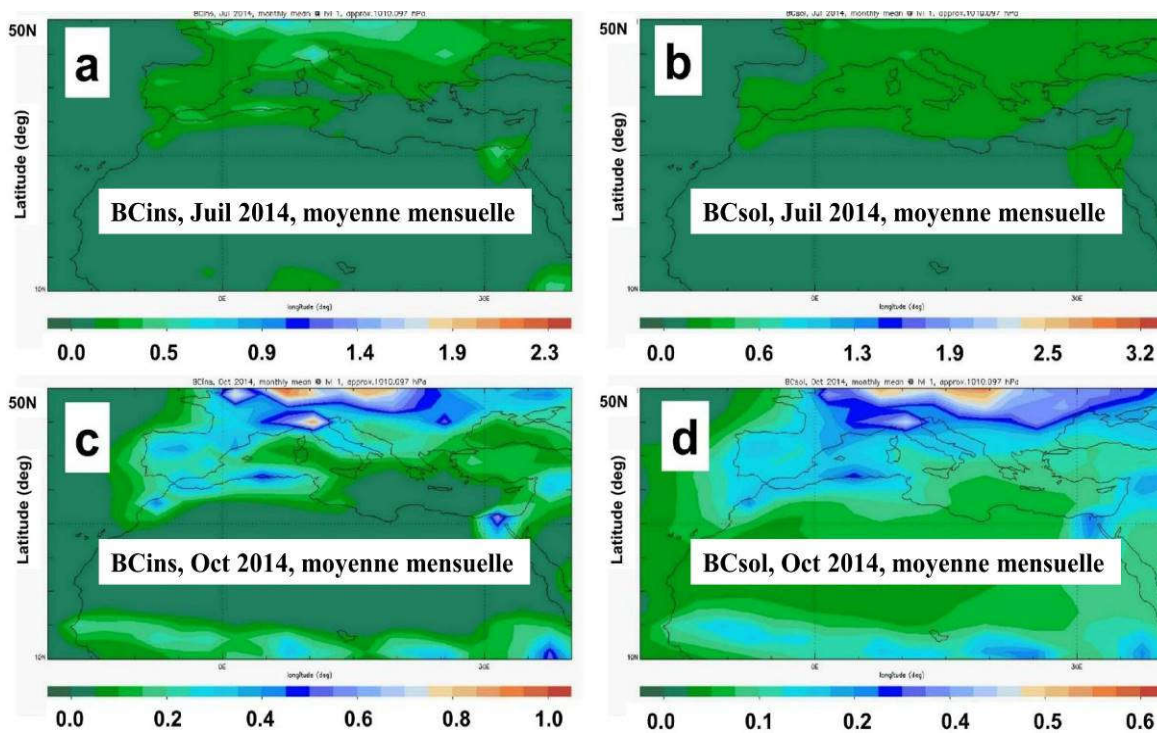


Fig. 122. Variation du BC_{ins} et BC_{sol} en juillet et octobre 2015

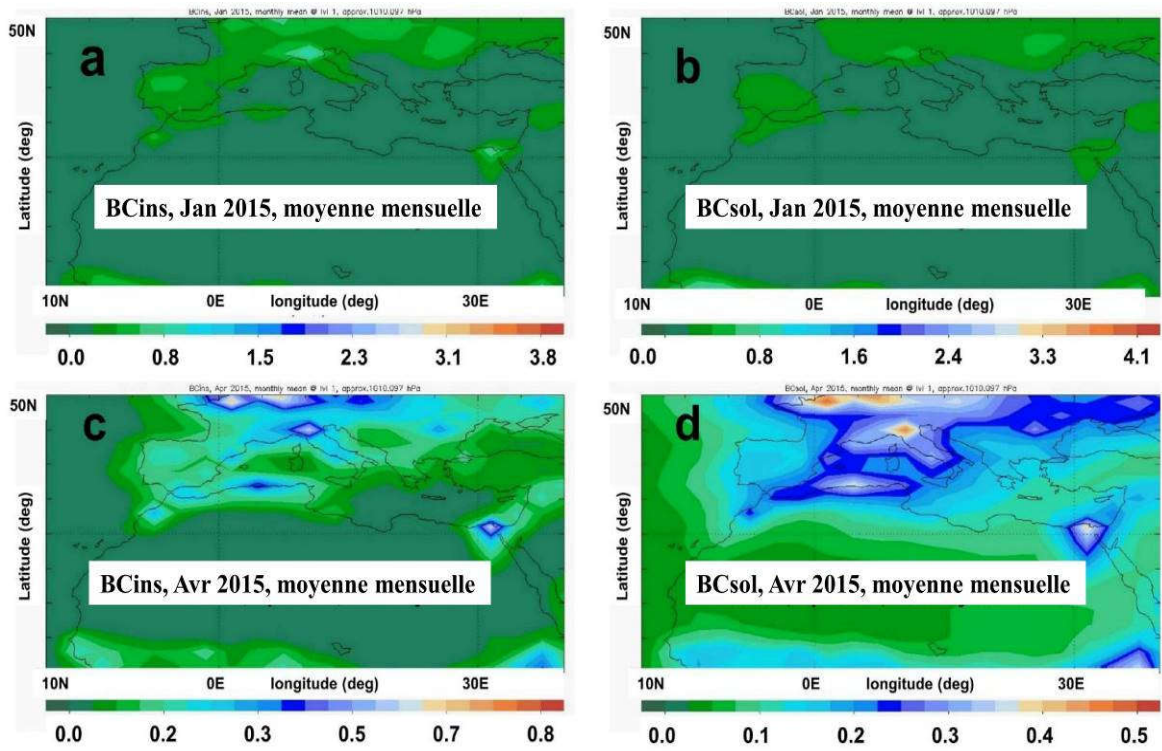


Fig. 123. Variation du BC_{ins} et BC_{sol} en janvier et avril 2015

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

La présente étude a permis de caractériser les aérosols atmosphériques à Alger-centre, Bouzaréah, Crète et Athènes. Elle constitue une référence pour l'étude du black carbon qui a été étudié pour la première fois en Algérie.

La thèse a traité d'une manière détaillée les variations horaires, journalières, diurnes, saisonnières, ainsi que durant des fêtes nationales, sportives et religieuses des teneurs atmosphériques en carbone suie BC, BC_{ff} (fossil fuel) et BC_{wb} (wood burning) ainsi que l'impact des conditions météorologiques (température, humidité, pluviométrie, vitesse et direction des vents) sur leurs variations.

Les concentrations moyennes de BC, BC_{ff} et BC_{wb} obtenues à Bouzaréah en site semi-urbain sont relativement faibles, de l'ordre de 1 µg/m³ pour le BC et BC_{ff} et environ 0,05 µg/m³ pour le BC_{wb}. Ces concentrations sont relativement faibles et ne caractérisent pas un milieu pollué. Bouzaréah est un site très bien ventilé naturellement et qui n'est pas exposé à de fortes émissions localement. Le site subit toutefois l'influence du transport des émissions du trafic routier et transport aérien, ferroviaire et naval ainsi qu'aux activités industrielles et autres chauffage et activités de cooking à l'échelle nationale et à la pollution transfrontalière validée par les cartes de rétro trajectoires obtenues par le modèle Hysplit de la NOAA.

La situation est complètement différente à Alger-centre, où les moyennes des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} enregistrées de mai à octobre 2017 ont atteint respectivement 8,89; 7,78 et 1,11 µg/m³, soit environ neuf fois les taux mesurés à Bouzaréah. Ces niveaux élevés de pollution enregistrés à Alger-centre sont expliqués par les sources d'émissions qui sont plus proches au site urbain comparé au milieu semi-urbain, où les polluants subissent un phénomène de dispersion dans l'air.

L'inutilisation ou faible utilisation à Alger du bois comme combustible se répercute dans les très faibles teneurs en BC_{wb}. Plus de 90 % du carbone suie ou BC est constitué de BC_{ff} issu de la combustion des hydrocarbures fossiles.

Les teneurs moyennes en PM₁, PM_{2,5} et PM₁₀ mesurées à Alger-centre, s'élèvent, à 8,739, 12,135 et 33,626 µg/m³.

Une comparaison des résultats de PM_i obtenus à Alger-centre avec les seuils OMS révèle que les taux des PM_{2,5} et PM₁₀ mesurés à Alger, dépassent les valeurs fixées par la norme OMS de 10 et 20 µg/m³, respectivement, mais, demeurent toutefois très inférieures à la norme algérienne de 80 µg/m³.

La moyenne des proportions de BC dans les PM₁ et PM_{2,5} enregistrées à Alger-centre ont atteint 92,15 % et 68,69 %, respectivement, avec des pics mensuels de 236 % et 182 % en septembre. Ces résultats sont inquiétants sachant que les particules très fines de BC peuvent atteindre le sang et d'autres organes et provoquer des cancers.

La moyenne annuelle du nombre de particules par centimètre cube est de 246, ce qui donne une information sur le nombre de particules inhalées par jour par personne qui est de l'ordre de 12,75 Milliards de particules.

Conclusion générale

La présente thèse a traité également d'autres aérosols sous forme de matières organiques et inorganiques (MOrg, SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ et Cl⁻) mesurés à l'île de Crète (Grèce) de mai à décembre 2014. Les moyennes mensuelles des cinq aérosols varient de 0,00 à 4,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, avec des moyennes élevées en SO_4^{2-} et en matières organiques en été atteignant respectivement 3,170 et 2,810 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au mois d'août. Ces émissions sont émises par des sources naturelles (terrigenes, feux de forêts...etc.) et anthropiques (industrie, parc automobile, pétrochimie ...etc.).

L'étude de l'impact du BC sur le rayonnement solaire direct (DNI) durant des journées à ciel clair a révélé des diminutions dépassant 13,3% avec un optimum de 30,2% enregistré durant la journée du 9 Juin 2014.

La diminution de la production d'électricité des trois stations solaires photovoltaïques du CDER due au BC a atteint un pic de 21,5% le 18 avril 2017. Toutefois, la diminution de l'énergie solaire par la pollution par les particules atmosphériques a varié de 6% à 15%, contre 2,76% due au dépôt de la poussière sur les panneaux solaires. Des cartes obtenues par le modèle MODIS de la NASA ont été d'une grande importance pour la confirmation de la clarté du ciel, d'où, la crédibilité des résultats obtenus.

Les cartes des vents annuelles, saisonnières, mensuelles et sur onze années élaborées dans cette étude à travers 4016 cartes réalisées par le modèle Hysplit peuvent être utilisées dans d'autres études sur la pollution atmosphérique, la climatologie, l'agriculture et l'énergie éolienne dans la région d'Alger et ses environs.

Les résultats de la présente étude seront d'un grand apport pour les décideurs et les épidémiologistes qui disposeront de données réelles sur la pollution atmosphérique avec des interprétations détaillées sur les sources de pollution. Le travail de recherche sera poursuivi par l'étude de l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé humaine avec les épidémiologistes du CHU Mustapha Bacha.

Les résultats obtenus pourront être également exploités par le GIEC dans les prochains rapports dans la partie short lived climate forcers, vu que le BC et les $\text{PM}_{2,5}$ ont été étudiés en détail dans ce travail, ce qui renforcera aussi l'argumentation sur la vulnérabilité de l'Algérie aux effets néfastes des changements climatiques par la délégation algérienne de négociation sur les changements climatiques.

Bibliographie

Bibliographie

Bibliographie

Aethalometer Model AE33, user manual, 2013.

AIRPARIF, « Synthèse des connaissances sur les particules en suspensions dans l'air et les travaux d'Airparif sur ces polluants. [EN LIGNE], » Airparif, Ile-de-France. 2008.

ALLEN, G.A., LAWRENCE, J., KOUTRAKIS, P., 1999. Field validation of a semi continuous method for aerosol black carbon (Aethalometer) and temporal patterns of summertime hourly black carbon measurements in southwestern PA. *Atmos Environ.* 33, 817–823.

ANDREAE, M.O., ROSENFELD, D., ARTAXO, P., COSTA, A. A., FRANK, G. P., LONGO, K. M., SILVA-DIAS, M. A. F. Smoking rain clouds over the Amazon. *Science.* 303 (5662), 1337 e 1342, 2004.

ANDREAE, M.O., GELENESER, A. 2006: Black carbon or brown carbon? The nature of light absorbing carbonaceous aerosols. *Atmos. Chem. Phys.* 6, 3131-3148.

BAHADUR, R., RUSSELL, L. M., JACOBSON, M. Z., PRATHER, K., NENES, ADAMS, P., SEINFELD, J. H. Importance of composition and hygroscopicity of BC particles to the effect of BC mitigation on cloud properties: application to California conditions. *J. Geophys. Res. Atmos.* 117, D09204. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JD017265>, 2012.

BASHUROVA, V.S., DREILING, V., HODGER, T.V., JAENICKE, R., KOUTSENOGII, K.P., KOUTSENOGII, P.K., KRAEMER, M., MAKAROV, V.I., OBOLKIN, V.A., POTJOMKIN, V.L., and PUSEP, A.Y. Measurements of atmospheric condensation nuclei size distributions in Siberia. *J. Aerosol Sci.* 1992, 23, 191-199.

BECERRIL-VALLE, M., COZ, E., PREVOT, A., MOCNIK, G., PANDIS, S., DE LA CAMPA, A.S., ALASTUEY, A., DIAZ, E., PEREZ, R., ARTIÑANO, B. Characterization of atmospheric black carbon and co-pollutants in urban and rural areas of Spain. *Atmos. Environ.* 2017, 169, 36–53.

BEDDOWS, D.C.S., DONOVAN, R.J., HARRISON, R.M., HEAL, M.R., KINNERSLEY, R.P., KING, M.D., NICHOLSON, D.H., THOMPSON, K.C. Correlations in the chemical composition of rural background atmospheric aerosol in the UK determined in real time using time-of-flight mass spectrometry. *J. Environ. Monit.* 2004, 6, 124–133.

BEGAM, G.R., VACHASPATI, C.V., AHAMMED, Y.N., KUMAR, K.R., BABU, S.S. and REDDY, R.R. 2016, Measurement and analysis of black carbon aerosols over a tropical semi-arid station in Kadapa, India. *Atmos Res.* 2016, 171:77–91.

BELAMRI, Mohamed., BENRACHEDI, K. Utilisation de l'Analyse par Activation Neutronique pour le contrôle de la pollution de l'air d'Alger. Laboratoire de Technologie Alimentaire – Université M'hamed Bouguarra – Boumerdès – Algérie. POLLUTION ATMOSPHERIQUE N° 207 - JUILLET-SEPTEMBRE 2010.

BELHOUT, D., KERBACHI, R., RELVAS, H., and MIRANDA, A.I. Air quality assessment in Algiers city. *Air Quality, Atmosphere & Health.* 2018, doi.org/10.1007/s11869-018-0589-x.

BHUGWANTA, C., CACHIERB, H., BESSAFIA, M., LEVEAUA, J. Impact of traffic on black carbon aerosol concentration at la Réunion Island (Southern Indian Ocean), *Atmos Environ.* Volume 34, Issue 20, 2000, Pages 3463–3473.

Birmili, W., Weinhold, K., Rasch, F., Sonntag, A., Sun, J., Merkel, M., Wiedensohler, A., Bastian, S., Schladitz, A., Löschau, G. Long-term observations of tropospheric particle number size distributions and equivalent black carbon mass concentrations in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN). *Earth Syst. Sci.* 2016. Data 8, 355–382.

BOND, T.C., DOHERTY, S. J., FAHEY, D. W., FORSTER, P. M., BERNTSEN, T., DEANGELO, B. J., FLANNER, M. G., GHAN, S., KÄRCHER, B., KOCH, D., KINNE, S., KONDO, Y., QUINN, P. K., SAROFIM, M. C., SCHULTZ, M. G., SCHULZ, M., VENKATARAMAN, C., ZHANG, H., ZHANG, S., BELLOUIN, N., GUTTİKUNDA, S. K., HOPKE, P. K., JACOBSON, M. Z., KAISER, J. W., KLIMONT, Z., LOHMANN, U., SCHWARZ, J. P., SHINDELL, D., STORELMO, T., WARREN, S. G., ZENDER, C. S. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment. *J. Geophys. Res. Atmos.* ISSN: 2169-8996 118 (11), 5380 e 5552. <http://dx.doi.org/10.1002/jgrd.50171>, 2013.

