

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie de l'Environnement

Centre de Développement des Energies Renouvelables

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur
d'état en Génie de l'Environnement

**SUIVI CONTINU DES NIVEAUX DE
LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE
PAR LES PARTICULES (PM-i) DANS
UN MILIEU URBAIN**

Fatima BOUAOUD
Mounia YAHATENE

Sous la direction de : Promoteur M. H.MERABET Chercheur (CDER)
Co-promoteur M.R.KERBACHI Professeur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le 03/07/2019

Composition du Jury :

Président	M .N. MAMERI,	Professeur	ENP
Promoteur	M .H. MERABET,	Chercheur	CDER
Co-promoteur	M .R. KERBACHI,	Professeur	ENP
Examineur	M .Y. KERCHICH,	Docteur	U.Médéa

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie de l'Environnement

Centre de Développement des Energies Renouvelables

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur
d'état en Génie de l'Environnement

**SUIVI CONTINU DES NIVEAUX DE
LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE
PAR LES PARTICULES (PM-i) DANS
UN MILIEU URBAIN**

Fatima BOUAOUD
Mounia YAHIA TENE

Sous la direction de : Promoteur M. H. MERABET Chercheur (CDER)
Co-promoteur M. R. KERBACHI Professeur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le 03/07/2019

Composition du Jury :

Président	M .N. MAMERI,	Professeur	ENP
Promoteur	M .H. MERABET,	Chercheur	CDER
Co-promoteur	M .R. KERBACHI,	Professeur	ENP
Examineur	M .Y. KERCHICH,	Docteur	U.Médéa

DEDICACE

A MA TRES CHERE MERE

Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie. Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. J'espère ne jamais te décevoir, ni trahir ta confiance et tes sacrifices. Puisse Dieu tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et Bonheur.

A MON TRES CHER PERE

De tous les pères, tu es le meilleur. Tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes qualités humaines, ta persévérance et perfectionnisme. En témoignage de brut d'années de sacrifices, de sollicitudes, d'encouragement et de prières. Pourriez-vous trouver dans ce travail le fruit de toutes vos peines et tous de vos efforts. En ce jour, j'espère réaliser l'un de tes rêves. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour. Puisse Dieu vous préserver et vous procurer santé et bonheur.

A mes chères sœurs Toues et son époux Sadek et Meriem pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral, et surtout leur amour.

A mes chers frères, Tahar et Hichem pour leur appui et leur encouragement.

A mes chers oncles, tantes, leurs époux et épouses.

A toutes les familles YAHIATENE et BELHOCINE.

A mes chers cousins et cousines.

A tous mes amis, amies et camarades en témoignages de mes plus profondes amitiés et ma sincère sympathie.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

Mounia

DEDICACE

MA TRES CHERE MERE,

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences. Quoi que je fasse ou que je dise, je ne serai point te remercier comme il se doit. Ta bienveillance me guide et ta présence à mes coté a toujours été source de force pour affronter les différents obstacles.

A MON TRES CHER PERE,

Pour le gout à l'effort qu'il a suscité en moi de part sa rigueur et son perfectionnisme. Tu as toujours été à mes cotés pour me soutenir et m'accompagner. Que ce travail traduit ma gratitude.

A toi grand père, ceci est ma profonde reconnaissance pour ton eternel encouragement.

A toi grande mère, décédée trop tôt, Merci pour ton grand cœur et toutes tes qualités qui seraient trop longues à énumérer. Puisse dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde.

A vous mes sœurs (Amina, Imene) et mon frère (Houcine) qui m'avait toujours soutenu durant mes études. Que dieu vous protègent et vous ouvre les portes du succès et de bonheur.

A mes tantes (Ghania, Samia), puisse dieu vous donner santé et bonheur.

Fatima.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord louange à dieu tout puissant qui nous a donné toutes les capacités physiques et morales pour la réalisation du présent travail.

Nous le remercions également, car il nous a permis de rencontrer tout au long de notre parcours, un grand nombre de personnes douées d'intelligence et de gentillesse

Ce travail a été effectué au Centre De Recherche et du Développement des Energies Renouvelables (CDER) sous la direction du chercheur **H.MERBAET**, à qui nous éprouvons toute notre gratitude de nous avoir permis de réaliser ce travail, de nous avoir encadrées durant ces cinq mois et nous avoir toujours soutenues, pour sa gentillesse, sa disponibilité, sa patience et pour ses directives judicieuses tout au long de ce travail.

Nous tenons vivement à remercier notre Co-promoteur le professeur **R.KERBACHI**, pour ses conseils, son aide et orientation tout au long de ce travail.

Notre reconnaissance va à l'égard du professeur **N.MAMERI**, pour avoir bien voulu présider le jury de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à **Dr.Y.KERCHICHE** pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

Nous remercions aussi respectueusement tous les enseignants du département Génie de l'environnement qui ont participé à notre formation.

Nous tenons à remercier particulièrement Bureau d'Etudes des Transports (BETUR) et l'Office National de Météorologique, pour leur contribution à la bonne réalisation de ce travail en nous fournissant toutes les données nécessaires.

Enfin, nos derniers remerciements iront tout simplement à nos amis et à nos familles, qui même si c'est parfois de loin, nous ont toujours soutenues et nous ont permis d'arriver là où nous sommes aujourd'hui!

A Tous

Un Grand Merci.

ملخص

تناول هذا العمل توصيف التلوث الجوي بواسطة الجزيئات الدقيقة PM-10 وأجزائها PM-4 و PM-2.5 و PM-1 في موقع حضري يقع في وسط الجزائر العاصمة (ساحة 1 ماي). تم إجراء دراستنا بواسطة محلل Fidas200 على مدار فترة 4 أشهر (فبراير، مارس، أبريل وماي)، والذي اقتناه مركز تطوير الطاقة المتجددة. في هذا الموقع، يبلغ متوسط محتوى PM-10 اليومي 08.28 ميكروغرام / م³. ومع ذلك، فإن التلوث الناجم عن الجزيئات المستنشقة كان متوسطاً. بالنسبة إلى جزيئات PM-2.5 و PM-1، بلغ متوسط القيم 63.10 ميكروغرام / م³ و 94.7³ ميكروغرام / م³.

الكلمات المفتاحية: تلوث الجسيمات؛ موقع حضري؛ PM-10؛ PM-1؛ PM-2,5؛ FIDAS 200؛ HYSPLIT.

Abstract

This work concerns the characterization of the air pollution by fine particles PM-10 and its fractions PM-1, PM2,5, PM4 and PMtot in an urban site which is localized in Algiers (place 1 er May). Our study was carried out with the Fidas 200 analyzer that was started over a period of 4 months, acquired by the Centre de Développement des Energies Renouvelables. In this site, the content day average of PM-10 rises with 28,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. However, the level of this results pollution by inhalable particles was average. However, it results from a rather appreciable pollution by the inhalable particles. For the PM-2,5, the average content is of 10,63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and for the PM-1 of 7.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. To identify external sources and their geographical position, air mass back-trajectories were performed with HYSPLIT model.

Keywords : air pollution, urban site, PM-10, PM-2,5 et PM-1, FIDAS 200, Hysplit.

Résumé

Ce travail porte sur la caractérisation de la pollution atmosphérique par les particules fines PM-10 et ses fractions PM-4, PM-2,5 et PM-1 dans un site urbain localisé à Alger centre. A cet effet, nous avons utilisé sur une durée de 4 mois l'analyseur Fidas 200 appartenant au Centre de Développement des Energies Renouvelables. Les résultats obtenus montrent qu'en ce site, la teneur journalière moyenne en PM-10 s'élève à 28,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Toutefois, Il en résulte une pollution moyenne par les particules inhalables. Pour les PM-2,5 et les PM-1, les teneurs moyennes s'élèvent respectivement à 10.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 7,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour identifier les sources externes et leurs origines géographiques, des rétro trajectoires de masses d'air ont été développées avec le modèle HYSPLIT.