Bibliographie

- BORGIE, M. Etude des particules fines et ultrafines en suspension dans l'air au Liban : caractérisation physicochimique et évaluation des effets toxicologiques sur des cellules pulmonaires humaines BEAS-2B. Thèse de Doctorat, l'Université du Littoral Côte d'Opale et l'Université Libanaise, 2014.
- BOUAOUD, F., YAHIAÏTENE, M., KERBACHI, R., MERABET, H. Suivi continu des niveaux de la pollution atmosphérique par les particules (PMi) dans un milieu urbain. Mémoire d'Ingénieur d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2019.
- BOUMECHHOUR, F., Contribution à l'étude de la pollution de l'air par les aérosols acides véhiculés par les particules inhalables et respirables à Alger. Thèse de Magister. Ecole Nationale Polytechnique, 2004.
- BYCENKIENE, S., ULEVICIUS, V., and KECORIUS, S. Characteristics of black carbon aerosol mass concentration over the East Baltic region from two-year measurements, *J. Environ. Monitor.* 13, 1027–1038, doi:10.1039/C0em00480d, 2011.
- CHEN, W.T., LEE, Y. H., ADAMS, P. J., NENES, A., and SEINFELD, J. H. Will black carbon mitigation dampen aerosol indirect forcing? *Geo-phys. Res. Lett.* 37 <http://dx.doi.org/10.1029/2010GL042886>, 2010.
- CHENG, Y., LEE, S. C., HO, K. F., WANG, Y. Q., CAO, J. J., CHOW, J. C., and WATSON, J. G.: Black carbon measurement in a coastal area of south China, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 111, D12310, doi:10.1029/2005jd006663, 2006.
- CHENG, Y.H., LIAO, C.W., LIU, Z.S., TSAI, C.J., HIS, H.C. A size-segregation method for monitoring the diurnal characteristics of atmospheric black carbon size distribution at urban traffic sites. *Atmos Environ.* 2014, 90, 78e86.
- CHESTER, R., NIMMO, M., PRESTON, M.R. The trace metal chemistry of atmospheric dry deposition samples collected at Cap Ferrat: a coastal site in the Western Mediterranean. *Mar Chem.* 68, 15–30, 1999.
- COEN, M.C., WEINGARTNER, E., SCHAUB, D., HUEGLIN, C., CORRIGAN, C., SCHWIKOWSKI, M., BALTENSBERGER, U. Saharan dust events at the Jungfraujoch: detection by wavelength dependence of the single scattering albedo and analysis of the events during the years 2001 and 2002. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2003, 3, 5547e5594.
- CRILLEY, L.R., BLOSS, W.J., YIN, J., BEDDOWS, D.C.S., HARRISON, R.M., ALLAN, J.D., YOUNG, D.E., FLYNN, M., WILLIAMS, P., ZOTTER, P., PREVOT, A.S.H., HEAL, M.R., BARLOW, J.F., HALIOS, C.H., LEE, J.D., SZIDAT, S., MOHR, C. Sources and contributions of wood smoke during winter in London: assessing local and regional influences. *Atmos. Chem. Phys.* 2015, 15, 3149–3171.
- CRYSZTOFIAK, Gisèle. Transport et chimie d'espèces soufrées et bromées dans la haute troposphère et basse stratosphère diagnostiqués par des mesures sous ballon et en avion et par modélisation. Thèse de Doctorat. Université d'Orléans. France, 2013.
- DASKALAKIS, N., MYRIOKEFALITAKIS, S. and KANAKIDOU, M. Sensitivity of tropospheric loads and lifetimes of short-lived pollutants to fire emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015, Vol. 15 No. 6, pp. 3543–3563.
- DEEPAK, A., and GALI, G. The International Global Aerosol Program (IGAP) Plan. *Deepak Publishing, Hampton, VA.* 1991.
- DELMAS, R., MEGIE, G., PEUCH, V. H. Physique et chimie de l'atmosphère. Edition Belin, Paris, 2005.
- DIAPOULI, E., KALOGRIDIS, A.-C., MARKANTONAKI, C., VRATOLIS, S., FETFATZIS, P., COLOMBI, C., ELEFThERIADIS, K. Annual variability of black carbon concentrations originating from biomass and fossil fuel combustion for the suburban aerosol in Athens, Greece. *Atmosphere*. 2017, 8, 234.
- DOCKERY, D.W., POPE, C.A. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annu. Rev. Public Health.* 1994, 15, 107–132.
- DRINOVEC, L., MOCNIK, G., PETIT, J.E., SCIARE, J, FAREZ, O., ZOTTER, P., WOLF, R., PRÉVÔT, A.S.H., and HANSEN, A.D.A. Characterisation of Black Carbon concentration, sources and age using an Aethalometer AE33, *Symposium*, 2013.

Bibliographie

- DUMKA, U.C., MANCHANDA, R.K., SINHA, P.R., SREENIVASAN, S., KISHNA MOORTHY, K., and SURESH BABU, S. Temporal variability and radiative impact of black carbon aerosol over tropical urban station Hyderabad. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 105–106, 81–90, 2013.
- FAN, J., ZHANG, R., TAO, W. K., MOHR, K. I. Effects of aerosol optical properties on deep convective clouds and radiative forcing. *J. Geophys. Res. Atmos.* ISSN: 2156-2202 113 (D8). <http://dx.doi.org/10.1029/2007JD009257> n/a e n/a., 2008.
- FAVEZ, O., CACHIER, H., SCIARE, J., SARDA-ESTÈVE, R., MARTINON, L. Evidence for a significant contribution of wood burning aerosols to PM_{2.5} during the winter season in Paris, France. *Atmos Environ.* 2009, 43, 3640–3644.
- FITZGERALD, J.W. Marine aerosols: A review. *Atmos. Environ.* 1991, 25A, 533-545.
- Font, A., Guiseppin, L., Blangiardo, M., Ghersi, V., cGary W.Fuller, G.W. A tale of two cities: is air pollution improving in Paris and London? *Environ. Pollut.* Volume 249, June 2019, Pages 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.040>.
- FRUIN, S.A., WINER, A.M., RODES, C.E. Black carbon concentrations in California vehicles and estimation of in-vehicle diesel exhaust particulate matter exposures. *Atmos Environ.* 38, 4123–4133, 2004.
- FU, Q., THORSEN, T.J., SU, J., GE, J.M. and HUANG, J.P. Test of Mie-based Single-scattering Properties of Non-spherical Dust Aerosols in Radiative Flux Calculations. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2009, 110: 1640–1653.
- GADHAVI, H. and JAYARAMAN, A. Absorbing aerosols: Contribution of biomass burning and implications for radiative forcing. *Ann. Geophys.* 2010, 28: 103–111.
- GUERZONI, S., CHESTER, R., DULAC, F., HERUT, B., LOYE-PILOT, M.-D., MEASURES, C., MIGON, C., MOLINAROLI, E., MOULIN, C., ROSSINI, P., SAYDAM, C., SOUDINE, A., ZIVERI, P. The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography.* 1999, 44, 147–190.
- GUILLAUME, B. Les aérosols: émissions, formation d'aérosols organiques Secondaires, transport longue distance- Zoom sur les aérosols carbonés en Europe, Thèse de Doctorat: physique et chimie de atmosphère: Université Paul Sabatier III, Toulouse. France. 2006.
- HANSEN, A.D.A., KAPUSTIN, V.N., KOPEIKIN, V.M., GILLETTE, D.A., BODHAINE, B.A. Optical absorption by aerosol black carbon and dust in a desert region of central Asia. *Atmos. Environ.* 1993, 27A (16), 2527e2531.
- HEINTZENBERG, J., RAES, F., SCHWARTZ, S.E., ACKERMANN, I., ARTAXO, P., BATES, T.S., BENKOVITZ, C., BIGG, K., BOND, T., BRENGUIER, J.L., FISELE, F.I., FEICHTER, J., FLOSSMAN, A.I., FUZZI, S., GRAF, H.F., HALES, J.H., HERRMANN, H., HOFFMANN, T., HUEBERT, B., HUSAR, R.B., JAENICKE, R., KARCHER, B., KAUFMAN, Y., KENT, G.S., KULMALA, M., LECK, C., LIOUSSE, C., LOHMANN, U., MARTICORENA, B., MCMURRY, P., SEINFELD, J.H., SIEVERING, H., SNIDER, J., SOKOLIK, I., STRATMANN, F., VAN DINGENEN, R., WESTPHAL, D., WEXLER, A.S., WIEDENSOHLER, A., WINKER, D.M., WILSON, J. 2002. Chapter 4, Tropospheric Aerosols, Atmospheric Chemistry in a Changing World, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
- HOBBS, P.V., BOWDLE, D.A., and RADKE, L.F. Particles in the lower troposphere over the high plains of the United States. 1. Size distributions, elemental compositions, and morphologies. *J. Climate Appl. Meteorol.* 1985, 24, 1344-1356.
- HOODA, R. K., KIVEKÄS, N., O'CONNOR, E. J., COLLAUD Coen, M., PIETIKÄINEN, J.-P., VAKKARI, V., BACKMAN, J., HENRIKSSON, S. V., ASMI, E., KOMPPULA, M., KORHONEN, H., HYVÄRINEN, A.-P. and LIHAVAINEN, H. 2018, 'Driving factors of aerosol properties over the foothills of Central Himalayas based on 8.5 years continuous measurements, *J. Geophys. Res. Atmos.* 123(23):13421–13442.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), climate change 2007: the physical Science basis. In: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Tech. Rep.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Technical Summary and Frequently Asked Questions. 2013.

Bibliographie

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change. The Physical Science Basis. 2021.
- JACOBSON, M.Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming. *J of Geophys Res.* 2002. 107 (D19): 4410.
- JACOBSON, M.Z. Short-term effects of controlling fossil-fuel soot, biofuel soot and gases, and methane on climate, Arctic ice, and air pollution health. *J. Geophys. Res. Atmos.* 115. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JD013795>, 2010.
- JAENICKE, R. Tropospheric aerosols, in Aerosol-Cloud-Climate Interactions. *P.V. Hobbs, ed., Academic Press, San Diego, CA.* 1993, pp. 1-31.
- JENNINGS, S.G., SPAIN, T.G., DODDRIDGE, B.G., MARING, H., KELLY, B.P., HANSEN, A.D.A. Concurrent measurements of black carbon aerosol and carbon monoxide at Mace Head. *J. Geophys. Res.* 1996, 101 (D14), 19447e19454.
- JOSE, S., NIRANJAN, K., GHARAI, B., RAO, N.P.V., NAIR, V.S. Characterisation of Absorbing Aerosols Using Ground and Satellite Data at an Urban Location, Hyderabad. *Aerosol and Air Quality Research.* 2016, 16: 1427–1440.
- KARINE Desboeufs. Processus de dissolution des aérosols atmosphériques au sein des gouttes d'eau nuageuses. *Géochimie. Université Paris-Diderot - Paris VII, France,* 2001.
- KERBACHI, R., BOUGHEDAOU, M., BOUNOUA, L., and KEDDAM, M. Ambient air pollution by aromatic hydrocarbons in Algiers. *Atmos Environ.* 2006, 40: 3995–4003. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.02.033.
- KERCHICH, Y., and KERBACHI, R. Measurement of BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene) levels at urban and semirural areas of Algiers City using passive air samplers. *J Air Waste Manag Assoc.* 2012, 62:1370–1379. doi.org/10.1080/10962247.2012.712606.
- KOCH, D., SCHULZ, M., KINNE, S., & KLIMONT, Z. Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models. *Atmos. Chem. Phys.* 10 (1), 79 e 81, 2010.
- KHALIZOV, A.F., ZHANG, R., ZHANG, D., XUE, H., PAGELS, J., and MCMURRY, H. Formation of highly hygroscopic soot aerosols upon internal mixing with sulfuric acid vapor. *J. Geophys. Res.* 2009, 114 (D5), 0148 e 0227. doi.org/10.1029/2008JD010595.
- KORGO, B. Caractérisation optique et microphysique des Aérosols atmosphériques en zone urbaine ouest Africaine: application aux calculs du forçage Radiatif a Ouagadougou, Thèse de Doctorat: Sciences Appliquées Spécialité: Physique de l'atmosphère: Université Blaise Pascal U .F.R. Sciences Et Technologies: Ouagadougou. 2014.
- KOUTSENOGII, P.K., BUFETOV, N.S., and DROSDOVA, V.I. Ion composition of atmospheric aerosol near Lake Baikal. *Atmos. Environ.* 1993, 27A, 1629-1633.
- KOUTSENOGII, P.K., and JAENICKE, R. Number concentration and size distribution of atmospheric aerosol in Siberia. *J. Aerosol Sci.* 1994, 25, 377-383.
- KRECL, P., A. TARGINO, C., and JOHANSSON, C., Spatiotemporal distribution of light-absorbing carbon and its relationship to other atmospheric pollutants in Stockholm, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 11553–11567, 2011.
- LABORDE, M., CRIPPA, M., TRITSCHER, T., JURÁNYI, Z., DECARLO, P. F., TEMIME-ROUSSEL, B., MARCHAND, N., ECKHARDT, S., Stohl, A., BALTENSBERGER, U., PRÉVÔT, A. S. H., WEINGARTNER, E., and GYSEL, M. Black carbon physical properties and mixing state in the European megacity Paris, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 5831–5856, 2013.
- LEAITCH, W.R., et al., 2010. Cloud albedo increase from carbonaceous aerosol. *Atmos. Chem. Phys.* 10 (16), 7669 e 7684. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-10-7669-2010>.
- LEE, K.H., KIM, J.E., KIM, Y.J., KIM, J., VON HOYNINGEN-HUENE, W., 2005. Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003. *Atmos. Environ.* 39, 85–99.
- LEWIS, K., ARNOTT, W.P., MOOSMULLER, H., WOLD, C.E., 2008. Strong spectral variation of biomass smoke light absorption and single scattering albedo observed with a novel dual-wavelength photo acoustic instrument. *J. Geophys. Res.* 113, D16203. doi:10.1029/2007JD009699.

Bibliographie

- LI, N., HAO, M., PHALEN, R.F., HINDS, W.C., and NEL, A.E. Particulate air pollutants and asthma A paradigm for the role of oxidative stress in PM-induced adverse health effects. *Clinical Immunology*. 2003, 109, 250–265.
- MAHMOUD, K.F., ALFARO, S.C., FAVEZ, O., ABDEL WAHAB, M.M., SCIARE, J. Origin of black carbon concentration peaks in Cairo (Egypt), *Atmos Res.* 89 (2008) 161 – 169.
- MAHOWALD, N.M., BAKER, A.R., BERGAMETTI, G., BROOKS, N., DUCE, R.A., JICKELLS, T.D., KUBILAY, N., PROSPERO, J.M., TEGEN, I., 2005. Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean. *Glob. Biogeochem. Cycles* 19, GB4025. <http://dx.doi.org/10.1029/2004GB002402>.
- MASIELLO, C., DRUFFEL, E. Black carbon in deep-sea sediments. *Science*. 280, 1911e1913, 1998.
- MARTIN, J.H., ELBAZ-POULICHET, F., GUIEU, C., LOYE-PILOT, M.D., HAN, G. River versus atmospheric input of material to the Mediterranean: an overview. *Marine Chemistry*. 1989, 28, 159–182.
- MASCLET, P. « Les aérosols atmosphériques » chez *Pollution atmosphérique*, Paris, 2005, p. 73.
- MC KENDRY, I.G., MACDONALD, A.M., LEITCH, W.R., DONKELAAR, A., ZHANG, Q., DUCK, T. and MARTIN, R.V. Trans-Pacific Dust Events Observed at Whistler, British Columbia during INTEX-B. *Atmos. Chem. Phys.* 2008, 8: 6297–6307, doi: 10.5194/acp-8-6297-2008.
- MENON, S., HANSEN, J., NAZARENKO, L., LUO, Y., Climate effects of BC aerosols in China and India. *Science*. 2002; 297:2250–3.
- MERABET, H., KERBACHI, R., MIHALOPOULOS, N., STAVROULAS, I., KANAKIDOU, M., and YASSAA N. Measurement of atmospheric black carbon in some South Mediterranean cities: Seasonal variations and source apportionment. *Clean Air Journal*. 2019, Volume 29, No2. doi.org/10.17159/2410-972X/2019/v29n2a2.
- NAIR, V.S., MOORTHY, K.K., ALAPPATTU, D.P., KUNHIKRISHNAN, P.K., GEORGE, S., NAIR, P.R., BABU, S.S. Wintertime aerosol characteristics over the Indo-Gangetic Plain (IGP): Impacts of local boundary layer processes and long-range transport: Winter aerosols over indo-gangetic plain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2007, Vol. 112 No. D13, p. n/a-n/a.
- OSTRO, B., BROADWIN, R., GREEN, S., FENG, W.Y., LIPSETT, M. Fine particulate air pollution and mortality in nine California countries: results from CALFINE. *Environ. Health Perspect.* 2006, 114, 29–33.
- OTT, S. T., OTT, A., MARTIN, D. W., and YOUNG, J. A. Analysis of trans-Atlantic saharan dust outbreak based on satellite and GATE data, Mon. *Weather Rev.* 119, 1832-1850, 1991.
- OUCHER, N., and KERBACHI, R. Evaluation of air pollution by aerosol particles due to road traffic: a case study from Algeria. *Procedia Eng.* 2012, 33:415–423. doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1221.
- OUCHER, N. Contribution à l'étude, par classe granulométrique, des aérosols particulaires sur un site de proximité à l'ENP. Thèse de Magister. Ecole Nationale Polytechnique. 2007.
- PAKKANEN, T.A., KERMINEN, V.-M., OJANEN, C.H., HILLAMO, R.E., AARNIO, P., KOSKENTALO, T., 2000. Atmospheric black carbon in Helsinki. *Atmos Environ.* 34, 1497–1506.
- PANICKER, A.S., PARK, S.H., LEE, D.I., KIM, D.C., JUNG, W.S., JANG, S.M., JEONG, J.H., KIM, D.S., YU, J., JEONG, H., 2013. Observations of black carbon characteristics and radiative forcing over a global atmosphere watch supersite in Korea. *Atmos Environ.* 77, 98e104.
- PARASKEVOPOULOU, D., LIAKAKOU, E., GERASOPOULOS, E., MIHALOPOULOS, N., Sources of atmospheric aerosol from long-term measurements (5 years) of chemical composition in Athens, Greece, *Sci of the Tot Environ.* 527-528 (2015) 165–178.
- PIOT, Christine, Polluants atmosphériques organiques particulaires en Rhône-Alpes : Caractérisation chimique et sources d'émissions, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France, 2011.
- QIAN, Y., FLANNER, M.G., LEUNG, L.R., WANG, W. Sensitivity studies on the impacts of Tibetan Plateau snowpack pollution on the Asian hydrological cycle and monsoon climate. *Atmos Chem Phys.* 2011, 11:1929.

Bibliographie

- RAMACHANDRAN, S., RAJESH, T.A., 2007. Black carbon aerosol mass concentrations over Ahmedabad, an urban location in western India: comparison with urban sites in Asia, Europe, Canada, and the United States. *J. Geophys. Res.* 112, D06211. <http://dx.doi.org/10.1029/2006JD007488>.
- RAMANATHAN, V., CRUTZEN, P.J., KIEHL, J.T. and ROSENFELD, D. Atmosphere-Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle. *Science*. 2001a, 294: 2119–2124.
- RECHE, C., QUEROL, X., ALASTUEY, A., VIANA, M., PEY, J., MORENO, T., RODRÍGUEZ, S., GONZÁLEZ, Y., FERNÁNDEZ-CAMACHO, SÁNCHEZ DE LA CAMPA, R., A. M., DE LA ROSA, J., DALL’OSTO, M., PRÉVÔT, A. S. H., HUEGLIN, C., HARRISON, R. M., and QUINCEY, P. New considerations for PM, Black Carbon and particle number concentration for air quality monitoring across different European cities, *Atmos. Chem. Phys.* 11, 6207–6227, 2011.
- REDDY, S.K.B., KUMAR, K.R., BALAKRISHNAIAH, G., GOPAL, K.R., REDDY, R.R., REDDY, L.S.S., AHAMMED, Y.N., NARASIMHULU, K., MOORTHY, K.K., BABU, S.S., 2012. Potential source regions contributing to seasonal variations of black carbon aerosols over Anantapur in Southeast India. *Aerosol Air Qual. Res.* 12, 344–358.
- ROBERTS, G.C., NENES, A., SEINFELD, J. H., ANDREAE, M. O. Impact of biomass burning on cloud properties in the Amazon Basin. *J. Geophys. Res. Atmos.* 108 (D2), 4062. <http://dx.doi.org/10.1029/2001JD000985>, 2003.
- ROSENFELD, D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*. 287 (5459), 1793 e 1796, 2000.
- RUSSELL, L.M., et al., 2013. Eastern Pacific emitted aerosol cloud experiment. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94 (5), 709. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00015.1>.
- SAARIKOSKI, S., TIMONEN, H., SAARNIO, K., AURELA, M., JÄRVI, L., KERONEN, P., KERMINEN, V.-M., HILLAMO, R. Sources of organic carbon in fine particulate matter in northern European urban air. *Atmos Chem and Phys.* 8 (2008), 6281e6295.
- SAHA, A., and DESPIAU, S., Seasonal and diurnal variations of black carbon aerosols over a Mediterranean coastal zone, *Atmos Res.* 92 (2009) 27–41.
- SALCEDO, D., ONASCH, T. B., DZEPINA, K., CANAGARATNA, M. R., ZHANG, Q., HUFFMAN, J. A., DECARLO, P. F., JAYNE, J. T., MOR-TIMER, P., WORSNOP, D. R., KOLB, C. E., JOHNSON, K. S., ZUBERI, B., MARR, L. C., VOLKAMER, R., MOLINA, L. T., MOLINA, M. J., CAR-DENAS, B., BERNABÉ, R. M., MÁRQUEZ, C., GAFFNEY, J. S., MARLEY, N. A., LASKIN, A., SHUTTHANANDAN, V., XIE, Y., BRUNE, W., LESHER, R., SHIRLEY, T., and JIMENEZ, J. L.: Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA-2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: results from the CENICA Supersite, *Atmos. Chem. Phys.* 6, 925–946, doi:10.5194/acp-6-925-2006, 2006.
- SANDRADEWI, J., PRÉVÔT, A.S.H., SZIDAT, S., PERRON, N., ALFARRA, M.R., LANZ, V.A., WEINGARTNER, E., BALTENSPERGER, U. Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter. *Environ. Sci. Technol.* 2008b, 42, 3316–3323.
- SAVOIE, D.L., and PROSPERO, J.M. Comparison of oceanic and continental sources of non-seasalt sulfate over the Pacific Ocean. *Nature*. 1989, 339, 685–687.
- SCHMIDT, M.W., MASIELLO, C.A., SKJEMSTAD, J.O. Final recommendations for reference materials in black carbon analysis. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*. 2003, ISSN: 2324-9250 84 (52), 582. <http://dx.doi.org/10.1029/2003EO520006>.
- SCIARE, J., D’ARGOUGES, O., SARDA-ESTÈVE, R., GAIMOZ, C., DOLGOROUKY, C., BONNAIRE, N., FAVEZ, O., BONSANG, B., GROS, V. Large contribution of water-insoluble secondary organic aerosols in the region of Paris (France) during wintertime: WINTERTIME WATER-INSOLUBLE SOA. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2011, Vol. 116 No. D22, p. n/a-n/a.

Bibliographie

- SEGERSSON, D., ENEROTH, K., GIDHAGEN, L., JOHANSSON C., OMSTEDT, G., NYLÉN, A. E., FORSBERG, B., Health Impact of PM10, PM2.5 and Black Carbon Exposure Due to Different Source Sectors in Stockholm, Gothenburg and Umea, Sweden, MDPI, Greece. 2017, 14, 742.
- SEIDEL, DIAN, J., BIRNBAUM, ABIGAIL, N., Effects of Independence Day fireworks on atmospheric concentrations of fine particulate matter in the United States, *Atmos Environ.* 115 (2015) 192e198.
- SEINFELD, John H., PANDIS, Spyros N. Atmospheric chemistry and physics, From Air Pollution to Climate Change. *John Wiley & Sons, Inc.* 2006.
- SHAW, G.E. On physical properties of aerosols at Ross Island, Antarctica. *J. Aerosol Sci.* 1986, 17, 937-945.
- SILLANPÄÄ, M., FREY, A., HILLAMO, R., PENNANEN, A., SPOLNIK, Z., VAN GRIEKEN, R., SANDELL, E., PENNANEN, A.S., SALONEN, R.O., 2005. Organic, elemental and inorganic carbon in particulate matter of six urban environments in Europe. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 2869–2879.
- SINGH, R.P., KUMAR, S., and SINGH, A.K. Elevated Black Carbon Concentrations and Atmospheric Pollution around Singrauli Coal-Fired Thermal Power Plants (India) Using Ground and Satellite Data, MDPI, Greece. 2018, 15, 2472.
- STULL, R.B., 1988. An introduction to boundary layer meteorology. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht. 680 pp.
- SUN, Y. L., JIANG, Q., WANG, Z. F., FU, P. Q., LI, J., YANG, T., and YIN, Y.: Investigation of the sources and evolution processes of severe haze pollution in Beijing in January 2013, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 119, 4380–4398, <https://doi.org/10.1002/2014JD021641>, 2014.
- TALBI, A., KERCHICH, Y., KERBACHI, R., and BOUGHEDAOU, M. Assessment of annual air pollution levels with PM1, PM2.5, PM10 and associated heavy metals in Algiers, Algeria. *Environ Pollut.* 2017, 232:252–263. doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.041.
- TARGINO, A. C., KRECL, P., Local and Regional Contributions to Black Carbon Aerosols in a Mid-Sized City in Southern Brazil, *Aerosol and Air Quality Res.* 16: 125–137, 2016.
- THEODOSI, C., MARKAKI, Z., TSELEPIDES, A., MIHALOPOULOS, N. The significance of atmospheric inputs of soluble and particulate major and trace metals to the eastern Mediterranean seawater, *Mar Chem.* (2010).
- TIWARI, S., SRIVASTAVA, A.K., BISHT, D.S., PARMITA, P., SRIVASTAVA, M.K., ATTRI, S.D. Diurnal and seasonal variations of black carbon and PM2.5 over New Delhi, India: influence of meteorology. *Atmos. Res.* 2013, 125–126, 50–62.
- TOMBETTE, M. « Modélisation des aérosols et de leurs propriétés optiques sur l'Europe et l'Ile de France : Validation, sensibilité et assimilation de données », Thèse de Doctorat, Ecole des Ponts ParisTech, France, 2007.
- ULEVICIUS, V., BYČENKIENĖ, S., REMEIKIS, V., GARBARAS, A., KECORIUS, S., ANDRIEJAUSKIENĖ, J., JASINEVIČIENĖ, D., MOCNIK, G., Characterization of pollution events in the East Baltic region affected by regional biomass fire emissions, *Atmos Res.* 98 (2010) 190–200.
- VENKATACHARI, P., ZHOU, L. M., HOPKE, P. K., FELTON, D., RATTIGAN, O. V., SCHWAB, J. J., and DEMERJIAN, K. L. Spatial and temporal variability of black carbon in New York City, *J. Geophys. Res.-Atmos.* 111, D10s05, [doi:10.1029/2005jd006314](https://doi.org/10.1029/2005jd006314), 2006.
- VIRKKULA, A., MAKELA, T., HILLAMO, R., YLI-TUOMI, T., HIRSIKKO, A., HAMERI, K., KOPONEN, I.K. A simple procedure for correcting loading effects of aethalometer data. *J of the Air & Waste Manag Assoc.* 2007, 57, 1214 e 1222.
- VODIČKA, P., SCHWARZ, J., ŽDÍMAL, V. Analysis of one year's OC/EC data at a Prague suburban site with 2-h time resolution, *Atmospheric Environment* 77 (2013) 865e872.
- WANG, X., PU, W., SHI, J., BI, J., ZHOU, T., ZHANG, X. and REN, Y. A Comparison of the Physical and Optical Properties of Anthropogenic air Pollutants and Mineral Dust over Northwest China. *J. Meteorol. Res.* 2015, 29: 180–200, [doi: 10.1007/s13351-015-4092-0](https://doi.org/10.1007/s13351-015-4092-0).

Bibliographie

- WANG, Z., HUANG, X., and DING, A. Dome effect of black carbon and its key influencing factors: a one-dimensional modelling study. *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, 18, 2821–2834.
- WATSON, TB. Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM) Instrument Handbook. Brookhaven National Laboratory, US Department of Energy, 2017.
- WU, D., WU, C., LIAO, B., CHEN, H., WU, M., LI, F., TAN, H., DENG, T., LI, H., JIANG, D., and YU, J. Z., Black carbon over the South China Sea and in various continental locations in South China, *Atmos. Chem. Phys.* 13, 12257–12270, 2013.
- XUE, H., KHALIZOV, A.F., WANG, L., ZHENG, Jun., and ZHANG, R. Effects of dicarboxylic acid coating on the optical properties of soot. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2009, 11 (36), 7869.
- YANG, L. X., WANG, D. C., CHENG, S. H., WANG, Z., ZHOU, Y., ZHOU, X. H., and WANG, W. X.: Influence of meteorological conditions and particulate matter on visual range impairment in Jinan, China, *Sci. Total Environ.*, 383, 164–173, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.042>, 2007.
- YASSAA, N., MEKLATI, B.Y., CECINATO, A., MARINO, F. Organic aerosols in urban and waste landfill of Algiers metropolitan area: occurrence and sources. *Environ sci & tech.* 2001, 35 (2), 306-311.
- YUXIANG, Y., YUZHEN, F., QINHAO, L., FENG, J., XIUFENG, L., LEI, L., ZHANYONG, W., GUOHUA, Z., XINHUI, B., XINMING, W., GUOYING, S., Recent Advances in Quantifying Wet Scavenging Efficiency of Black Carbon Aerosol, MDPI, Greece. 2019, 10, 175.
- ZHANG, R., KHALIZOV, A. F., PAGELS, J., ZHANG, Dan., XUE, H., and McMurry, P. H. Variability in morphology, hygroscopicity, and optical properties of soot aerosols during atmospheric processing. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2008, 105 (30), 10291 e 10296.
- ZHANG, R., HEGG, D.A., HUANG, J. and FU, Q. Source Attribution of Insoluble Light-absorbing Particles in Seasonal Snow across Northern China. *Atmos. Chem. Phys.* 2013.13: 6091–6099.
- ZHOU, T., HUANG, J.P., HUANG, Z.W., LIU, J.J., WANG, W.C. and LIN, L. The Depolarization-attenuated Backscatter Relationship for Dust Plumes. *Opt. Express.* 2013, 13: 15195–15204, doi: 10.1364/OE.21.015195.
- ZHUANG, B.L., LIU, L., SHEN, F.H., WANG, T.J., HAN, Y. Semidirect radiative forcing of internal mixed black carbon cloud droplet and its regional climatic effect over China. *Journal of Geophysical Research.* 2010, 115, D00K19.
- ZHUANG B.L., WANG, T.J., LIU, J., LI, S., XIE, M., YANG, X.Q., FU, C.B., SUN, J.N., YIN, C.Q., LIAO, J.B., ZHU, J.L., and ZHANG, Y. Continuous measurement of black carbon aerosol in urban Nanjing of Yangtze River Delta, China. *Atmos Environ.* 89 (2014) 415-424.

Autres sites

- <http://www.ons.dz/-Au-31-12-2013-.html>
- <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>
- <http://www.consoglobe.com/feu-artifice-magie-agresse-planete-3397-cg>
- https://omer7a.obsmp.fr/content/download/10513/73122/file/Effets_polluants_sante_humaine.pdf
- <http://www.ons.dz/-Au-31-12-2013-.html>
- <http://www.ons.dz/-Au-31-12-2013-.html>
- www.flashnews.gr
- <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>
- <https://cnma.dz/wp-content/uploads/2017/08/QUOTIDIEN-07-08-2017.pdf>

Annexes

Annexe 1 : Cartes des vents annuelles.

Nous présentons à la Figure 124 la carte des vents de la zone d'étude durant l'année 2006. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Est avec 38,71% contre 22,58% pour le Sud et 19,35% pour le Nord-Ouest en Janvier ;
- Nord-Ouest avec 39,28% contre 35,71% pour l'Ouest en Février ;
- Nord-Ouest et Ouest avec 41,94% contre 9,68% pour le Sud en Mars ;
- Sud avec 33,33% contre 30,00% pour le Nord-Ouest et 20,00% pour l'Ouest en Avril ;
- Sud avec 54,84% contre 16,13% pour la source Locale et 12,90% pour le Nord-Est en Mai ;
- Sud avec 56,67% contre 16,67% pour le Nord-Est et 10,00% pour l'Ouest et le Nord-Ouest en Juin ;
- Nord-Est avec 35,48% suivie par le Sud avec 22,58% et le Nord-Ouest avec 16,13% en Juillet ;
- Nord-Ouest avec 29,03% contre 25,81% pour le Nord-Est et 19,35% pour l'Ouest en Aout ;
- Ouest avec 26,67% contre 23,33% pour le Nord-Ouest et 20,00% pour le Sud en Septembre ;
- Sud avec 29,03% contre 22,58% pour le Nord-Est et 19,35% pour l'Ouest et le Nord-Ouest en Octobre ;
- Sud avec 50,00% suivie par l'Ouest, le Nord-Est et le Nord-Ouest avec 16,67% en Novembre.
- Sud avec 29,03% suivie par l'Ouest, le Nord-Est et le Nord-Ouest avec 22,58% en Décembre.

Les vents prédominants durant l'année 2006 sont de : Sud (29,28%), Nord-Ouest (22,57%), Ouest (19,57) et Nord-Est (18,49%).

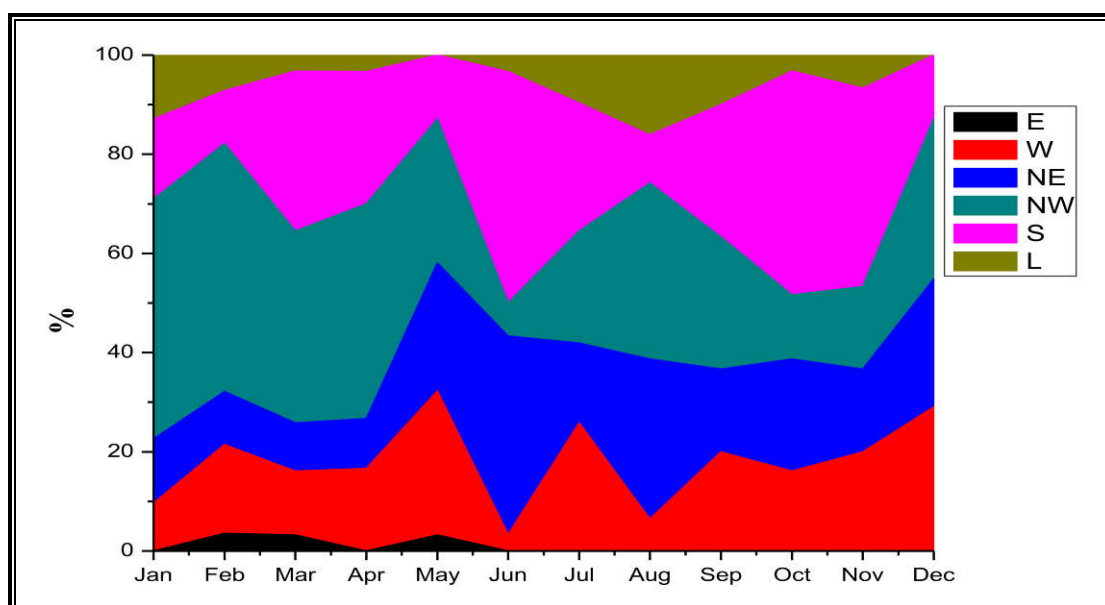


Fig. 124. Carte des vents de la zone d'étude en 2006

Nous présentons à la Figure 125 la carte des vents de la zone d'étude durant l'année 2007. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 38,71% contre 32,26% pour le Sud et 19,35% pour l'Ouest en Janvier ;
- Nord-Ouest avec 53,57% contre 28,57% pour l'Ouest et 10,71% pour le Sud en Février ;
- Nord-Ouest avec 38,71% contre 32,26% pour l'Ouest et 19,35% pour le Sud en Mars ;
- Sud avec 33,33% contre 20,00% pour l'Est et l'Ouest en Avril ;
- Nord-Ouest avec 35,48% contre 32,26% pour l'Ouest et 22,58% pour le Sud en Mai ;
- Sud avec 40,00% contre 23,33% pour l'Ouest Sud et 16,67% pour le Nord-Est en Juin ;
- Ouest et Sud avec 25,81% suivie par le Nord-Est et le Nord-Ouest avec 19,35% en Juillet ;
- Sud avec 38,71% contre 19,35% pour l'Ouest et 16,13% pour le Nord-Ouest en Aout ;
- Sud avec 36,67% contre 26,67% pour le Nord-Est et 20,00% pour le Nord-Ouest en Septembre ;
- Sud avec 35,48% contre 29,03% pour le Nord-Ouest et 16,13% pour l'Ouest et le Nord-Est en Octobre ;
- Nord-Est avec 43,33% suivie par le Nord-Ouest avec 30,00% et 10,00% pour le Sud et l'Ouest en Novembre.
- Nord-Ouest avec 32,26% suivie par le Nord-Est avec 25,80% et 22,58% pour le Sud en Décembre.