Mots clés : Pollution particulaire ; site urbain ; PM-10 ; PM-2,5 et PM-1 ; FIDAS 200 ; Hysplit.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des Sigles

Liste des abréviations

Introduction	16
Partie théorique	20
Chapitre 1 Généralités sur la pollution atmosphérique	22
1.1. Généralités sur la pollution atmosphérique	22
1.1.1. Structure de l'atmosphère terrestre	22
1.1.2. Variation de la température et de la pression atmosphérique	22
1.1.3. Mixage et transport des espèces chimiques	23
1.2. La pollution atmosphérique	23
1.2.1. Définition	23
1.2.2. Les polluants atmosphériques	25
1.2.2.1. Les types de polluants	25
1.2.2.2. Les principaux polluants atmosphériques	25
a) Les gaz	25
b) Les particules	27
1.2.3. Source de la pollution atmosphérique	27
a) Sources des polluants gazeux	28
b) Source des aérosols	29
1.2.4. Météorologie et pollution	31
1.2.4.1. Influence du vent	31
1.2.4.2. Influence de la chaleur et de la lumière	31
1.2.4.3. Présence de pluies	31
1.2.4.4. Couche d'inversion	32
Chapitre 2 : Les particules atmosphériques	34
2.1. Définition	34
2.2. Forme des aérosols	36
2.3. Classification des particules	37
2.3.1. Classification des particules selon leurs tailles	37
2.3.2. Classification des particules selon leur composition	38
2.4. Composition chimique des aérosols	38
2.5. Durée de vie des aérosols	40
2.6. Evolution des particules dans l'atmosphère	41

2.6.1.	Evolution chimique.....	41
2.6.2.	Evolution physique.....	41
2.7.	Propriétés mécaniques des particules.....	42
2.7.1.	La vitesse de sédimentation.....	42
2.7.2.	La diffusion brownienne.....	43
2.7.3.	Propriétés optiques.....	43
Chapitre 3 : Effets des particules atmosphériques et réglementation sur la qualité de l'air.....		46
3.1.	Effets négatifs.....	46
3.1.1.	Effets des particules sur la santé humaine.....	46
3.1.1.1.	Le cheminement des particules dans l'appareil respiratoire.....	46
3.1.1.2.	Effets sur la grossesse.....	48
3.1.2.	Effet sur les animaux.....	49
3.1.3.	Effets sur les végétaux.....	49
3.1.4.	Effet sur les milieux océaniques.....	50
3.1.5.	Effets sur les matériaux.....	50
3.1.6.	Effets sur le climat.....	51
3.1.7.	Effet sur la visibilité.....	51
3.1.8.	Effet sur l'économie.....	52
3.2.	Effets positifs.....	53
3.2.1.	Fécondation des plantes ou Pollinisation par le vent (anémogamie).....	53
3.2.2.	Apparition de nouvelles plantes.....	53
3.2.3.	Formation de nuages (nucléation).....	53
3.3.	Réglementation sur la qualité de l'air.....	54
3.3.1.	En Algérie.....	54
3.3.2.	A l'échelle européenne.....	55
3.3.3.	Au niveau mondial.....	57
Matériel et Méthodes.....		59
1.	Le réseau de surveillance de la qualité de l'air.....	60
1.1.	Station atmosphérique « Nesma ».....	60
1.2.	Le site urbain d'Alger-centre.....	60
1.3.	Méthode de prélèvement et d'analyse des PM _i et description de l'analyseur.....	62
1.3.1.	Présentation de l'appareil.....	63
1.3.2.	Principe de fonctionnement.....	66
1.3.3.	Mécanisme de correction de zone de frontière.....	68
1.4.	Les étapes de détection des particules par le FIDAS 200.....	70
1.5.	Caractéristiques et avantages de Fidas® 200.....	71

2. Modélisation.....	72
2.1. Model HYSPLIT de la NOAA	72
2.2. Les étapes d'obtention des rétro trajectoires avec HYSPLIT	73
2.3. Model Modis de la NASA	75
2.4. Cartes d'aérosol.....	76
Résultats et Discussion	77
1. Etude de l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines.....	78
1.1. Teneurs atmosphériques en particules.....	78
1.2. 21 Avril 2019 le soir	83
1.3. 25 Avril 2019.....	85
2. Etudes de cas des PM-i.....	86
2.1. PM-10.....	86
2.2. PM-2,5.....	88
2.3. PM-1.....	89
3. Etude des profils moyens horaires en particules PM-i	90
3.1. Les heures de pointe : 07-09h	90
3.2. Heures de pointe : 12-13 h.....	91
3.3. Heures de pointe : 16-18h.....	92
3.4. Comparaison entre les heures de pointes.....	92
4. Etude des profils diurnes et nocturnes en particules PM-i	95
5. Etude des profils moyens horaires jours ouvrés et weekend en particules PM-i	99
6. Influence des conditions météorologiques	103
7. Corrélations entre les PM-1, PM-2,5 et PM-10	106
8. Influence du trafic sur les PM-10.....	108
8.1. Répartition modale du trafic journalier	108
9. Etude des concentrations en PM-10 sur des journées atypiques	111
9.1. Le 1er Mai : la Journée internationale des travailleurs.....	111
9.2. Du 06 au 20 Mai (jours de Ramadans).....	111
10. Occurrences des épisodes de pollution	115
Conclusion.....	118
Bibliographie	122
Annexes.....	128

Liste des tableaux

Tableau 1 Valeurs comparées en cm/ mn du déplacement dans l'air, dans les conditions normales de température et de pression, de particules sphériques dont la densité est égale à 1, en raison de l'agitation brownienne et la vitesse de sédimentation (d'après Fuch) [1].....	43
Tableau 2 Réglementation concernant les PM-10 en Europe.....	56
Tableau 3 Réglementation concernant les PM-2,5 en Europe.....	57
Tableau 4 Les directives de l'OMS.	58
Tableau 5 Réglementation de la qualité de l'air pour les PM-10 et les PM-2,5.....	58
Tableau 6 Teneurs moyennes et extrêmes des PM-i, écart type ainsi que le rapport PM-i/PM-10 à Alger-centre en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	78
Tableau 7 Concentrations caractérisant la variation des PM-10 durant la période d'étude	87
Tableau 8 Résultats caractérisant la variation des PM _{2,5} durant la période d'étude.....	88
Tableau 9 Rapport des concentrations en PM-i jour/ nuit.....	99
Tableau 10 Présente les rapports des PM-i jours ouvrables par rapport au weekend	101
Tableau 11 Coefficients de corrélations R^2 liant les différentes classes granulométriques à Alger-Centre	106
Tableau 12 Répartition modale du trafic journalier par sens, Axe boulevard Ali Mellah, sens 1 & 2 [Bureau Etude Trafic Urbain].....	108
Tableau 13 Répartition du trafic journalier par jour de semaine et tranche d'heure, Axe boulevard Ali Mellah, sens 1 & 2 [48].....	109
Tableau 14 Les concentrations des PM-i des jours normaux et durant le ramadan	114
Tableau 15 Sources des vents selon les directions durant la période d'étude.....	115
Tableau 16 Moyennes des PM-i à 0AM, 6AM, 0PM et 6PM de la période d'étude.	117