Les vents prédominants durant l'année 2007 sont de : Nord-Ouest (28,33%), Sud (27,29%), Ouest (21,10%) et Nord-Est (16,70%).

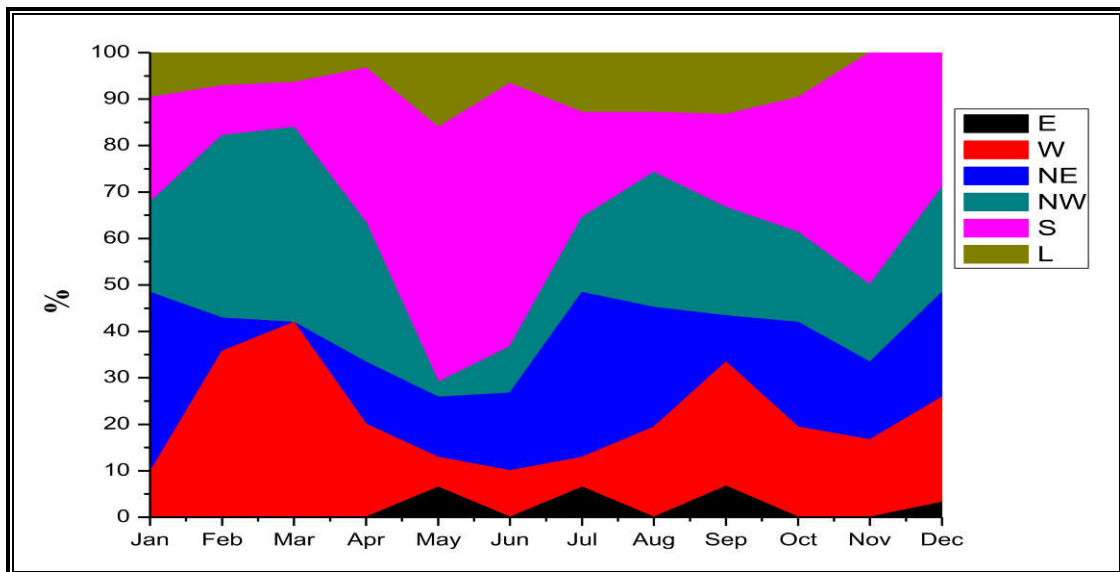


Fig. 125. Carte des vents de la zone d'étude en 2007

Nous présentons à la Figure 126 la carte des vents de la zone d'étude durant l'année 2008. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 38,71% contre 19,35% pour l'Ouest et le Sud et 12,90% pour le Nord-Est en Janvier ;
- Sud avec 50.00% contre 21,43 pour l'Ouest et 17,86% pour le Nord-Est en Février ;
- Nord-Ouest avec 51,61% contre 29,03% pour l'Ouest en Mars ;
- Nord-Ouest avec 40,00% contre 26,67% pour l'Ouest et 20,00% pour le Nord-Est en Avril ;
- Ouest avec 38,71% contre 25,81% pour le Nord-Ouest et 22,58% pour le Sud en Mai ;

- Sud avec 33,33% contre 20,00% pour le Nord-Ouest et 13,33% pour l'Ouest et le Nord-Est en Juin ;
- Locale avec 29,03% suivie par l'Ouest et le Sud avec 25,81% en Juillet ;
- Sud avec 25,81% contre 25,58% pour la source Locale et 16,13% pour l'Ouest, le Nord-Est et le Nord-Ouest au mois d'Aout ;
- Sud avec 30,00% contre 26,67% pour l'Ouest, 20,00% pour le Nord-Ouest et 16,67% pour le Nord-Est en Septembre ;
- Sud avec 51,61% contre 25,81% pour l'Ouest et 9,68% pour le Nord-Est en Octobre ;
- Sud avec 43,33% suivie par le Nord-Ouest avec 36,67% et l'Ouest avec 20,00% en Novembre.
- Nord-Ouest avec 38,71% suivie par l'Ouest avec 32,26% et le Sud avec 12,90% en Décembre.

Les vents prédominants durant l'année 2008 sont de : Sud (27,88%), Nord-Ouest (25,64%) et Ouest (24,60%).

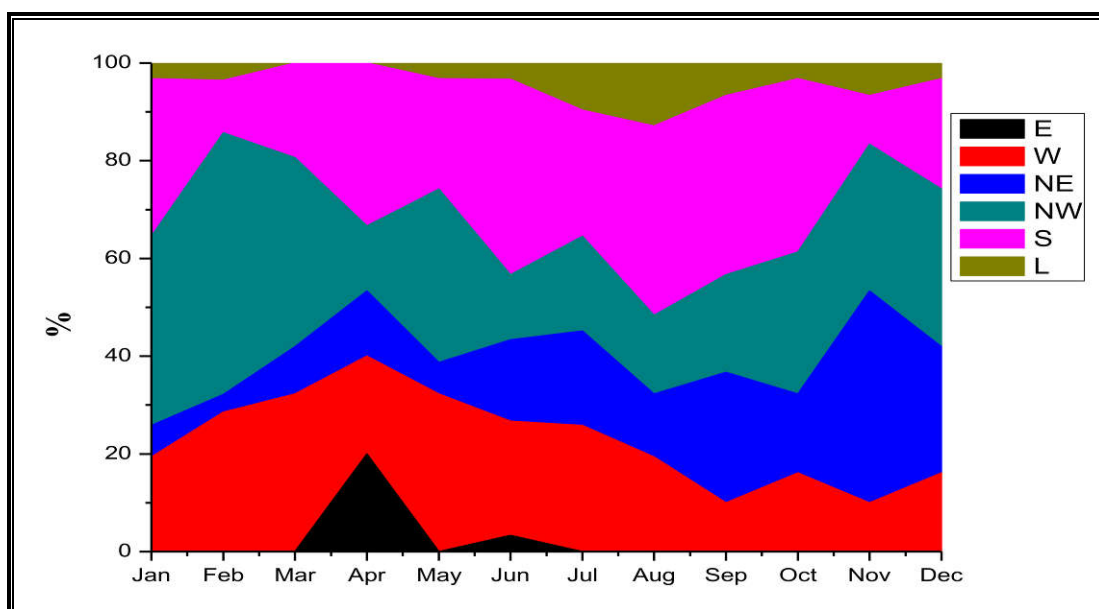


Fig. 126. Carte des vents de la zone d'étude en 2008

Nous présentons à la Figure 127 la carte des vents de la zone d'étude durant l'année 2009. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 51,61% contre 32,26% pour l'Ouest et 12,90% pour le Sud en Janvier ;
- Nord-Ouest avec 42,86% contre 25,00% pour l'Ouest et 14,86% pour l'Ouest et le Sud en Février ;
- Nord-Est avec 29,03% contre 22,58% pour l'Ouest et le Nord-Ouest et 16,13% pour le Sud en Mars ;
- Nord-Ouest avec 40,00% contre 36,67% pour l'Ouest et 13,33% pour le Sud en Avril ;
- Sud avec 51,61% contre 22,58% pour le Nord-Est et 16,13% pour le Nord-Ouest en Mai ;
- Ouest avec 33,33% contre 30,00% pour le Sud et 13,33% pour le Nord-Est en Juin ;
- Sud avec 41,94% suivie par l'Ouest avec 32,26% et 10,92% pour la source Locale en Juillet ;
- Nord-Est et Sud avec 25,81% contre 19,35% pour l'Ouest en Aout ;
- Nord-Est avec 30,00% suivie par l'Ouest et le Sud avec 23,33% contre 13,33% pour le Nord-Ouest en Septembre ;

- Nord-Ouest avec 54,84% contre 16,13% pour le Nord-Est et le Sud en Octobre ;
- Sud avec 36,67% suivie par le Nord-Ouest avec 33,33% et l'Ouest avec 23,33% en Novembre.
- Ouest avec 45,16% suivie par le Nord-Ouest avec 29,03% et le Sud avec 19,35% en Décembre.

Les vents prédominants durant l'année 2009 sont de : Nord-Ouest (26,41%), Ouest (25,78%), Sud (25,12%) et Nord-Est (15,04%).

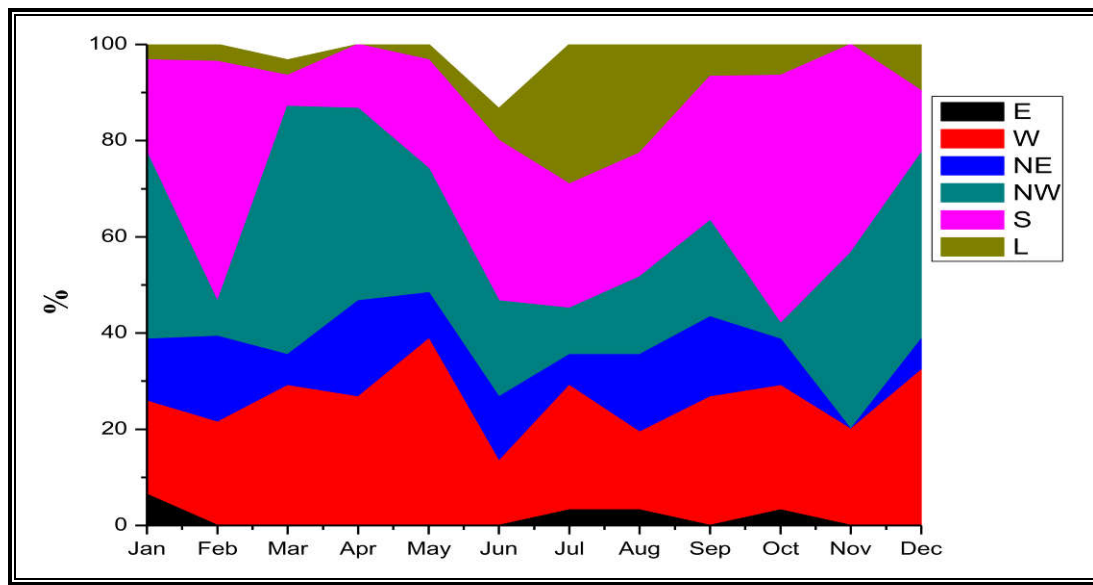


Fig. 127. Carte des vents de la zone d'étude en 2009

Nous présentons à la Figure 128 la carte des vents de la zone d'étude durant l'année 2011. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Sud avec 35,48% contre 32,26% pour l'Ouest et 22,58% pour le Nord-Ouest en Janvier ;
- Nord-Ouest avec 50,00% contre 25,00% pour l'Ouest et 17,86% pour le Sud en Février ;
- Sud avec 51,61% contre 22,58% pour le Nord-Ouest et 16,13% pour l'Ouest en Mars ;
- Sud avec 40,00% contre 30,00% pour le Nord-Est et 10,00% pour l'Ouest et le Nord-Ouest en Avril ;
- Sud avec 35,48% contre 22,58% pour le Nord-Est et le Nord-Ouest et 16,13% pour l'Ouest en Mai ;
- Nord-Est avec 33,33% contre 23,33% pour l'Ouest et 16,67% pour la source Locale en Juin ;
- Sud avec 32,26% suivie par le Nord-Est avec 29,03% et 22,58% pour l'Ouest en Juillet ;
- Sud avec 32,26% contre 22,58% pour le Nord-Est et 19,35% pour l'Ouest en Aout ;
- Nord-Est avec 30,00% contre 20,00% pour l'Ouest et la source Locale et 16,67% pour le Nord-Ouest en Septembre ;
- Nord-Est avec 38,71% contre 35,48% pour le Sud et 12,90% pour le Nord-Ouest en Octobre ;
- Sud avec 33,33% suivie par l'Ouest avec 23,33% et le Nord-Est, le Nord-Ouest et la source Locale avec 13,33% en Novembre.
- Nord-Ouest avec 41,94% suivie par l'Ouest avec 25,81% et le Sud avec 19,35% en Décembre.

Les vents prédominants durant l'année 2011 sont de : Sud (29,98%), Nord-Est (21,01%), Nord-Ouest (20,71%) et Ouest (20,03%).

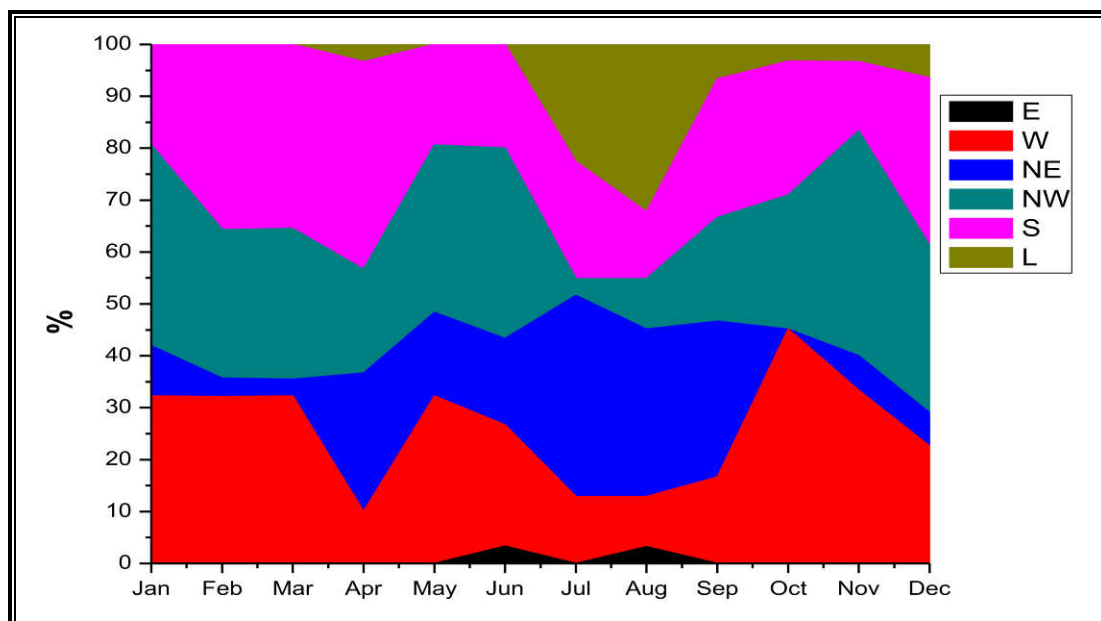


Fig. 128. Carte des vents de la zone d'étude en 2011

Nous présentons à la Figure 129 la carte des vents de la zone d'étude durant 2012. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 48,39% contre 16,13% pour l'Ouest et le Sud et 12,90% pour le Nord-Est en Janvier ;
- Nord-Ouest avec 53,57% contre 21,43% pour le Nord-Est et 14,29% pour l'Ouest en Février ;
- Sud avec 35,48% contre 19,35% pour le Nord-Est et le Nord-Ouest en Mars ;
- Ouest avec 43,33% contre 30,00% pour le Nord-Ouest et 23,33% pour le Sud en Avril ;
- Nord-Est avec 29,03% contre 25,81% pour le Nord-Ouest et 22,58% pour l'Ouest en Mai ;
- Sud avec 36,67% contre 30,00% pour l'Ouest et 13,33% pour le Nord-Est et le Nord-Ouest en Juin ;
- Ouest avec 35,48% suivie par le Sud avec 29,03% et 19,35% pour le Nord-Est en Juillet ;
- Ouest avec 41,94% contre 35,48% pour le Sud en Aout ;
- Sud avec 43,33% contre 20,00% pour le Nord-Est et 13,33% pour l'Ouest et le Nord-Ouest en Septembre ;
- Ouest et Sud avec 35,48% contre 29,03% pour le Nord-Ouest en Octobre ;
- Sud avec 63,33% suivie par l'Ouest et le Nord-Ouest avec 13,33% et 10,00% pour le Nord-Est en Novembre.
- Nord-Ouest avec 51,61% suivie par l'Ouest avec 35,48% et 9,68% pour le Sud en Décembre.

Les vents prédominants durant l'année 2012 sont de : Sud (28,73%), Ouest (25,92%), Nord-Ouest (25,62%) et Nord-Est (12,65%).