Liste des figures

Fig. 1 Structure de l'atmosphère et variation de la température et de la pression atmosphérique [7].	22
Fig. 2 Schéma résumant les différentes sources des polluants atmosphériques [15].	28
Fig. 3 Schéma résumant les différentes sources des aérosols atmosphériques biogéniques et anthropiques d'aérosols organiques à Beijing, en Chine 2018 [15].	31
Fig. 4 La forme des aérosols [21].	36
Fig. 5 Le classement des particules selon granulométrie [21].	38
Fig. 6 Composition chimique typique des particules urbaines continentales (PM-2,5) [16].	39
Fig. 7 Proportions relatives des fractions inorganiques et organiques, solubles et insolubles, en fonction de la taille de la particule [23].	40
Fig. 8 Effet des particules sur le système respiratoire.	47
Fig. 9 Localisation du site de prélèvement.	61
Fig. 10 Localisation de la station NESMA	62
Fig. 11 atmosphérique NESMA	63
Fig. 12 Les analyseurs de la station NESMA	63
Fig. 13 Les composants d'un système Fidas®	64
Fig. 14 Interface du menu principal	65
Fig. 15 Vue d'ensemble des données.	65
Fig. 16 d'installation du système de mesure Fidas® 200 S.	67
Fig. 17 Configuration schématique du système de mesure Fidas® 200 S.	67
Fig. 18 Illustration de l'ouverture en T.	68
Fig. 19 Mise en place du capteur du système de mesure Fidas®	69
Fig. 20 Schéma d'installation du système de mesure Fidas® 200 S.	70
Fig. 21 Courbe d'étalonnage pour la détection de lumière diffusée à 90 ° avec une source de lumière polychromatique.	71
Fig. 22 Exemple d'une carte des retro trajectoire obtenus avec le modèle HYSPLIT	75
Fig. 23 Exemple d'une carte sources d'aérosols obtenus avec le modèle MODIS.	76
Fig. 24 Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées en mois de février.	79
Fig. 25 Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées en mois de mars.	79
Fig. 26 Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées en mois d'Avril.	80
Fig. 27 Evolution des teneurs atmosphériques en PMi mesurées en mois de Mai	80
Fig. 28 Déplacement de particules d'Espagne et du Sud Algérien.	81
Fig. 29 Rétro trajectoires des masses d'air venant d'Espagne, du Portugal et du Maroc.	82
Fig. 30 L'évolution des concentrations horaire des PM-i pour le 21 avril 2019.	83
Fig. 31 Rétro trajectoires des masses d'air venant de l'Ouest du Pays et des activités navales.	83
Fig. 32 Concentrations de poussières de sable modélisées pour la date du 21/4/2019 à 18 h (BSC/Dream forecast : Barcelona Super Computing Centre : Dust Regional Atmospheric Model).	84
Fig. 33 Carte de l'épaisseur optique durant la semaine du 21 Avril 2019 élaborée par Modis (NASA).	84
Fig. 34 Evolution des concentrations en PM-i durant le 25 Avril 2019.	85
Fig. 35 PM-i modélisées en date du 25/04/2019 à 18h00 (NAAPS : Navy Aerosol Analysis and Prediction system).	86
Fig. 36 Etude de cas des PM-10 dans le site urbain de Mustapha Bacha.	88
Fig. 37 Etude de cas des PM-2,5 dans le site urbain d'Alger centre.	89
Fig. 38 Etude de cas des PM-1 dans le site urbain de Mustapha Bacha.	90
Fig. 39 Concentrations horaires des PM-i et nombre de particules durant les heures de pointe 07-09 h	91

Fig. 40 Concentrations des PM-i et du nombre de particules durant l'heure de pointe (12-13h).....	91
Fig. 41 Concentrations des PM-i et du nombre de particules durant les heures de pointe (16-18h).....	92
Fig. 42 Boite à moustache des concentrations PM-10 en heures de pointes.....	93
Fig. 43 Boite à moustache des concentrations PM-2,5 en heures de pointes.....	93
Fig. 44 Boite à moustache des concentrations PM-1 en heures de pointes.....	94
Fig. 45 Concentrations des PM-i et du nombre de particules durant le jour.....	96
Fig. 46 Concentrations des PM-i du nombre de particules durant la nuit.....	96
Fig. 47 Profil de variation des PM-10 pendant la journée.....	97
Fig. 48 Boite à moustache des concentrations PM-10.....	97
Fig. 49 Boite à moustache des concentrations PM-2,5.....	98
Fig. 50 Boite à moustache des concentrations PM-2,5.....	98
Fig. 51 Concentrations journalières des PM-i nombre de particules durant les jours de semaine.....	100
Fig. 52 Concentrations journalières des PM-i et nombre de particules dans l'air durant les Vendredis.....	100
Fig. 53 Concentrations journalières des PM10 dans l'air en pendant la durée de l'étude.....	101
Fig. 54 Concentrations moyennes des PM-10 selon les jours de la semaine.....	102
Fig. 55 Concentrations moyennes des PM-2.5 selon les jours de la semaine.....	102
Fig. 56 Boite à moustache des concentrations PM-10.....	103
Fig. 57 Boite à moustache des concentrations PM-2,5.....	103
Fig. 58 Evolution des concentrations en PM-10 en fonction de la température et la vitesse du vent.....	104
Fig. 59 Variation des PM-10 et des précipitations mesurées à Alger-port.....	105
Fig. 60 Évolution des teneurs en PM-1, PM-2,5, PM-4 et PM-10 mesurées à Alger.....	106
Fig. 61 Corrélation entre PM-i.....	107
Fig. 62 Localisation de l'axe boulevard Ali Mellah.....	108
Fig. 63 Variation des PM-10 et nombre de véhicules et poids lourd durant la journée.....	110
Fig. 64 Variation des PM-1 et nombre de véhicules et poids lourd durant la journée.....	110
Fig. 65 Evolution des niveaux de PM-i durant le jour du 1er Mai 2019.....	111
Fig. 66 Evolution des niveaux de PM-i durant le jour du 1er Mai 2019.....	112
Fig. 67 Variation des moyennes de concentrations des PM-i durant les heures des journées ouvrables pour le 6/5/2019.....	112
Fig. 68 Variation des moyennes des concentrations en PM-i durant les heures des journées le weekend 17/5/2019.....	113
Fig. 69 Comparaison des évolutions des PM-10 avec la période du ramadan.....	113
Fig. 70 Comparaison des évolutions des PM-2,5 avec la période du ramadan.....	114
Fig. 71 Comparaison des évolutions des PM-1 avec la période du ramadan.....	114
Fig. 72 Carte des sources des vents de la région d'Alger.....	116

Liste des Sigles

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer.

COV : Composés Organiques Volatils.

DP : Diamètre des particules.

ENP : Ecole Nationale Polytechnique.

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

IER : La fonction exposition-réponse.

ISO : International Organization for Standardization.

MBL : milieu marin couche limite.

MENA : Middle East and North Africa.

MODIS : Moderate resolution Imaging Spectroradiometer.

MPOC: Maladie pulmonaire obstructive chronique

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration.

OC : Carbone organique.

OM : Matière organique.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

PIB : Produit intérieur brut.

PM : Particulate Matter.

RR : risques relatifs.

PTS : Poussières Totales en Suspension.

PS : Particules en Suspension.

TSP : Particules Totales en Suspension.

USA : United States of America.

WHO : World Health Organization.

Liste des abréviations

$\mu\text{g}/\text{m}^3$: Microgramme (10⁻⁶ g) par mètre cube. Unité de concentration la plus couramment utilisée pour quantifier la masse d'un polluant par mètre cube d'air.

BTX : Benzène - Toluène – Xylène.

C₂H₂O₄ : Oxalate.

Cl⁻ : Anion chlorure.

DMS : Diméthylesulfure.

EC : Carbone élémentaire.

Fe : Fer.

HNO₃ : Acide nitrique.

H₂SO₄ : Acide sulfurique.

Mg²⁺ : Cation magnésium.

Na⁺ : Cation sodium.

NaNO₃ : Nitrate de sodium.

NH₃ : Ammoniac.

NH₄⁺ : Cation ammonium.

NH₄NO₃ : Nitrate d'ammonium.

NO_x : Oxydes d'azote.

NO : Monoxyde d'azote.

NO₂ : Dioxyde d'azote.