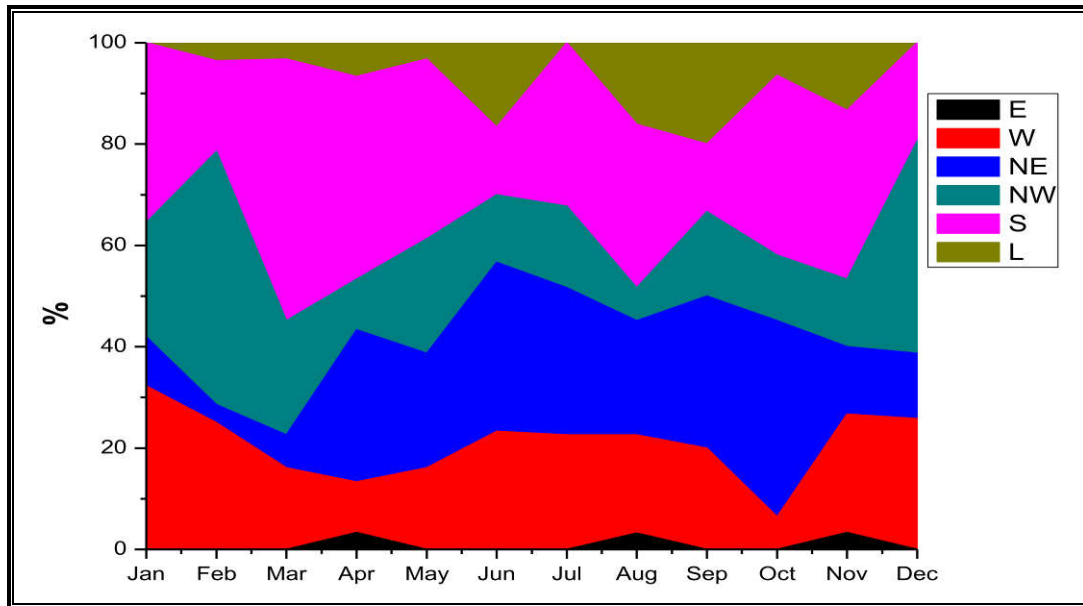


Fig. 129. Carte des vents de la zone d'étude en 2012

Nous présentons à la Figure 130 la carte des vents de la zone d'étude durant 2013. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 48,39% contre 41,94% pour l'Ouest en Janvier ;
- Nord-Ouest avec 57,14% contre 25,00% pour l'Ouest et 14,29% pour le Sud en Février ;
- Ouest avec 51,61% contre 22,58% pour le Nord-Ouest et le Sud en Mars ;
- Ouest et Nord-Est avec 26,67% contre 20,00% pour le Nord-Ouest et 16,67% pour le Sud en Avril ;
- Ouest avec 54,84% contre 16,13% pour le Nord-Est et 12,90% pour le Sud en Mai ;
- Nord-Est avec 50,00% contre 16,67% pour le Nord-Ouest et 13,33% pour l'Ouest et la source Locale en Juin ;
- Nord-Est avec 48,39% suivie par le Sud avec 25,81% et la source Locale avec 16,13% en Juillet ;
- Nord-Est avec 51,61% contre 25,81% pour le Sud et 9,68% pour l'Est en Aout ;
- Sud avec 40,00% contre 23,33% pour l'Ouest et 20,00% pour le Nord-Est en Septembre ;
- Sud avec 51,61% contre 22,58% pour l'Ouest et 12,90% pour le Nord-Ouest en Octobre ;
- Nord-Ouest avec 66,67% suivie par le Sud avec 13,33% et l'Ouest ainsi que le Nord-Est avec 10,00% en Novembre.
- Nord-Ouest avec 32,26% suivie par le Sud avec 29,03% et l'Ouest avec 16,13% en Décembre.

Les vents prédominants durant l'année 2013 sont de : Nord-Ouest (24,94%), Ouest (24,59%), Sud (21,56%) et Nord-Est (21,01%).

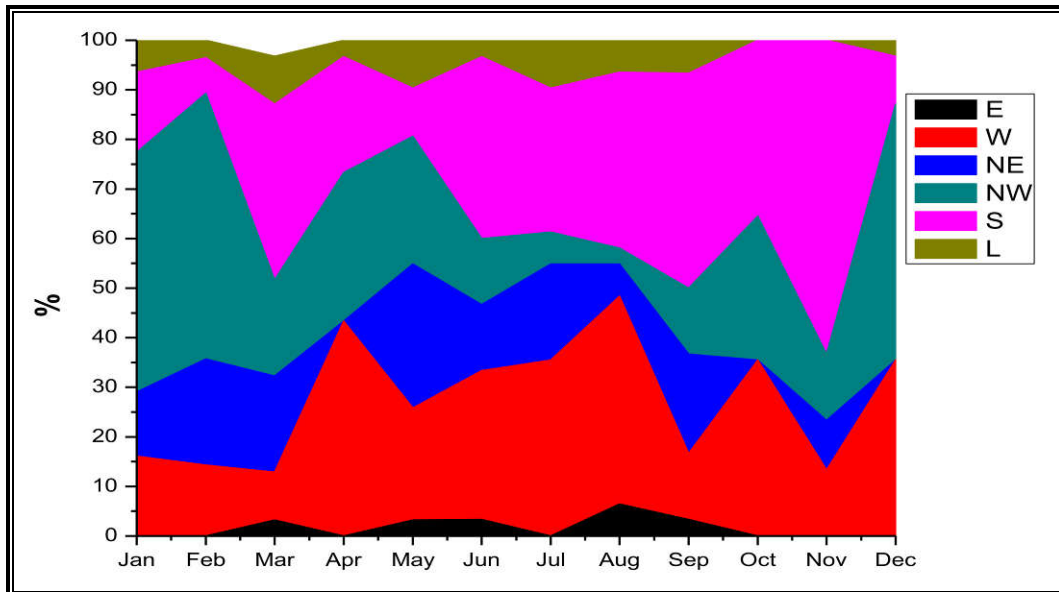


Fig. 130. Carte des vents de la zone d'étude en 2013

Nous présentons à la Figure 131 la carte des vents de la zone d'étude durant 2014. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 41,94% contre 25,81% pour l'Ouest et le Sud en Janvier ;
- Nord-Ouest avec 50,00% contre 32,14% pour l'Ouest et 17,86% pour le Sud en Février ;
- Nord-Ouest avec 32,26% contre 25,81% pour le Nord-Est et 22,58% pour le Sud en Mars ;
- Nord-Ouest avec 36,67% contre 26,67% pour l'Ouest et 16,67% pour le Sud en Avril ;
- Nord-Est, Nord-Ouest et Sud avec 22,58% contre 19,35% pour la source Locale et 12,90% pour l'Ouest en Mai ;
- Sud avec 33,33% contre 23,33% pour le Nord-Est et 20,00% pour l'Ouest en Juin ;
- Nord-Ouest avec 29,03% suivie par le Nord-Est et l'Ouest avec 22,58% et le Sud avec 12,90% en Juillet ;
- Ouest avec 48,39% contre 22,58% pour le Sud et la source Locale au mois d'Aout ;
- Ouest avec 43,33% contre 40,00% pour le Sud en Septembre ;
- Sud avec 45,16% contre 29,03% pour le Nord-Est et 19,35% pour le Nord-Ouest en Octobre ;
- Sud avec 60,00% suivie par l'Ouest avec 30,00% en Novembre.
- Nord-Ouest avec 48,39% suivie par l'Ouest avec 29,03% et le Sud avec 16,13% en Décembre.

Les vents prédominants durant l'année 2014 sont de : Sud (27,97%), Nord-Ouest (25,57%), Ouest (25,04%) et Nord-Est (12,47%).

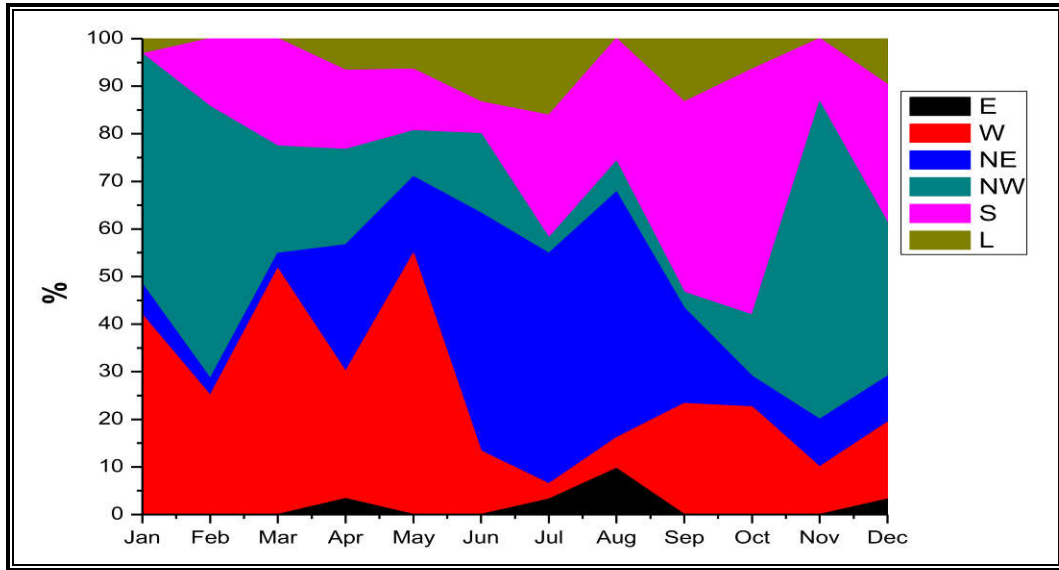


Fig. 131. Carte des vents de la zone d'étude en 2014

Annexe 2 : Cartes des vents mensuelles.

Nous présentons à la Figure 132 la carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Février de 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 50,00% contre 17,86% pour l'Ouest en 2005 ;
- Nord-Ouest avec 39,28% contre 35,71% pour l'Ouest en 2006 ;
- Nord-Ouest avec 53,57% contre 28,57% pour l'Ouest en 2007 ;
- Sud avec 50,00% contre 21,43% pour l'Ouest en 2008 ;
- Nord-Ouest avec 42,86% contre 14,28 pour l'Ouest et le Sud en 2009 ;
- Sud avec 35,71% contre 32,14% pour l'Ouest et 28,57% pour le Nord-Ouest en 2010 ;
- Nord-Ouest avec 50,00% suivie par l'Ouest avec 25,00% et le Sud avec 17,86% en 2011 ;
- Nord-Ouest avec 53,57% contre 21,43% pour le Nord-Est en 2012 ;
- Nord-Ouest avec 57,14% contre 25,00% pour l'Ouest en 2013 ;
- Nord-Ouest avec 50,00% contre 32,14% pour l'Ouest et 17,86% pour le Sud en 2014 ;
- Nord-Ouest avec 64,28% en 2015.

Les directions des vents prédominantes durant le mois de Février de 2005 à 2015 sont de : Nord-Ouest (45,13%), Ouest (24,35%) et Sud (18,18%).

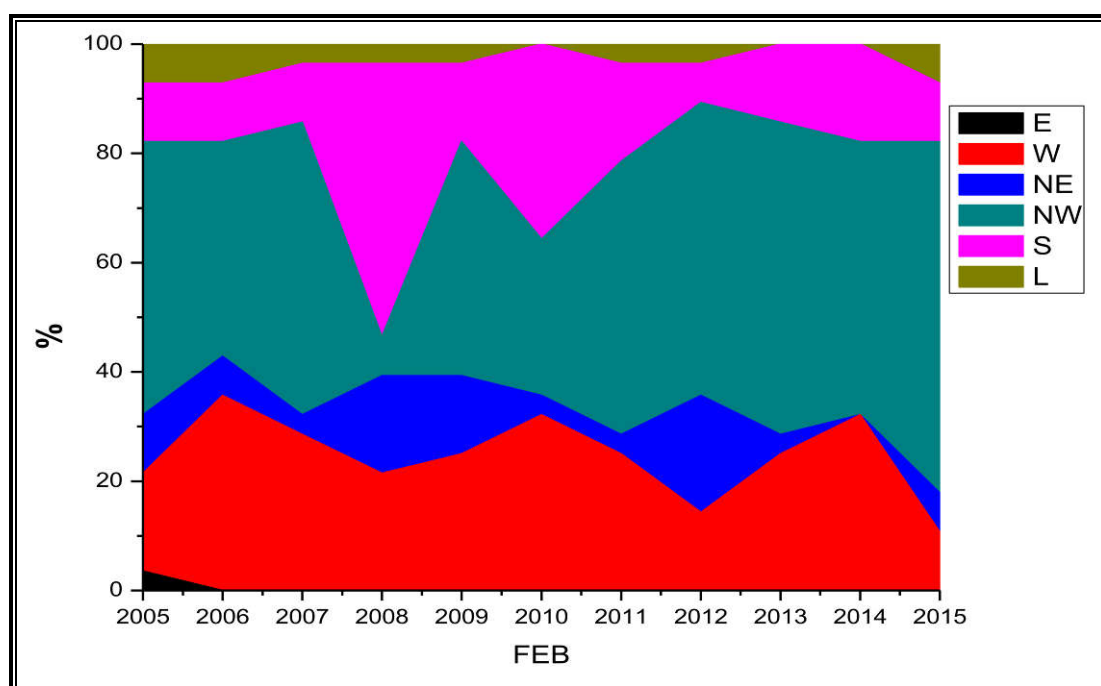


Fig. 132. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Février de 2005 à 2015

Nous présentons à la Figure 133 la carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Mars de 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 38,71% contre 32,26% pour le Sud en 2005 ;
- Nord-Ouest et Ouest avec 41,94% en 2006 ;
- Nord-Ouest avec 38,71% contre 32,26% pour l'Ouest et 19,35% pour le Sud en 2007 ;
- Nord-Ouest avec 51,61% contre 29,03% pour l'Ouest en 2008 ;
- Nord-Est avec 29,03% contre 22,58% pour l'Ouest et le Nord-Ouest en 2009 ;
- Sud avec 35,48% contre 32,26% pour l'Ouest et 29,03% pour le Nord-Ouest en 2010 ;
- Sud avec 51,61% suivie par le Nord-Ouest avec 22,58% et l'Ouest avec 16,13% en 2011 ;
- Sud avec 35,48% contre 19,35% pour le Nord-Est et l'Ouest en 2012 ;

- Ouest avec 51,61% contre 22,58% pour le Nord-Ouest et le Sud en 2013 ;
- Nord-Ouest avec 32,26% contre 25,80% pour le Nord-Est et 22,58% pour le Sud en 2014 ;
- Nord-Ouest avec 54,84% contre 22,58% pour le Sud en 2015.

Les directions des vents prédominantes durant le mois de Mars de 2005 à 2015 sont de : Nord-Ouest (34,02%), Sud (24,99) et Ouest (23,17%).

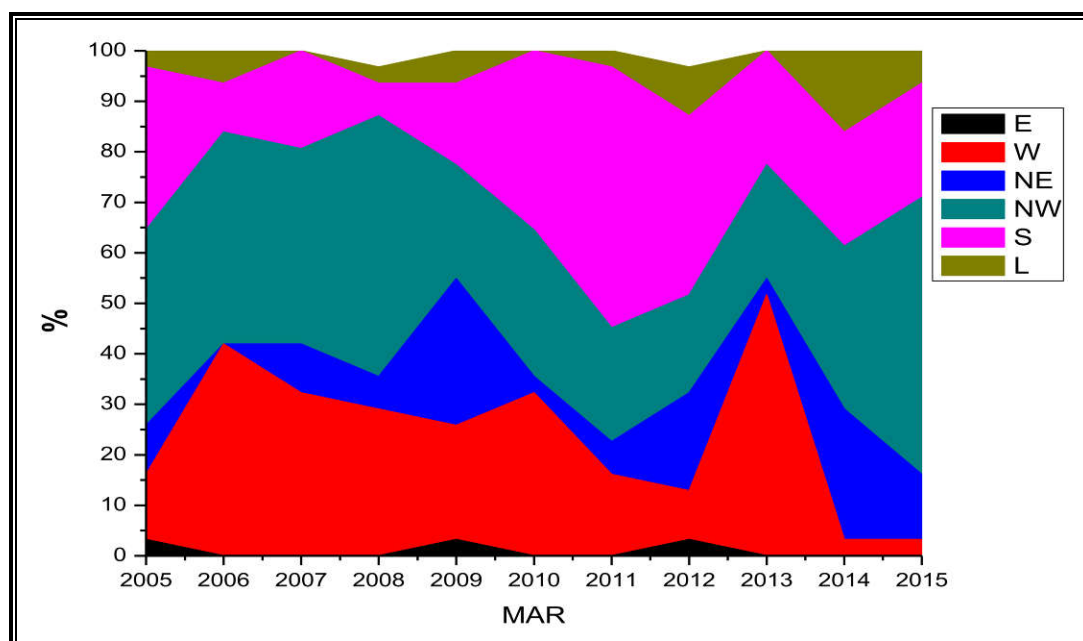


Fig. 133. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Mars de 2005 à 2015

Nous présentons à la Figure 134 la carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Mai de 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest et Ouest avec 29,03% contre 25,80% pour le Nord-Est en 2005 ;
- Sud avec 54,84% contre 16,12% pour la source Locale et 12,90% pour le Nord-Est en 2006 ;
- Nord-Ouest avec 35,48% contre 32,25% pour l'Ouest et 22,58% pour le Sud en 2007 ;
- Ouest avec 38,71% contre 25,80% pour le Nord-Ouest et 22,58% pour le Sud en 2008 ;
- Sud avec 51,61% contre 22,58% pour le Nord-Est et 16,13% pour le Nord-Ouest en 2009 ;
- Ouest et Nord-Ouest avec 32,26% contre 19,35% pour le Sud et 16,13% pour le Nord-Est en 2010 ;
- Sud avec 35,48% suivie par le Nord-Est et le Nord-Ouest avec 22,58% en 2011 ;
- Nord-Est avec 29,03% contre 25,80% pour le Nord-Ouest et 22,58% pour l'Ouest en 2012 ;
- Ouest avec avec 54,84% contre 16,13% pour l'Ouest et 12,90% pour le Sud en 2013 ;
- Nord-Est, Nord-Ouest et Sud avec 22,58% contre 19,35% pour la source Locale et 12,90% pour l'Ouest en 2014 ;
- Locale avec 29,03% suivie par le Nord-Est et le Nord-Ouest avec 22,58% et 16,13% pour le Sud en 2015.