NO₃⁻ : Anion nitrate.

O₃ : Ozone.

PM-1 : Particulate Matter (aérosol de diamètre < 1 µm).

PM-10 : Particulate Matter (aérosol de diamètre < 10 µm).

PM-2,5 : Particulate Matter (aérosol de diamètre < 2,5 µm).

SO₂ : Dioxyde de soufre.

SO₄²⁻ : Anion sulfate.



Introduction

Introduction

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse qui entoure la planète terre. Elle est composée d'azote (78%), d'oxygène (20.94%), de vapeur d'eau, de gaz carbonique et de particules. L'air est le nom de ce mélange de gaz et de particules. La masse de l'atmosphère est de 5.10^{15} tonnes, 300 fois plus faible que celle des océans ($1,4.10^{18}$ tonnes) [1]. Cependant, l'atmosphère terrestre est de plus en plus polluée. Le développement de la civilisation industrielle a fait rentrer dans l'atmosphère de nouvelles substances nocives et laisse apparaître maintenant les conséquences des émissions continues de ces polluants. Le volume cumulé n'est plus négligeable pour notre planète. De plus les processus impliqués dans la pollution sont nombreux et souvent très complexes. Cette complexité du système atmosphérique est telle que les phénomènes se produisant dans une couche influent indirectement les mécanismes de pollution dans l'autre couche. C'est le cas de ceux impliqués dans les modifications climatiques liées à l'effet de serre [2].

Depuis le 19^{ème} siècle, certaines zones urbaines industrialisées en Europe et dans le monde ont connu de graves problèmes de pollution atmosphérique [3].

Les émissions en cause dans la plupart des villes étaient principalement celles du soufre et les fumées noires, dues à l'utilisation du charbon dans les maisons et les industries. Un des épisodes les plus marquants, le grand smog de Londres, survint au mois de décembre 1952, durant cinq jours et il aurait causé 3500 à 4000 décès [4].

C'est à cette période que l'on a commencé à mesurer sérieusement la pollution atmosphérique.

Depuis, l'étude de la pollution atmosphérique s'est largement diversifiée pour une meilleure connaissance du phénomène de pollution et une lutte plus efficace : il s'agit d'un problème multidisciplinaire qui mobilise autant les spécialistes épidémiologiques, les spécialistes en modélisation des transports, en émission et transformation des polluants, que les autorités locales et les industriels.

L'impact de la pollution atmosphérique urbaine sur la santé est de mieux en mieux documenté. Un polluant est un corps d'origine anthropique ou non, à l'état solide, liquide ou gazeux, contenu dans l'atmosphère et qui ne fait pas partie de la composition normale de l'air ou qui y est présent en quantité anormale. Suivant un critère de toxicité, de spécificité de sources et de la pollution générée, les principaux polluants mesurés par les organismes de surveillance de la qualité de l'air sont les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO_2), le monoxyde de carbone (CO), les particules en suspension (PS), le plomb (Pb), les composés organiques volatils (COV) et l'ozone (O_3).

Dans les polluants incriminés, les particules sont parmi les plus étudiés. On distingue surtout les particules en suspension dans l'air de diamètre inférieur à 10 micromètres (μm) appelées PM-10 ou inférieur à $2.5\mu\text{m}$ (PM-2,5) ainsi que les particules ultrafine de diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$ (PM-1) qui regroupent des éléments d'origine primaire et secondaire. Les particules primaires sont des particules émises telles quelles dans l'atmosphère, sables très fins des tempêtes sahariennes, particules très fines produites par le travail du sol, sels marins, suies issues de la combustion et particules organiques diverses. Les particules secondaires sont formées à partir de réactions physico-chimiques entre d'autres polluants appelés précurseurs comme l'ammoniac et des oxydes d'azote ou des sulfates, combinés en nitrate d'ammonium et en sulfate d'ammonium qui s'agglomèrent. Le principal polluant secondaire est l'ozone qui se forme sous l'action des rayons du soleil et de certains polluants primaires comme les COV et les oxydes d'azote.

Leurs effets dépendent de leurs tailles, de leurs natures et de leurs compositions qui varient selon leurs origines. Leurs tailles sont exprimées par rapport à leurs diamètres aérodynamiques moyens. Les particules en suspension dans l'atmosphère urbaine constituent un ensemble vaste et hétérogène sur les plans chimique et physique.

On constate une relation inverse entre le diamètre des particules et la toxicité, plus la particule diminue en granulométrie, plus son pouvoir toxique augmente. C'est ainsi que les PM-1 (particules très fines de diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$) sont plus nuisibles que les PM-2,5 qui elles le sont plus que les PM-10.

Les préoccupations sur l'évolution des pollutions portent moins aujourd'hui sur l'industrie que sur le secteur des transports. Du fait de la concentration des populations et des activités en ville, à cause du flux croissant des échanges et de l'accroissement constant du parc et de la circulation automobile, la pollution atmosphérique constitue toujours une préoccupation particulièrement sensible.

En Algérie, la croissance du parc automobile induite par le développement socio-économique et la forte urbanisation ont conduit à l'émergence chez la population citadine de maladies chroniques liées à la dégradation de la qualité de l'air [5].

De manière générale, et selon les études que nous avons menées, les émissions dégagées par les véhicules sont la principale source de pollution. Nous avons actuellement dans la seule ville d'Alger centre (75 541 habitants) 27084 de véhicules qui circulent. Les grandes agglomérations craignent d'être asphyxiées par l'automobile [6].

Des progrès importants dans la réduction de la pollution ont ainsi été accomplis à partir des années 1980 grâce à un renforcement des normes dans ce domaine.

Enfin, la différence de normes existantes entre les normes algériennes ($80\mu\text{g}/\text{m}^3$) et celle de l'OMS ($20\mu\text{g}/\text{m}^3$), nous a conduites à poser la question suivante : le citoyen algérien résiste-il aux effets des PM 4 fois plus que les autres citoyens du monde ?!

L'objectif principal de ce travail est de mesurer et contrôler les niveaux de matière particulaire (PM-10, PM-2,5, PM-1) dans la ville d'Alger et d'identifier les différentes sources de cette pollution dans l'espoir qu'un plan de gestion de ces sources anthropiques soit mis en place, pour mieux contrôler la qualité de l'air, et d'informer les autorités locales ainsi que la population de la qualité de l'air.

Le mémoire s'articule autour de 2 chapitres :

Le premier chapitre (Partie théorique) présente des généralités sur les aérosols, la description physico-chimique, leurs sources, les propriétés physiques, leurs formations et interactions, leurs effets sur la santé et le bilan radiatif terrestre, l'économie ainsi qu'une synthèse des normes et valeurs recommandées au niveau national et international.

La deuxième partie de ce travail (Résultats et méthodes) sera consacrée, à l'étude sur l'évolution des teneurs en PM-i dans la zone urbaine d'Alger. Elle se décomposera en deux parties. La première, sera consacrée à la description de la zone étudiée et méthode d'analyse utilisée. Enfin, la dernière partie sera destinée à la présentation et discussion des résultats.

Partie 01

Partie théorique

Chapitre 01

Généralités sur la pollution atmosphérique

Chapitre 1 Généralités sur la pollution atmosphérique

1.1. Généralités sur la pollution atmosphérique

1.1.1. Structure de l'atmosphère terrestre

L'atmosphère terrestre est divisée en plusieurs couches concentriques et superposées. On retrouve successivement :

La biosphère comprise entre le sol et une centaine de mètres d'altitude. Dans la biosphère vivent les hommes, les animaux et les plantes terrestres. C'est la zone où sont émis les polluants atmosphériques.

La troposphère qui s'étend du sol jusqu'à 12 km d'altitude environ. C'est la zone où les composés chimiques se mélangent et réagissent entre eux, c'est le site de la grande majorité des réactions atmosphériques.

La stratosphère qui est comprise en moyenne entre 12 – 50 km d'altitude. Les polluants y sont rares mais très destructeurs.

La troposphère est séparée de la stratosphère par la tropopause [2].

1.1.2. Variation de la température et de la pression atmosphérique

La pression atmosphérique décroît très régulièrement avec l'altitude. En revanche, la température décroît, croît puis décroît de nouveau avec l'altitude. Le sol est chauffé par les radiations solaires, essentiellement par absorption de la lumière infrarouge. Le sol transmet sa température à la basse troposphère [2].

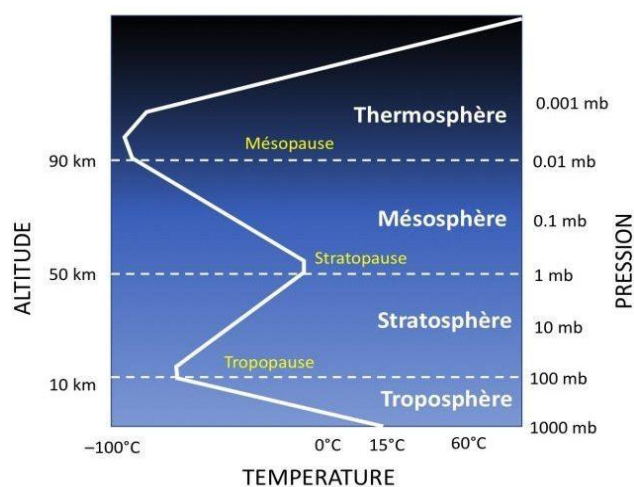


Fig. 1 Structure de l'atmosphère et variation de la température et de la pression atmosphérique [7].

1.1.3. Mixage et transport des espèces chimiques

Dans la troposphère, les substances chimiques subissent des phénomènes de transports horizontaux (l'advection). Elle est due à l'apport, sous l'effet du vent. Le transport des gaz et particules peut s'étendre sur plusieurs milliers de Km et certains polluants peuvent faire le tour de la terre [2] par exemple le transport de poussières sahariennes vers les Caraïbes et la Floride [8] et la poussière transportée à travers le Pacifique depuis l'Asie qui a été détectée au États-Unis [9]. Dans les années récentes, imagerie et autres mesures d'instruments embarqués sur des satellites nous informent sur la présence et le transport des aérosols. Ces techniques sont utilisées de manière routinière. On a aussi les mixages verticaux (convection), ce transport atmosphérique est un phénomène analogue à la convection ou l'air chaud monte puis redescend. Ces deux phénomènes contribuent à un fort brassage de toutes les espèces chimiques gazeuses ou particulaires, dans les basses couches [2].

Dans la stratosphère la plus part des réactions chimiques impliquent l'ozone. Ce gaz absorbe la lumière ultraviolette entre 210 et 290 nm qui sont néfastes à la vie et l'environnement, tandis que l'oxygène moléculaire absorbe en dessous de 210 nm. La présence de ces deux gaz à des concentrations importante entraine une augmentation de la température. Un équilibre naturel s'établit entre les espèces oxygénées (O_2 et O_3) qui conduit à une concentration d'ozone constante et il est décrit par le cycle de CHAPMAN. Dans la stratosphère il n'y a pas ou peu de brassage des composés chimiques [2].

1.2. La pollution atmosphérique

1.2.1. Définition

La pollution de l'air est définie comme l'addition dans notre atmosphère de tout matériau qui aura un effet néfaste sur la vie et sur notre planète. Le matériau peut être un hydrocarbure gazeux toxique ayant des effets durables sur un organisme l'ingérant ou éventuellement un irritant particulaire qui pourrait causer des problèmes similaires. Il pourrait s'agir d'un rayonnement atomique sous une forme que nous ne pouvons pas voir qui pourrait être dommageable pour les cellules animales ou végétales. Un polluant peut être un élément émis dans l'atmosphère, par un acte de la nature ou anthropique qui réduit la teneur en oxygène ou modifie de manière significative la composition de l'air. Un polluant atmosphérique ne doit pas être inhalé une fois il dépasse sa norme. Cela devient un polluant simplement en étant dans l'air [10].

La pollution de l'air n'a pas de barrière. Ainsi, certains polluants atmosphériques dont la durée de vie est élevée, peuvent migrer loin de leurs sources d'émission en interférant à différentes échelles spatiales. C'est pour cette raison que lors de la classification des phénomènes de pollution, il faut faire référence à l'échelle d'étude. Souvent dans la littérature, on se limite à trois niveaux d'échelles : locale, régionale et globale.

L'échelle locale

Il s'agit des pollutions rencontrées au voisinage direct des sources d'émissions comme les foyers industriels de combustion, les axes de circulation, le chauffage domestique, l'incinération des déchets. Ces sources engendrent des pollutions de proximité et/ou des nuisances olfactives à des distances inférieures à quelques kilomètres. En effet, la matière particulaire en suspension (Particulate Matter, PM), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO_2), le monoxyde de carbone (CO), les Composés Organiques Volatils (COV), les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et les métaux constituent les polluants les plus caractéristiques de ce type de pollution.

L'échelle régionale

La pollution régionale touche les zones distantes de quelques kilomètres à quelques centaines de kilomètres des sources d'émission de polluants. Cette pollution résulte des phénomènes physico-chimiques plus ou moins complexes à l'origine de la formation dans l'atmosphère de polluants dits « secondaires » à partir de polluants dits « primaires » rejetés par des sources émettrices. Notamment l'ozone (O_3), dont la formation dépend de la présence des (NO_x) et des COV, est le principal représentant de la pollution photochimique ainsi que les acides nitriques et sulfuriques, à partir des (NO_x) et du (SO_2), sont responsables de la formation des pluies acides.

L'échelle globale ou mondiale

La pollution à l'échelle de la planète, susceptible d'affecter l'équilibre de l'écosystème. Elle se caractérise par les substances impliquées dans le phénomène de changement climatique, notamment les gaz à effet de serre et en particulier le dioxyde de carbone (CO_2), et par les substances responsables de la diminution de la couche d'ozone stratosphérique, principalement les émissions de ChloroFluoroCarbures (CFC) [2].

1.2.2. Les polluants atmosphériques

1.2.2.1. Les types de polluants

Polluant primaire

Les différents polluants introduits dans l'atmosphère directement ou comme conséquence la modification des émissions naturelles de la biosphère sont appelés des «polluants primaires» tels que les gaz et particules issues des activités de transport [11].

Polluant secondaire

Un grand nombre de polluant vont réagir chimiquement, en particulier sous l'effet du rayonnement solaire, et donner de nouveau constituants ou «polluants secondaires», résultant de réactions chimiques mais aussi souvent de réactions photochimiques, qui sont parfois plus agressifs pour l'environnement que ceux qui lors ont données naissances parmi ces polluants on a l'acides sulfuriques, l'acide nitriques, qui sont des acides forts, des oxydants fort comme l'ozone. L'atmosphère est donc le siège d'une intense activité chimique, entre composés qui sont la plus part des temps à l'état de traces infimes [11].

Les processus les plus connus pour la formation secondaires sont :

- La transformation du dioxyde de soufre SO_2 en sulfates SO_4^{2-} .
- La transformation des oxydes d'azote NO_x en nitrates NO_3^-
- La transformation des composés organiques lourds en particules organiques.
- Les particules secondaires constituent généralement les particules fines de $D_p < 2.5 \mu\text{m}$ [12].

1.2.2.2. Les principaux polluants atmosphériques

Plusieurs éléments sont considérés comme des polluants de l'air parce qu'ils n'existent pas naturellement dans l'air ou ne s'y trouvent qu'à de très faibles niveaux de concentration, et qu'ils sont nocifs pour la santé et pour l'environnement. Ces polluants se divisent en deux catégories : gaz et particules.

a) Les gaz

Les polluants gazeux présents dans l'atmosphère sont très nombreux et il n'est pas possible de les énumérer, ni de les identifier tous. Nous dressons une liste non exhaustive des principaux composés par grandes familles de polluants.