Les directions des vents prédominantes durant le mois de Mai de 2005 à 2015 sont de : Sud (25,51%), Ouest (23,75%), Nord-Ouest (22,29%) et Nord-Est (18,77%).

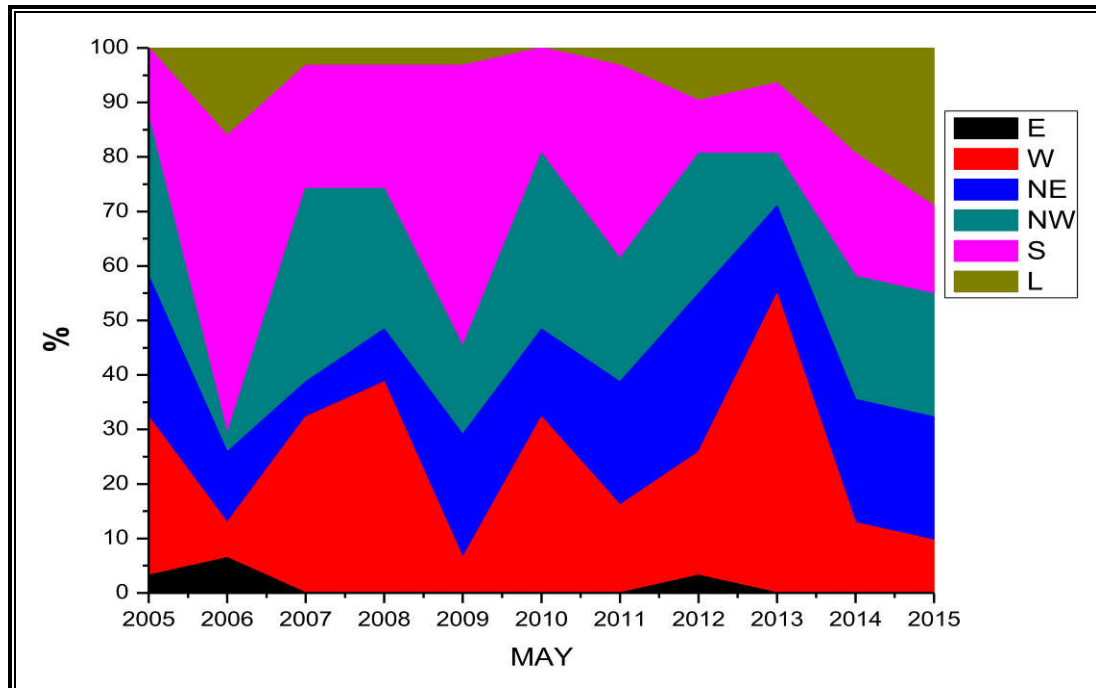


Fig. 134. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Mai de 2005 à 2015

Nous présentons à la Figure 135 la carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Juin de l'année 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Sud avec 46,66% contre 40,00% pour le Nord-Est en 2005 ;
- Sud avec 56,66% contre 16,66% pour le Nord-Est en 2006 ;
- Sud avec 40,00% contre 23,33% pour l'Ouest et 22,58% et 16,66% pour le Nord-Est en 2007 ;
- Sud avec 33,33% contre 20,00% pour le Nord-Ouest et 13,33% pour l'Ouest et le Nord-Est en 2008 ;
- Ouest avec 33,33% contre 30,00% pour le Sud et 13,33% pour le Nord-Est en 2009 ;
- Ouest et Nord-Ouest avec 36,66% contre 23,33% pour l'Ouest, 20,00% pour le Sud et 16,66% pour le Nord-Est en 2010 ;
- Nord-Est avec 33,33% suivie par l'Ouest avec 23,33% et la source Locale avec 16,66% en 2011 ;
- Sud avec 36,66% contre 30,00% pour l'Ouest et 13,33% pour le Nord-Est et le Nord-Ouest en 2012 ;
- Nord-Est avec 50,00% contre 16,66% pour le Nord-Ouest et 13,33% pour l'Ouest et la source Locale en 2013 ;
- Sud avec 33,33% contre 23,33% pour le Nord-Est et 20,00% pour l'Ouest en 2014 ;
- Nord-Est avec 36,66% suivie par l'Ouest avec 20,00% et 13,33% pour l'Est et le Nord-Ouest en 2015.

Les directions des vents prédominantes durant le mois de Juin de 2005 à 2015 sont de : Sud (29,70%), Nord-Est (24,85%), Ouest (19,39%) et Nord-Ouest (15,15%).

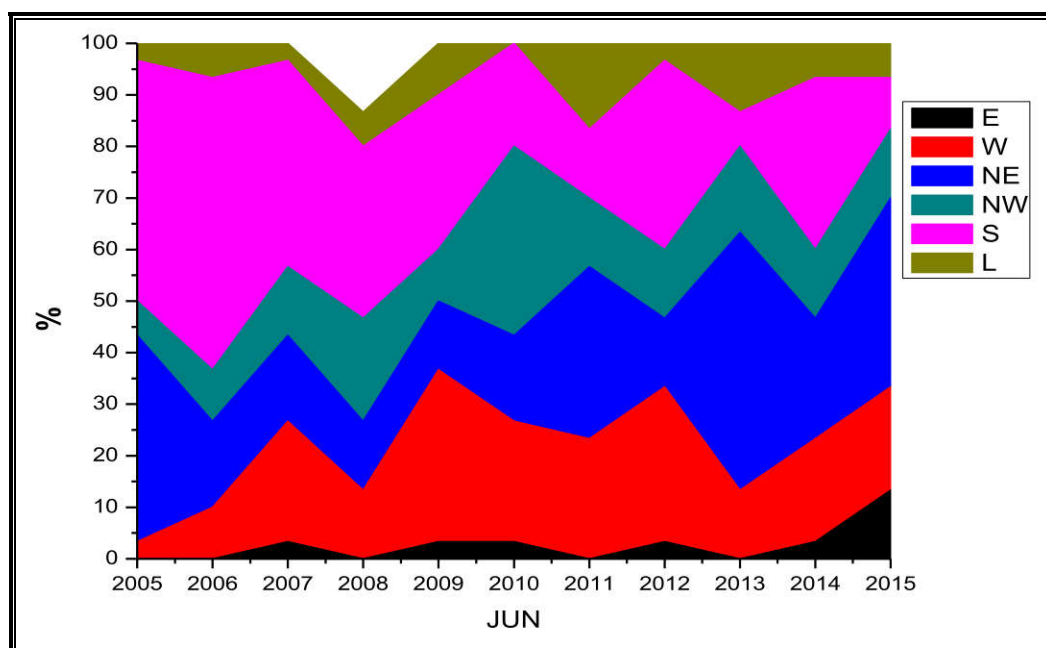


Fig. 135. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Juin de 2005 à 2015

Nous présentons à la Figure 136 la carte des vents de la zone d'étude durant le mois d'août de l'année 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 35,48% contre 32,26% pour le Nord-Est et 16,13% pour la source Locale en 2005 ;
- Nord-Ouest avec 29,03% contre 25,80% pour le Nord-Est et 19,35% pour l'Ouest en 2006 ;
- Sud avec 38,71% contre 19,35% pour l'Ouest et 16,66% pour 16,13% pour le Nord-Ouest en 2007 ;
- Sud avec 25,80% contre 22,58% pour la source Locale et 16,13% pour l'Ouest, le Nord-Est et le Nord-Ouest en 2008 ;
- Nord-Est et Sud avec 25,80% contre 19,35% pour l'Ouest en 2009 ;
- Locale et Nord-Est avec 32,26% contre 12,90% pour le Sud en 2010 ;
- Sud avec 32,26% suivie par le Nord-Est avec 22,58%, l'Ouest avec 19,35% et 16,13% pour la source Locale en 2011 ;
- Ouest avec 41,94% contre 35,48% pour le Sud en 2012 ;
- Nord-Est avec 51,61% contre 25,80% pour le Sud et 9,67% pour l'Est en 2013 ;
- Ouest avec 48,39% contre 22,58% pour le Sud et la source Locale en 2014 ;
- Sud avec 41,94% suivie par l'Ouest avec 19,35% et le Nord-Est avec 16,13% en 2015.

Les directions des vents prédominantes durant le mois d'août de 2005 à 2015 sont de : Sud (25,81%), Nord-Est (22,58%), Ouest (20,53%), Locale (14,96%) et Nord-Ouest (12,02%).

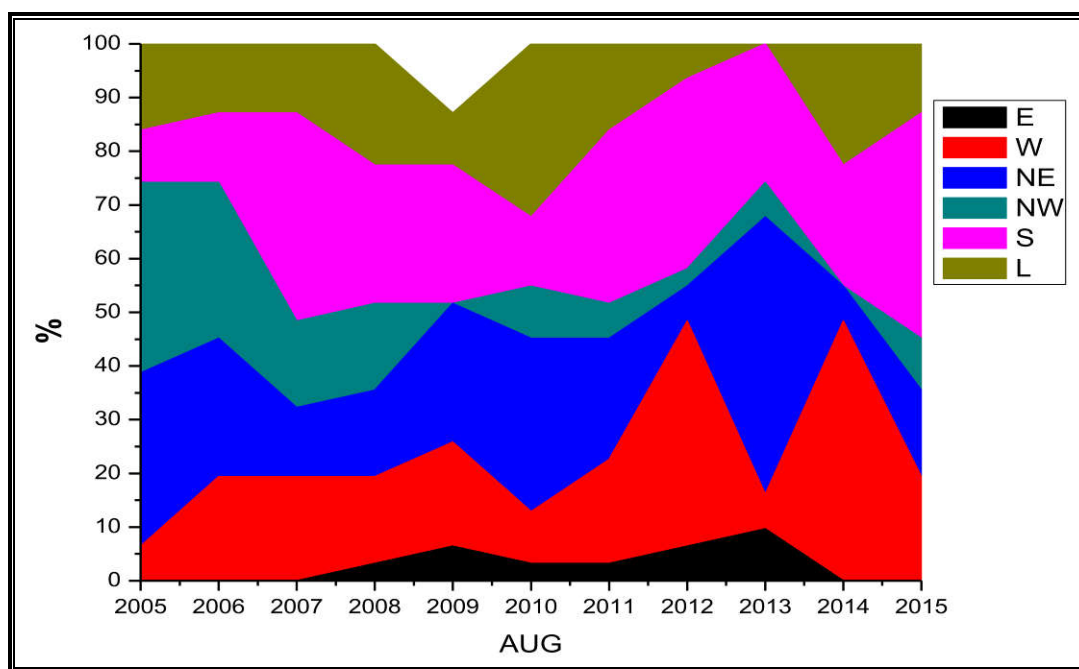


Fig. 136. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois d'Août de 2005 à 2015

Nous présentons à la Figure 137 la carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Septembre de l'année 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest et Sud avec 26,66% contre 20,00% pour l'Ouest et 16,66% pour le Nord-Est en 2005 ;
- Ouest avec 26,66% contre 23,33% pour le Nord-Ouest et 20,00% pour le Sud en 2006 ;
- Sud avec 36,66% contre 26,66% pour le Nord-Est et 20,00% pour le Nord-Ouest en 2007 ;
- Sud avec 30,00% contre 26,66% pour l'Ouest, 20,00% pour le Nord-Ouest et 16,66% pour le Nord-Est en 2008 ;
- Nord-Est avec 30,00% contre 23,33% pour l'Ouest et le Sud en 2009 ;
- Nord-Est avec 30,00% contre 26,66% pour le Sud, 20,00% pour le Nord-Ouest et 16,66% pour l'Ouest en 2010 ;
- Nord-Est avec 30,00% suivie par l'Ouest et la source Locale avec 20,00% et le Nord-Ouest avec 16,66% en 2011 ;
- Sud avec 43,33% contre 13,33% pour l'Ouest et le Nord-Ouest en 2012 ;
- Sud avec avec 40,00% contre 23,33% pour l'Ouest et 20,00% pour le Nord-Est en 2013 ;
- Ouest avec 43,33% contre 40,00% pour le Sud en 2014 ;
- Nord-Est avec 30,00% suivie par l'Ouest avec 26,66% et le Nord-Ouest avec 20,00% en 2015.

Les directions des vents prédominantes durant le mois de Septembre de 2005 à 2015 sont de : Sud (28,48%), Ouest (22,73%), Nord-Est (21,21%) et Nord-Ouest (16,67%).

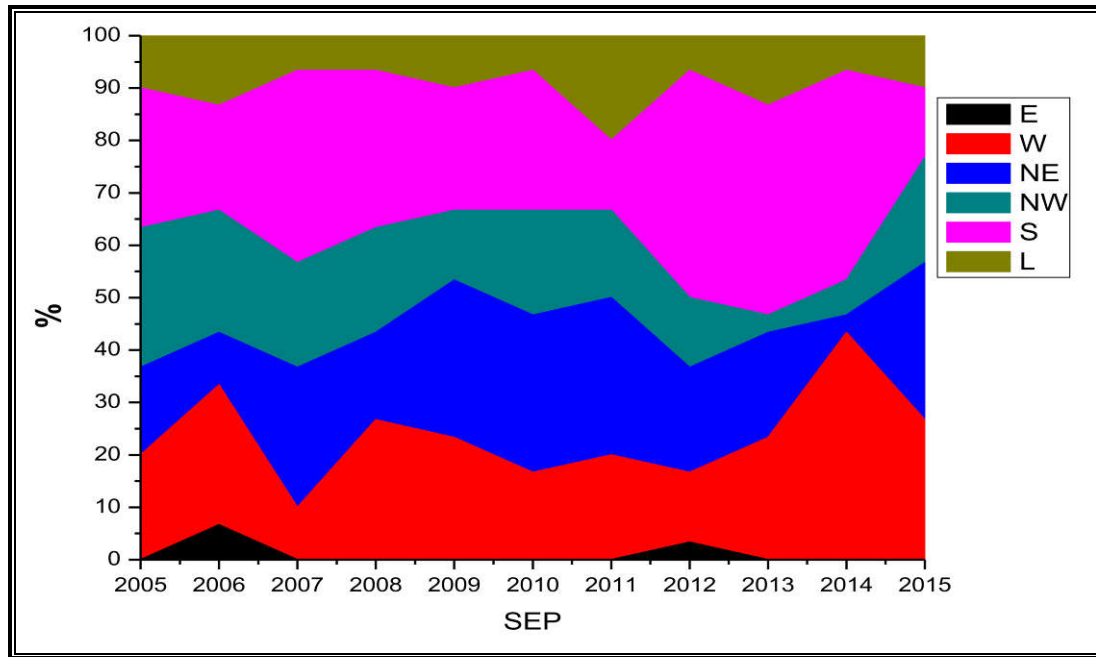


Fig. 137. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Septembre de 2005 à 2015

Nous présentons à la Figure 138 la carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Novembre de l'année 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Sud avec 40,00% contre 20,00% pour l'Ouest et 16,66% pour le Nord-Est et le Nord-Ouest en 2005 ;
- Sud avec 50,00% contre 16,66% pour le Nord-Est, le Nord-Ouest et l'Ouest en 2006 ;
- Nord-Est avec 43,33% contre 30,00% pour le Nord-Ouest et 10,00% pour l'Ouest et le Sud en 2007 ;
- Sud avec 43,33% contre 36,66% pour le Nord-Ouest et 20,00% pour l'Ouest en 2008 ;
- Sud avec 36,66% contre 33,33% pour le Nord-Ouest et 23,33% pour l'Ouest en 2009 ;
- Nord-Ouest avec 43,33% contre 33,33% pour l'Ouest et 13,33% pour le Sud en 2010 ;
- Sud avec 33,33% suivie par l'Ouest avec 23,33% et 13,33% pour le Nord-Est, le Nord-Ouest et la source Locale en 2011 ;
- Sud avec 63,33% contre 13,33% pour l'Ouest et le Nord-Ouest et 10,00% pour le Nord-Est en 2012 ;
- Nord-Ouest avec avec 66,66% contre 13,33% pour le Sud et 10,00% pour l'Ouest et le Nord-Est en 2013 ;
- Sud avec 60,00% contre 30,00% pour l'Ouest en 2014 ;
- Nord-Ouest avec 33,33% suivie par le Nord-Est avec 23,33% et la source Locale avec 20,00% en 2015.

Les directions des vents prédominantes durant le mois de Novembre de 2005 à 2015 sont de : Sud (34,24%), Nord-Ouest (28,18%), Ouest (19,09%) et Nord-Est (13,33%).