Le dioxyde de soufre (SO₂) : Ce gaz résulte des combustions (oxydation du soufre des combustibles fossiles) et il est associé à de nombreuses pathologies respiratoires, souvent en combinaison avec les particules. Il peut entraîner des inflammations et une altération de la fonction respiratoire et les études épidémiologiques montrent également souvent des liens entre dioxyde de soufre et particules dans l'air, et hospitalisations pour troubles respiratoires et cardiaques. Le dioxyde de soufre peut se transformer en particules de sulfates dans l'air ambiant et concourt également au phénomène des pluies acides, néfastes pour les écosystèmes aquatiques et terrestres.

Les oxydes d'azote (NO et NO₂) : Ils sont émis lors des combustions (chaudières, moteurs...) et le dioxyde d'azote est le plus nocif pour la santé humaine. C'est un gaz irritant pour l'appareil respiratoire et il favorise l'hyperréactivité bronchique. Les populations asthmatiques semblent plus sensibles également à ce polluant. Chez l'enfant il peut favoriser des infections pulmonaires. Les oxydes d'azote participent en outre à la formation de polluants photochimiques comme l'ozone, néfastes pour la santé, et concourent au phénomène des pluies acides.

Les métaux lourds : Ce sont des métaux de densité élevée comme le plomb (Pb), le Mercure (Hg), l'Arsenic (As), le Cadmium (Cd), le Nickel (Ni), le Mercure (Hg). Dans l'air ils sont sous forme de particules à l'exception du mercure qui est principalement gazeux. Ils proviennent de combustions, de certains procédés industriels, de l'incinération des déchets. Ils peuvent s'accumuler dans l'organisme et les effets sont variables selon les métaux ; atteintes du système nerveux, des fonctions rénales, hépatiques, etc. Leur dépôt sur les surfaces (sols, eaux, etc.) conduit également à une contamination de la chaîne alimentaire.

Les hydrocarbures et les composés organiques volatils (COV) : Ils sont émis par diverses sources (solvants, pétrochimie, automobiles...) et recouvrent de nombreux composés aux effets différents (odeurs, altération de la fonction respiratoire, troubles nerveux...). Certains COV comme le formaldéhyde et le benzène sont cancérigènes. Les COV contribuent aussi à la formation de polluants photochimiques comme l'ozone, nocifs pour la santé. L'atmosphère peut comporter également des composés organiques persistants et peu volatils tels que des pesticides, dioxines, furanes.

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) : Ce sont des composés organiques dont la molécule comporte au moins deux noyaux benzéniques. On y trouve des composés tels que le benzo(a)pyrène qui est cancérigène. Certains HAP peuvent aussi affecter le système immunitaire. Dans l'air ils proviennent notamment des combustions du secteur domestique dans des conditions mal maîtrisées (mauvaises combustions du bois dans des cheminées et foyers ouverts) et pour une plus faible part de la circulation automobile.

Le monoxyde de carbone : Ce gaz est issu des combustions et chaudières mal réglées, et de la circulation automobile. Il se fixe sur l'hémoglobine et peut entraîner des troubles respiratoires, des effets asphyxiants, des maux de tête, et des troubles cardiaques

L'ammoniac (NH₃) : Ce gaz est notamment émis par les lisiers d'élevage. Il est malodorant et irritant à forte concentration. Dans l'air, l'ammoniac contribue à la formation de fines particules et de nitrate d'ammonium, et contribue aux phénomènes d'acidification et d'eutrophisation des milieux naturels par dépôt de matière azotée.

L'ozone et les polluants photochimiques : L'ozone troposphérique résulte majoritairement de réactions chimiques sous l'effet du rayonnement solaire, entre les oxydes d'azote, les composés organiques volatils, le monoxyde de carbone. Ces réactions forment aussi d'autres polluants (nitrate de peroxyacétyle, acide nitrique, aldéhydes, fines particules) regroupés sous le terme de « pollution photochimique ». L'ozone en est le principal constituant et il est néfaste pour la santé humaine et la végétation. L'ozone contribue également à l'effet de serre et constitue, avec les particules, l'une des priorités du programme CAFE (Clean Air For Europe) en matière de préservation de la qualité de l'air en Europe [13].

b) Les particules

L'atmosphère contient de toutes petites particules solides ou liquides en suspension, appelées aérosols. Leur taille varie de quelques nanomètres à presque 100 microns soit l'épaisseur d'un cheveu. En moyenne globale, plusieurs millions de tonnes d'aérosols sont émis chaque jour par une multiplicité de sources à la fois naturelles et humaines. Dans la stratosphère, les aérosols sont rares mais ils peuvent résider plusieurs années. Dans la basse troposphère, où ils sont en général beaucoup plus abondants, les aérosols séjournent quelques jours seulement. Cette durée variant essentiellement selon les précipitations. Il en résulte que, contrairement aux gaz à effet de serre, la concentration des aérosols peut varier de plusieurs ordres de grandeur à des échelles régionales ou journalières [1].

La diversité des sources et des mécanismes physiques et chimiques de formation des aérosols entraîne une grande diversité de tailles et de morphologies des aérosols. Le diamètre d'un aérosol ne sera donc pas unique mais réparti sur plusieurs ordres de grandeurs [14]. La matière particulaire sera détaillée dans le chapitre suivant.

1.2.3. Source de la pollution atmosphérique

La pollution de l'atmosphère résulte ainsi du rejet direct de composé gazeux ou sous formes de particules, nocifs pour l'homme ou la biosphère, provenant de divers activités humaines, industrielles, domestiques, agricoles, les transports, les combustions diverses. Les pollutions ainsi

sont dites d'origine anthropique. La biosphère produit aussi naturellement des gaz et des particules qui se retrouvent dans l'atmosphère. Ces sources naturelles qui sont souvent de même nature que les polluants, sont appelés terrigènes lorsqu'elles proviennent du sol, biogéniques quand elles sont produites par la matière vivante. Les activités humaines modifient ces émissions, apportant alors une contribution à la pollution atmosphérique [2].

La figure 2 présente un schéma illustrant les différentes sources des polluants atmosphériques.

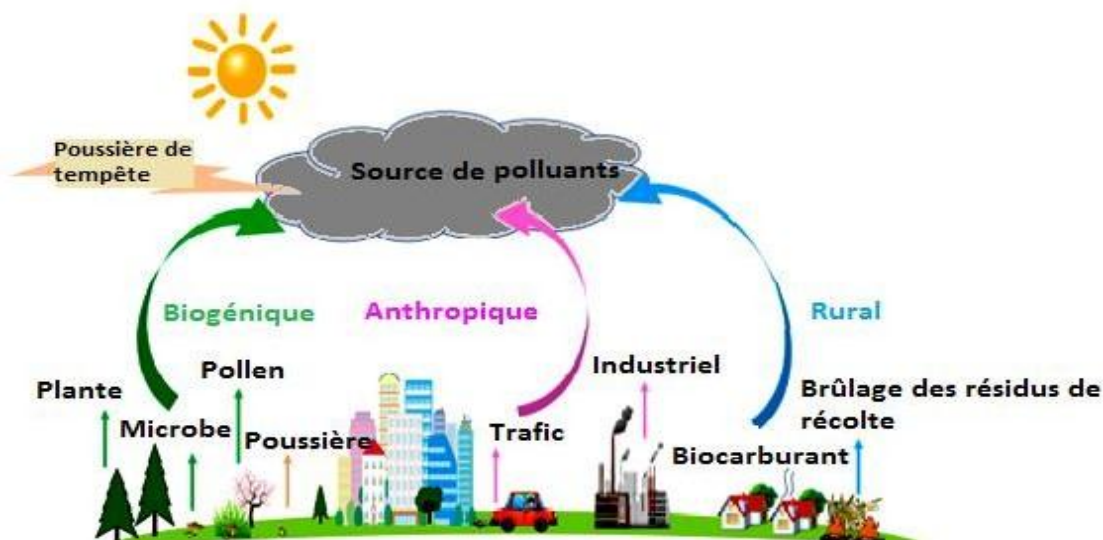


Fig. 2 Schéma résumant les différentes sources des polluants atmosphériques [15].

a) Sources des polluants gazeux

Les combustibles de types fossiles mais il faut y ajouter la combustion des déchets.

Les polluants gazeux : sont émis lors de l'incinération des déchets ou encore dans des aciéries.

Les activités industrielles sont sources majeurs de polluants, en raison de leurs grande variété, vont engendrer des pollutions diverses, parfois spécifiques.

L'évaporation des carburants et solvants, les composés émis sont des hydrocarbures dont certain sont toxiques.

Les émissions de la végétation, des sols, de l'homme et des animaux : La végétation émet des gaz biogénique, absorbant du gaz carbonique pendant le jour et le relâche en partie pendant la nuit mais elle émet aussi des hydrocarbures de type de l'isoprène et les terpènes.

Les bactéries présentes dans les sols et dans des eaux continentales ou océaniques recyclent la matière organique et entraînent des émissions de gaz carboniques, d'oxyde d'azote, d'ammoniac, des composés de soufre, d'hydrocarbures (CH₄). L'utilisation d'engrais en agriculture a perturbé les cycles biogéochimiques et les émissions des sols s'en trouvent augmentées. L'agriculture aussi responsable de l'émission de pesticides dans l'atmosphère lors de l'étape d'épandage mais aussi par évaporation [2].

b) Source des aérosols

Il existe deux types d'aérosols mélangés dans l'atmosphère, l'aérosol d'origine naturel et l'aérosol de pollution. La part de chacun des deux types dépend de l'éloignement des centres d'activités humaines et industrielles et d'une autre part l'éloignement des zones désertique et marines [2].

Source de particules naturelles

Les principales sources naturelles primaires sont le sel marin, les poussières minérales, matière biologique primaire et particules volcaniques.

Particules minéral de poussière, émises principalement dans les déserts et les régions semi-arides, sont le type de particule le plus abondant (sur une base de masse) dans l'atmosphère au niveau mondial. Les particules de poussière minérale peuvent être transportées depuis des régions telles que les déserts lors de grandes tempêtes de poussière à de longues distances intercontinentales. Pour les zones océaniques ouvertes et éloignées, les dépôts de poussières minérales constituent une source importante de nutriments, en particulier des oligo-éléments tels que le fer ou le phosphore. Les particules de sel de mer sont tout aussi importantes au niveau mondial. Elles sont générées par des processus d'éclatement des bulles et déferlement des vagues à la surface de la mer et sont fortement corrélés avec la vitesse du vent celles-ci par évaporation, conduisent à la formation de cristaux solides. L'aérosol marin est constitué d'ions de chlorure et de sodium mais aussi de grandes quantités de nitrates et de sulfates [2].

Les particules biologiques primaires comprennent une grande variété de particules comme le pollen, les spores fongiques, les bactéries et les débris végétaux et dans les environnements marins également des matières organiques présentes dans la couche de surface de l'océan.

Les particules naturelles secondaires sont formées à partir de plusieurs contenant de l'azote et du soufre mais également des gaz d'origine organique. A l'échelle mondiale, le Sulfure de diméthyle (SDM) est émis par le phytoplancton marin dans l'atmosphérique. Le DMS est oxydé en SO_2 et finalement en acide sulfurique. L'acide sulfurique gazeux forme très rapidement des particules d'aérosol ou se condense sur les particules existantes en raison de sa faible pression de vapeur.

Le nitrate est un autre composant particulaire inorganique important, qui se forme principalement par oxydation des NO_x et du NO_2 . La foudre et les émissions de sol (activités bactériennes) sont les principales sources de ces précurseurs. La plus grande fraction secondaire naturelle est formée à partir de précurseurs organiques gazeux tels que les terpènes et les sesquiterpènes, qui sont émis par les plantes. Par oxydation dans l'atmosphère, principalement avec OH, O_3 ou NO_3 . Certains de ces produits de réaction à basse pression de vapeur se condensent sur des particules. La composition chimique des composés organiques secondaire est très complexe et plusieurs centaines de composés peuvent être trouvés dans les particules d'aérosol organiques secondaires formées à partir d'un seul gaz précurseur organique [16].

Sources de particules anthropiques

Les particules primaires générées par les activités humaines incluent la combustion de la biomasse, combustion de combustibles fossiles et activités industrielles. Bien que les feux de forêt puissent avoir des causes purement naturelles, ils sont souvent liés à des activités anthropiques. Ces dernières années, il a également été reconnu qu'une fraction importante de la production biologique de particules présente dans l'atmosphère est due à la biomasse brûlante des activités de chauffage et de cuisine résidentielles, non seulement dans les pays en développement mais aussi dans les pays industrialisés. Suie (c'est-à-dire du carbone semblable à du graphite), des matières organiques et des sels inorganiques sont les composants principaux de la particule brûlant de la biomasse et peut varier considérablement en fonction du type de biomasse, des conditions de combustion et les conditions de ventilation. En outre, un certain nombre de processus industriels à grande échelle peuvent émettre des masses de particules dans l'atmosphère telles que les mines, les cimenteries, ou industrie de transformation des métaux. Ces sources sont souvent d'importance locale [16].

La figure 3 donnant les principales sources biogéniques et anthropiques d'aérosols organiques à Beijing, en Chine en 2018.

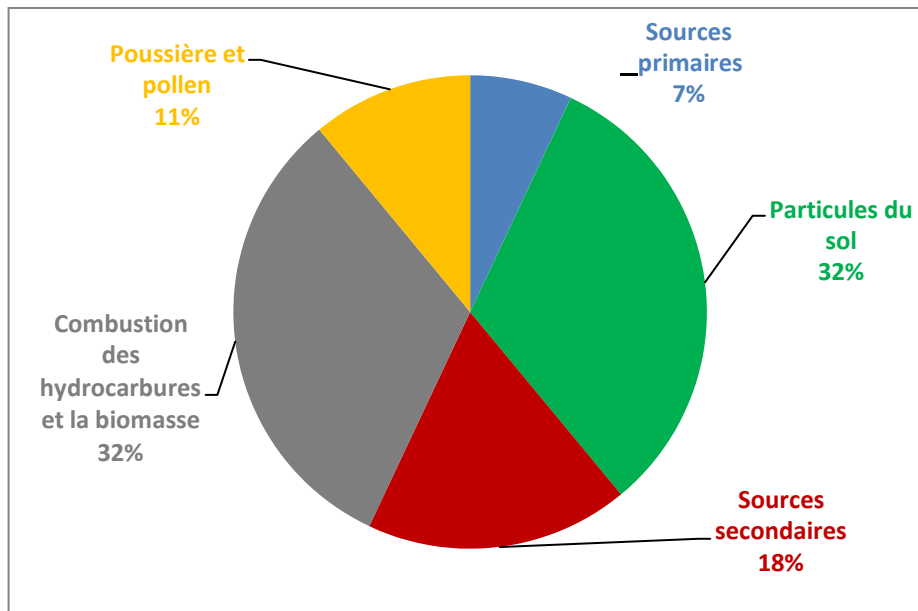


Fig. 3 Schéma résumant les différentes sources des aérosols atmosphériques biogéniques et anthropiques d'aérosols organiques à Beijing, en Chine 2018 [15].