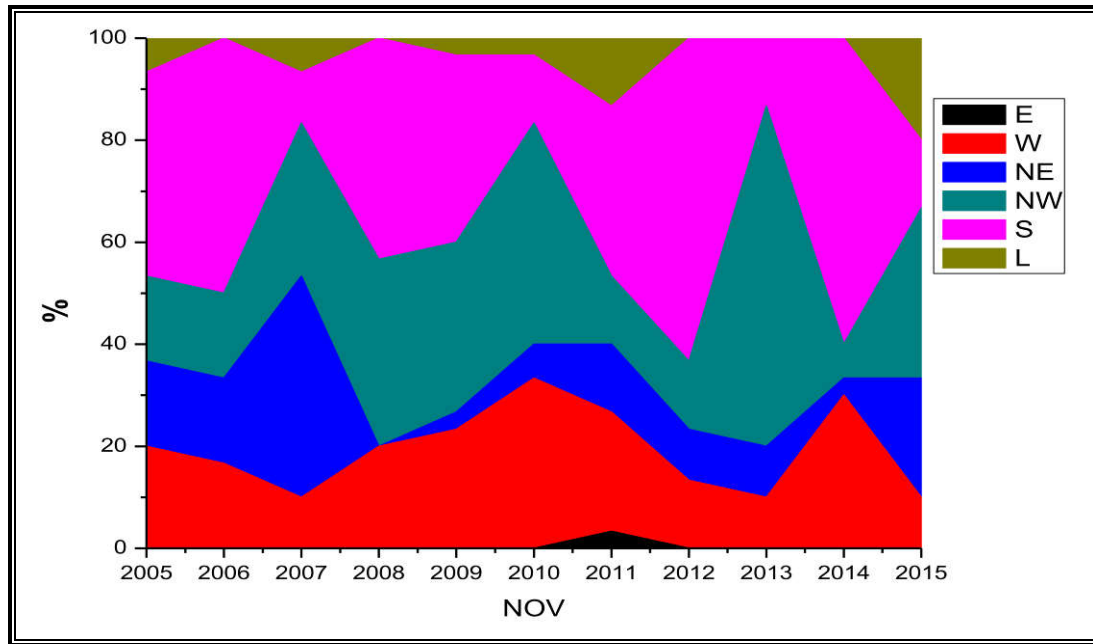


Fig. 138. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Novembre de 2005 à 2015

Nous présentons à la Figure 139 la carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Décembre de l'année 2005 à 2015. Nous remarquons que les sources principales des vents étaient comme suit :

- Nord-Ouest avec 32,26% contre 29,03% pour l'Ouest et 25,81% pour le Nord-Est en 2005 ;
- Sud avec 29,03% contre 22,58% pour le Nord-Ouest, Nord-Est et Ouest en 2006 ;
- Nord-Ouest avec 32,26% contre 25,81% pour le Nord-Est, 22,58% pour le Sud et 16,13% pour l'Ouest en 2007 ;
- Nord-Ouest avec 38,71% contre 32,26% pour l'Ouest et 12,90% pour le Sud en 2008 ;
- Ouest avec 45,16% contre 29,03% pour le Nord-Ouest et 19,35% pour le Sud en 2009 ;
- Nord-Ouest et Sud avec 32,26% contre 22,58% pour le Sud en 2010 ;
- Nord-Ouest avec 41,94% suivie par l'Ouest avec 25,81% et le Sud avec 19,35% en 2011 ;
- Nord-Ouest avec 51,61% contre 35,48% pour l'Ouest en 2012 ;
- Nord-Ouest avec 32,26% contre 29,03% pour le Sud et 16,13% pour l'Ouest en 2013 ;
- Nord-Ouest avec 48,39% contre 29,03% pour l'Ouest et 16,13% pour le Sud en 2014 ;
- Sud avec 35,48% suivie par la source Locale avec 22,58% et le Nord-Ouest avec 16,13% en 2015.

Les directions des vents prédominantes durant le mois de Décembre de 2005 à 2015 sont de : Nord-Ouest (34,31%), Ouest (26,10%) et Sud (21,70%).

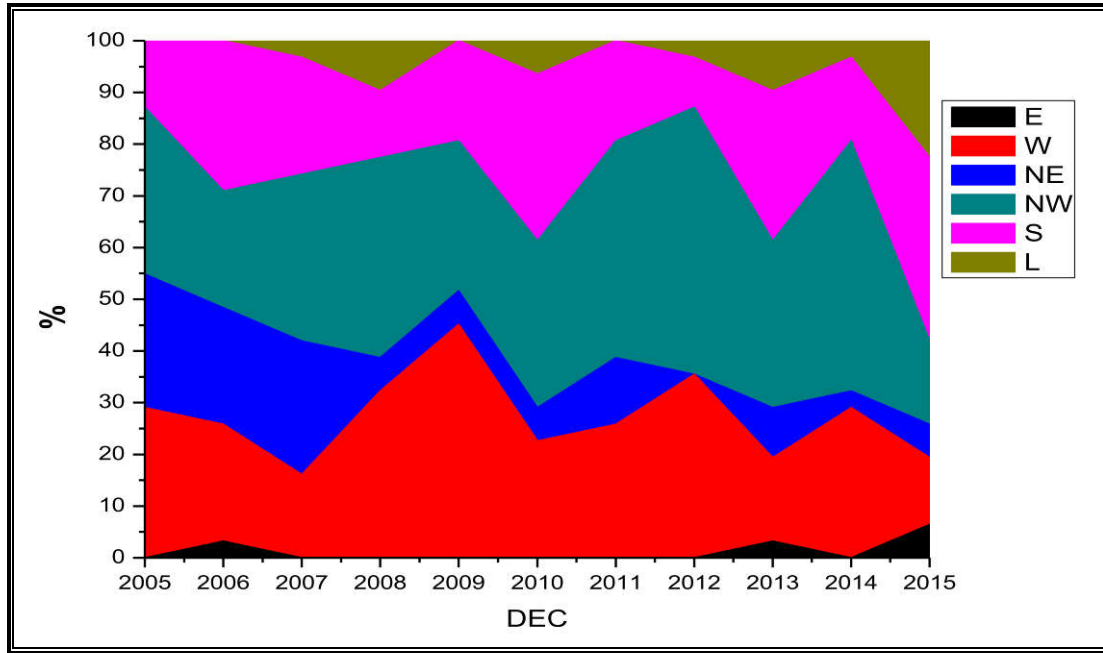


Fig. 139. Carte des vents de la zone d'étude durant le mois de Décembre de 2005 à 2015

Annexe 3 : Evolution mensuelle des teneurs en BC à Bouzaréah.

❖ **Evolution en Juin 2014 :**

La journée du 27 Juin 2014 était la plus polluée, avec une moyenne de $1,441 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC (avec une moyenne de $1,588 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 11AM et 1PM) et $1,433 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC_{ff} , ce qui représente 94,44% du BC total (Figure 140). Nous avons remarqué que durant la journée du 8 Juin 2014 entre 8PM et minuit, les moyennes de BC et BC_{ff} étaient de $2,397 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (pour le cas du BC_{wb} la concentration était de $0,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$), malgré la diminution du trafic routier durant la nuit, ce qui peut s'expliquer par une pollution de BC venant du Sahara (activités pétrolières) comme le confirme la figure 141 des trajectoires des masses d'air faite par le logiciel Hysplit. La journée la moins polluée est celle du 16 Juin 2014, avec une moyenne de BC de $0,334$ et $0,329 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC_{ff} , contre un taux de BC_{wb} de seulement 1,5% du BC total.

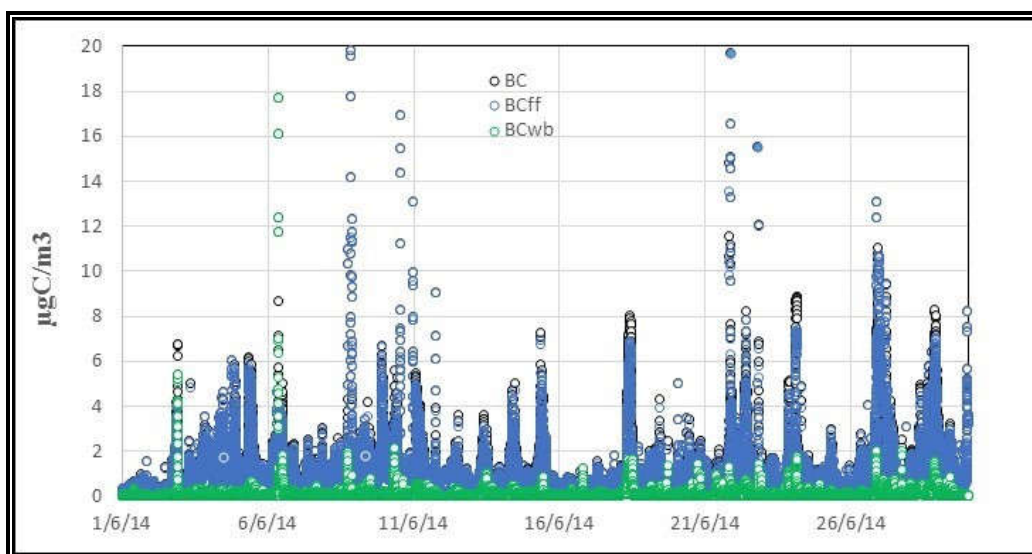


Fig. 140. Variation des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Juin 2014

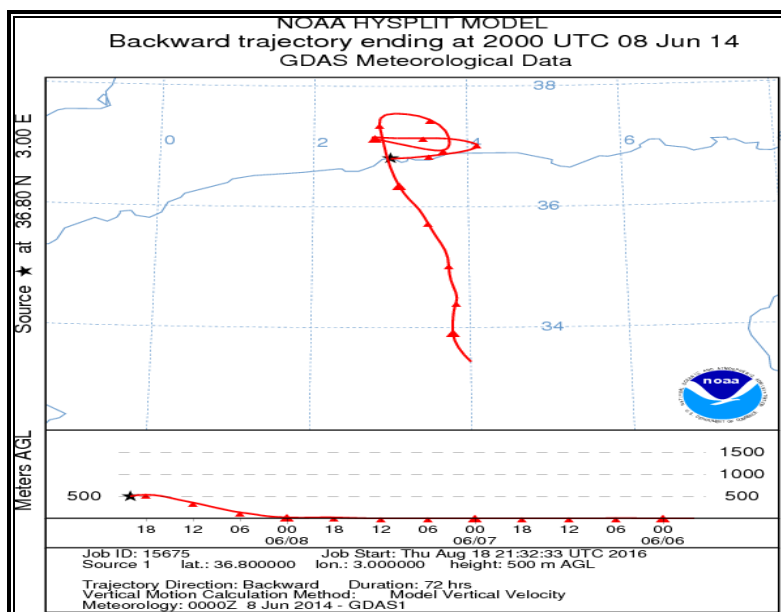


Fig. 141. Rétrotrajectoires des masses d'air du 8 Juin 2014

❖ Evolution en Septembre 2014 :

Les variations des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Septembre 2014 sont présentées à la Figure 142. Les niveaux de BC et BC_{ff} sont, généralement, inférieurs à 7,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, excepté quelques pics excédant 15,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durant le 7 Septembre et 50,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ le 12 Septembre. Nous remarquons que la moyenne mensuelle des BC et BC_{ff} en Septembre est, légèrement, supérieure à celle du mois d'Août, avec 1,530 et 1,519 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement. Ce résultat correspond à la fin des vacances, et l'augmentation du trafic routier durant le mois de Septembre. Cette différence aurait été plus importante sans les feux de forêts du mois d'Août.

La journée du 12 Septembre était la plus polluée avec une moyenne journalière des BC et BC_{ff} de 1,710 et 1,709 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement, et le BC_{ff} a représenté 99.94% du BC total. Ces niveaux élevés de pollution sont dus à des masses d'air venant de l'Ouest d'Alger (Figure 143), passant par le port d'Arzew (Oran), qui est le plus grand port pétrolier du nord du pays (activités de raffinage pétrolier).

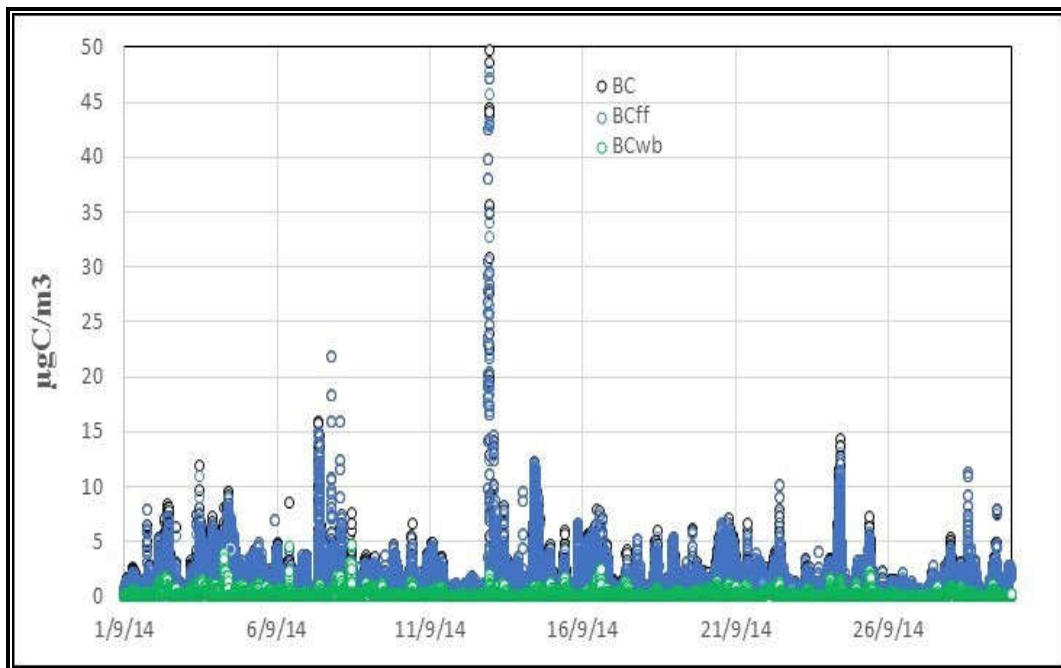


Fig. 142. Variation des concentrations du BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Septembre 2014

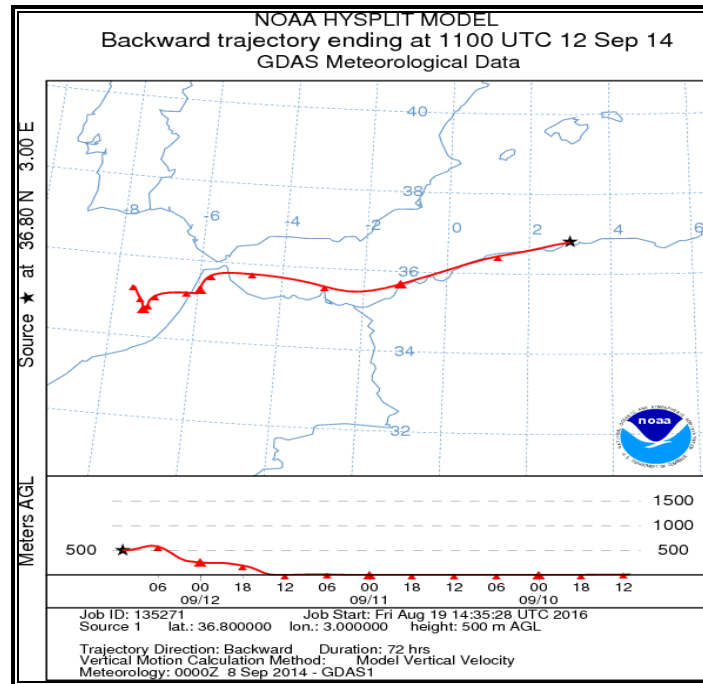


Fig. 143. Rétro trajectoires des masses d'air du 12 Septembre 2014

❖ Evolution en Octobre 2014 :

La Figure 144 montre les variations continues du BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois d'Octobre 2014. Les niveaux des BC et BC_{ff} étaient en grande partie inférieurs à 6,000 µg/m³, avec quelques pics excédant 16,000 µg/m³ et un maximum de 19,000 µg/m³. Des niveaux élevés des BC et BC_{ff} ont été enregistrés le 09 Octobre 2014, avec des moyennes de 3,017 et 3,016 µg/m³, respectivement, dues aux activités pétrolières au sud Algérien, comme le montre la Figure 145.

Pour le cas des niveaux de BC_{wb}, nous remarquons qu'ils étaient, généralement, inférieurs à 2,000 µg/m³, excepté quelques pics dépassant 6,000 µg/m³, observés les 7 et 10 octobre.

Nous avons observé des moyennes de BC_{wb} élevées durant la journée du 10 Octobre entre 11:10AM et 11:40AM, atteignant 1,880 µg/m³, qui sont dues aux feux de forêt enregistrés le 9 Octobre au Sud-Ouest d'Alger (Tissemsilt) à 10:50AM (Extraits déduits de la base de données de la Direction Générale des Forêts des feux de forêts de 2014), confirmés par Hysplit (Figure 146).

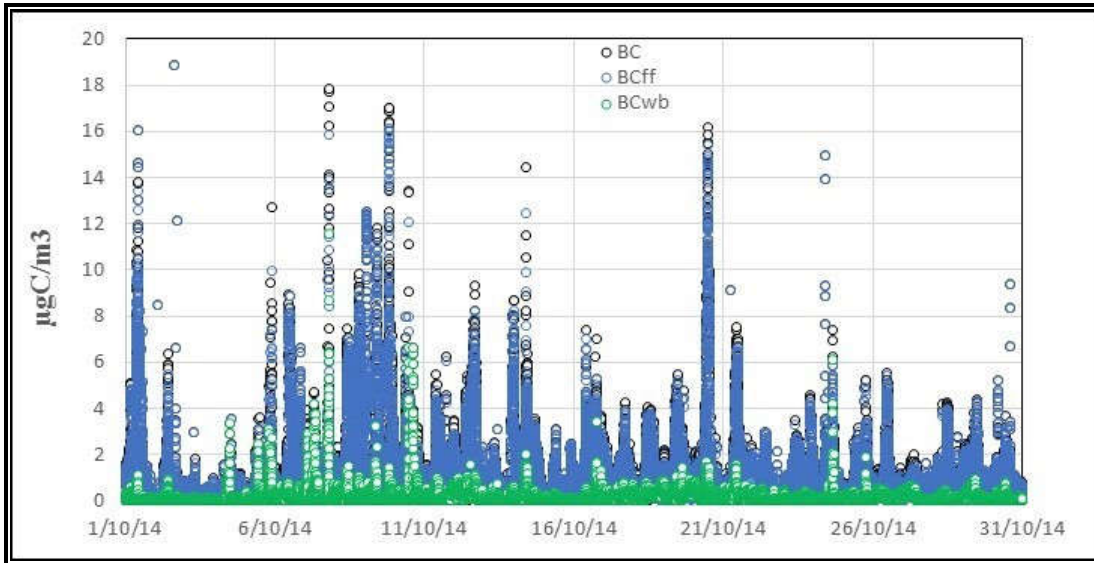


Fig. 144. Variation des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois d'Octobre 2014

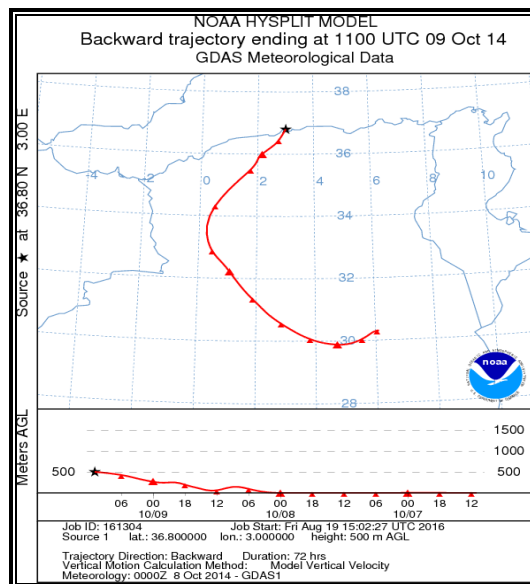


Fig. 145. Rétro trajectoires des masses d'air du 9 Octobre 2014

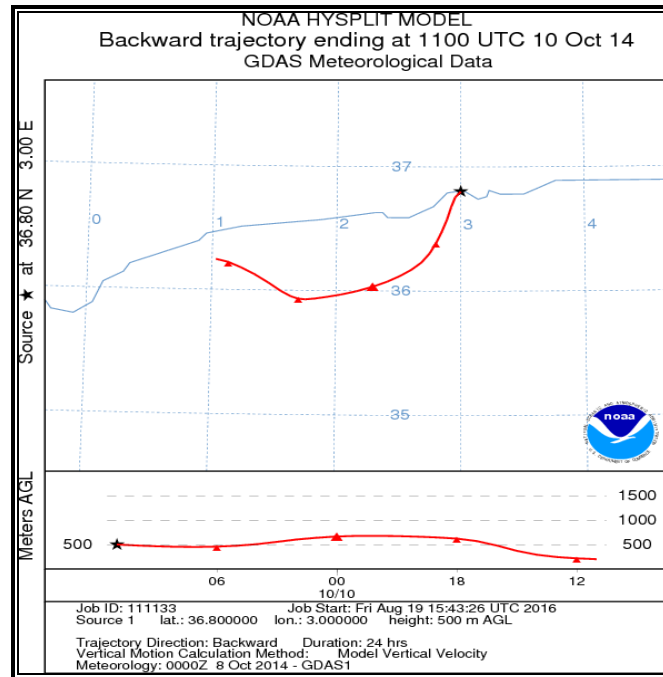


Fig. 146. Rétro trajectoires des masses d'air du 10 Octobre 2014

❖ Evolution en Janvier 2015 :

La figure 147 présente l'évolution des niveaux des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Janvier 2015. Les niveaux des BC et BC_{ff} sont caractérisés par des valeurs élevées entre le 4 et le 10 Janvier, avec des pics atteignant 16,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et une moyenne hebdomadaire de 2,091 et 1.973 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC et le BC_{ff}, respectivement, contre 0,118 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC_{wb}. Des moyennes des BC et BC_{ff} atteignant 2,541 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ont été enregistrées entre 2AM et 4AM, contre 0,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le BC_{wb}, ceci est dû aux masses d'air venues de l'Ouest de l'Espagne (Figure 148).

La journée qui a enregistré le niveau de pollution le plus élevé de BC_{wb} est celle du 6 Janvier, avec une moyenne journalière de 0,225 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et une moyenne de 0,400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre minuit et 2AM, ce qui est dû à la combustion anarchique des ordures ménagers dans les décharges sauvages.

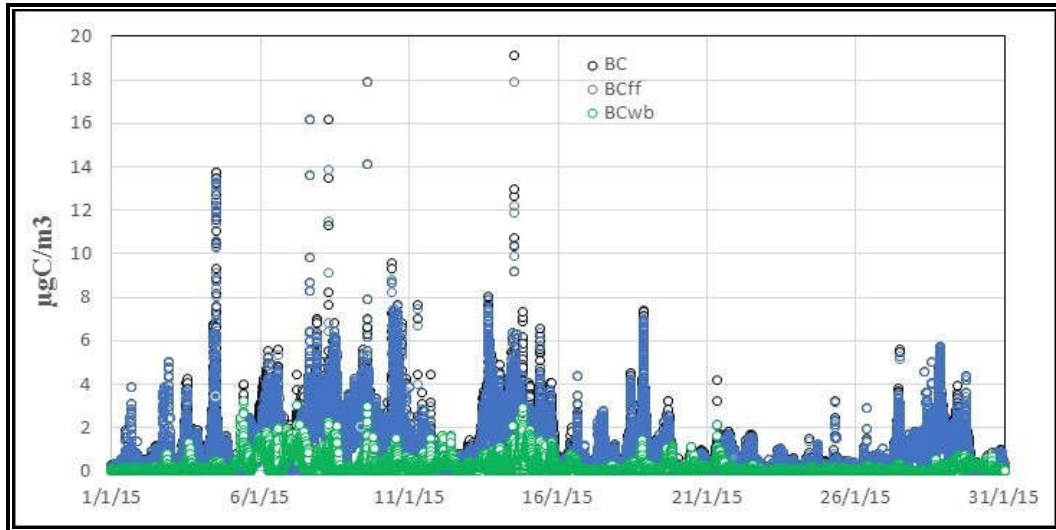


Fig. 147. Variation des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Janvier 2015

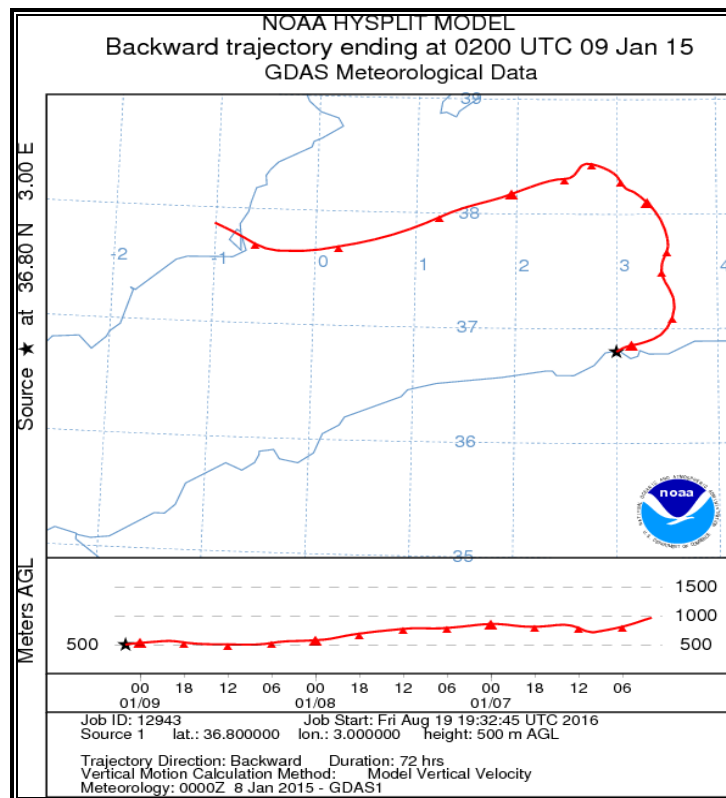


Fig. 148. Rétrotrajectoires des masses d'air du 9 Janvier 2015

❖ Evolution en Février 2015 :

Nous présentons à la figure 149 les variations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Février 2015. Nous remarquons de faibles niveaux des BC et BC_{ff}, généralement inférieurs à 1,000 µg/m³, excepté quelques pics atteignant 15,000 µg/m³, et dont le maximum est de 40,000 µg/m³.

La journée la plus polluée était celle du 13 Février, avec des moyennes journalières de BC et BC_{ff} de 3,635 et 3,560 µg/m³ respectivement, et des moyennes de 4,883 µg/m³ pour le BC et 4,882 µg/m³ entre 1AM et 6AM. Ces moyennes élevées sont expliquées à travers les masses d'air venant du Sud Algérien (Figure 150).

En ce qui concerne le BC_{wb}, les concentrations inférieures à 2,000 µg/m³, sont dues à l'absence de feux de forêts ou à l'utilisation du bois de chauffage en Algérie durant ce mois.

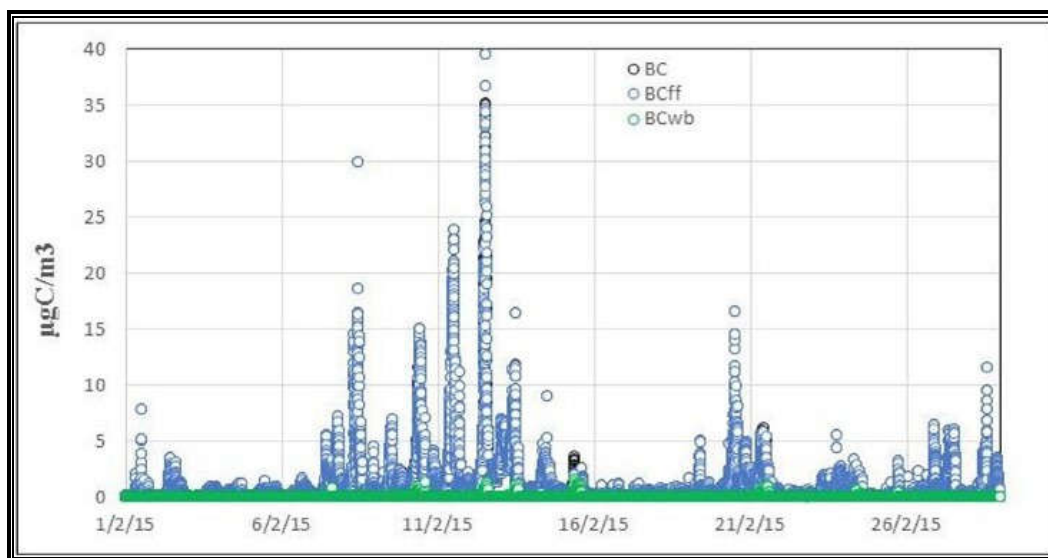


Fig. 149. Variation des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Février 2015

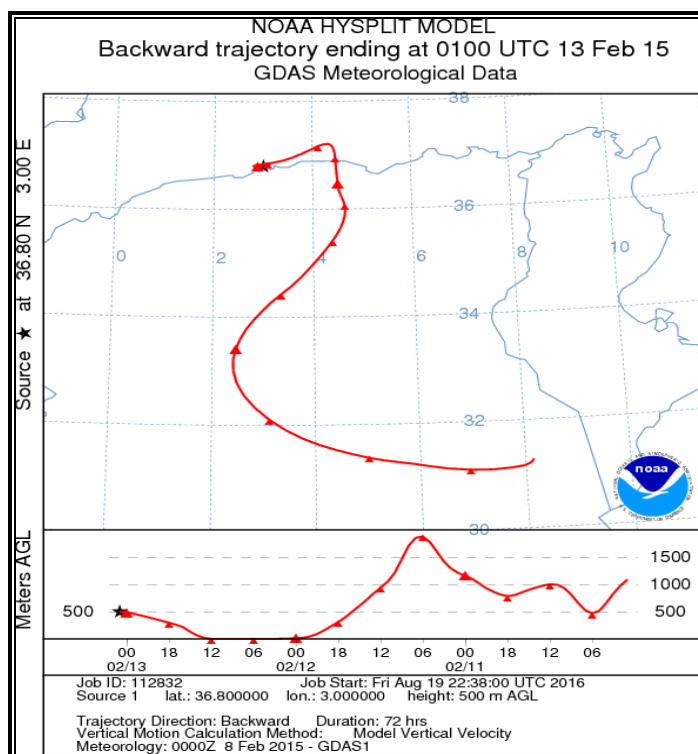


Fig. 150. Rétro trajectoires des masses d'air du 13 Février 2015

❖ Evolution en Mai 2015 :

La Figure 151, présente les variations des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Mai 2015. Nous remarquons que les niveaux des BC et BC_{ff} sont, généralement, inférieurs à 5,000 µg/m³, avec quelques pics excédant les 10,000 µg/m³ et un maximum atteignant 30,000 µg/m³. Pour le cas du BC_{wb}, les concentrations étaient toutes inférieures à 2,000 µg/m³, avec un maximum de 1,629 µg/m³. La journée du 13 Mai était la plus polluée avec une moyenne journalière de 2,921 µg/m³ pour le BC et le BC_{ff}, et une moyenne des BC et BC_{ff} de 7,927 µg/m³, entre 1PM et 4PM, due aux masses d'air venant du Sud de l'Europe (Ile de Sardaigne), et passant par la Tunisie et l'Est Algérien (Figure 152).

Les niveaux de BC_{wb} étaient très bas, avec une moyenne mensuelle de 0,001 µg/m³, ce qui s'explique par la rareté des feux de forêts durant ce mois.

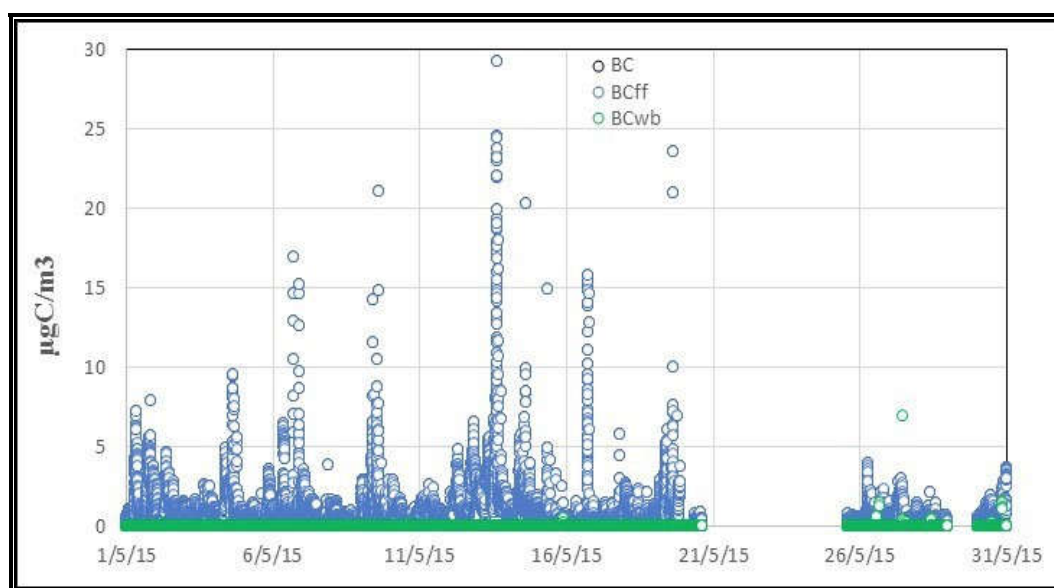


Fig. 151. Variation des concentrations des BC, BC_{ff} et BC_{wb} durant le mois de Mai 2015

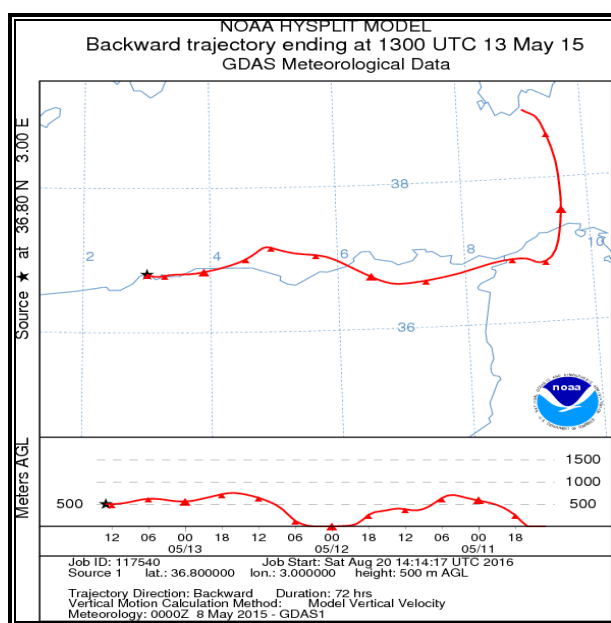


Fig. 152. Rétro trajectoires des masses d'air du 13 Mai 2015