1.2.4. Météorologie et pollution :

Les concentrations et la distribution spatiotemporelle des polluants ne sont pas seulement déterminées par les sources et les transformations physicochimiques. Elles sont aussi dues à des paramètres physiques qui révèlent de la dynamique atmosphérique. Un épisode de pollution est observé lorsque les émissions de polluants sont importantes et quand la météo est défavorable tels que l'absence ou faible vent, chaleur et lumière, absence de pluies, couche d'inversion basse [2].

1.2.4.1. Influence du vent

Le vent tend à disperser la pollution surtout en l'absence de relief. Plus le vent est fort plus la pollution se disperse rapidement.

1.2.4.2. Influence de la chaleur et de la lumière

La lumière et la température augmentent la probabilité et la vitesse des réactions photochimiques et les concentrations radicaux oxydants tels que le OH. Les espèces primaires disparaissent rapidement et les substances secondaires apparaissent rapidement.

1.2.4.3. Présence de pluies

La présence de pluies ou de neige conduit toujours à une diminution de la pollution. Deux phénomènes de lessivage de l'atmosphère par les pluies sont responsables de cette diminution

- Incorporation des gaz dans le nuage.
- Lessivage des particules sous le nuage.

Les gaz solubles se dissolvent dans les gouttes d'eau de nuages, c'est le phénomène d'incorporation. En tombant la pluie entraîne mécaniquement vers le sol les polluants. Les particules et certains gaz sont lessivés par la pluie, c'est le phénomène d'abattement. L'atmosphère est purifiée mais il peut y avoir un transfert de la pollution de l'air vers les sols ou les eaux de surfaces.

1.2.4.4. Couche d'inversion

Dans la couche de mélange, les polluants se diluent dans le volume atmosphérique « V » (appelé boîte atmosphérique) délimité par la surface au sol (S) et la hauteur de la couche de mélange (H). La concentration est alors :

$$[C] \equiv \frac{G}{V} = \frac{g}{s*H} \quad (1)$$

Avec :

G la quantité de polluant exprimé en Kg

H exprimée en Km.

S s'exprime en Km².

On prend souvent comme surface au sol : S = 1 Km² donc :

$$[C] = \frac{g}{H} \quad (2)$$

Dans les conditions normales, la hauteur H de la couche de mélange s'étend du sol jusqu'à la troposphère libre, dans certaines conditions météo, il se produit, en altitude, une inversion de température, et la masse d'air est « bloquée » par cette couche d'inversion qui agit comme un couvercle empêchant la dispersion verticale des polluants. Si la dispersion verticale est empêchée donc le volume d'air sera faible, puisque la quantité de polluant G reste la même, la concentration des polluants augmente.

Les causes de l'existence de ces couches d'inversion diffèrent suivant le lieu d'observation. Elles peuvent être dues à un :

Rapide refroidissement du sol. La couche d'inversion peut alors être très basse (200 m) [2].

Chapitre 02

Les particules atmosphériques

Chapitre 2 : Les particules atmosphériques

Les aérosols sont des espèces d'intérêt scientifique importantes pour leurs effets sur la chimie de l'atmosphère, le cycle hydrologique et le climat. Ils influencent de manière critique et direct le bilan radiatif de l'atmosphère terrestre, affecte la formation de nuages, et sont également l'un des principaux polluants atmosphériques engendrant une variété de maladies respiratoires et cardiovasculaires. Leurs effets sur la santé humaine et le biote ont été un sujet de préoccupation depuis des décennies qui a inspiré groupes engagés dans les domaines de la chimie atmosphérique et Santé publique à entreprendre des études pour aider les programmes d'atténuation. Pour une régulation et atténuation efficaces de la source des effets des aérosols les études de répartition sont devenues un exercice essentiel [17]. Malgré cette importance, les particules d'aérosol sont relativement mal caractérisées en ce qui concerne leur concentration, distribution temporelle et spatiale, propriétés physiques et chimiques. Cette grande incertitude est principalement due au fait qu'il ya beaucoup de sources, mais également une multitude de processus de formation assez complexes [15]. Dans cette partie, nous allons présenter en détail les particules atmosphériques, leur classification et leurs caractéristiques.

2.1. Définition

Pour aborder notre travail sur la pollution par les particules, un certain nombre de termes doivent être connus, pour décrire les types particuliers d'aérosols, et cela suivant la forme, le comportement, l'origine des particules.

Les aérosols : Toutes les particules liquides ou solides en suspension dans l'air sont définies comme des particules d'aérosol de nombreux types des particules sont résumées par cette définition [18].

Fumée : Cela inclut les particules solides coagulées, les particules formées par effet de coagulation à partir de particules liquides et solides et les particules issues de la transition de la particule liquide à la particule cristallisée.

Selon la définition de l'ISO, la fumée est clairement définie comme un «aérosol formé par des particules solides au cours du processus de métallurgie. C'est le condensat gazeux de la vapeur générée après l'évaporation du matériau fondu. Au cours du processus de formation, il se produit généralement une réaction chimique telle que l'oxydation. » Dans les circonstances habituelles, les particules de fumée dont le diamètre est bien inférieur à 0,5 μm sont principalement contrôlées par l'effet du mouvement brownien dans l'air, ce qui confère à ces particules une forte capacité de

dispersion. Elles sont difficiles de s'installer dans l'air calme. Le flux de fumée généré par le générateur de fumée est généralement utilisé pour détecter les fuites sur les filtres à air dans les technologies de purification de l'air et pour réaliser l'expérience de visualisation du flux.

Brouillard et brume : Le brouillard comprend toutes les particules liquides dispersées et les particules liquides coagulées.

Selon la définition de l'ISO, le terme brouillard signifie «le terme général qui désigne un système en suspension dans l'air liquide dans l'air. En météorologie, cela signifie que le système en vol contient des gouttelettes, ce qui donne une visibilité inférieure à 1 km. »La taille des particules diffère selon l'état de la formation et se situe entre 0,1 et 10 μm . La loi de Stokes domine principalement leur mouvement. Par exemple, le brouillard de sulfate généré à partir de gaz SO_2 sera transformé en brouillard d'huile par l'effet combiné de la chaleur et de l'air comprimé, et le brouillard d'huile pourrait être l'aérosol standard utilisé pour tester le filtre à air. La combinaison de brouillard et de particules solides fines est appelée voile.

Smog : Il comprend à la fois des particules liquides et solides et des particules dispersées et coagulées. La taille varie de quelques dixièmes à plusieurs dizaines de micromètres, comme le système combiné formé de poussière de charbon, de SO_2 , de CO et de vapeur d'eau, qui existe dans l'air de la zone industrielle (le cas typique est la brume de Londres qui est le mélange de fumée et brouillard, et le smog FeO généré dans une usine de fer). Toutefois, selon la définition de l'ISO, le smog représente généralement «un aérosol visible généré pendant le processus de combustion» et «pas de vapeur d'eau incluse», ce qui signifie qu'il existe une petite différence entre le smog et le brouillard [10].

Les suies : Les particules de suie sont en majorité composées de carbone (environ 90%). On peut y trouver de l'hydrogène (environ 10%), de l'oxygène et de l'azote dans des proportions plus faibles. Les suies sont issues de la combustion incomplète des hydrocarbures et de la condensation d'espèces gazeuses. La structure interne des suies est proche de celle du graphite excepté aux limites extérieures où les couches d'atomes de carbone suivent la courbure de la surface. A l'intérieur, on trouve des structures ordonnées même s'il existe de nombreux défauts. Par ailleurs, les distances entre les plans réticulaires sont généralement supérieures à celles du graphite. Leur densité est donc plus faible que celle du graphite ($2,25 \text{ g/cm}^3$) et comprise entre 1,8 et 2 g/cm^3 [19].

Les cendres volantes : les cendres désignent les résidus solides subsistants après combustion des matériaux carbonés. Ces cendres finement divisées sont entraînées dans les fumées de combustion pour donner des cendres volantes [20].

Les noyaux d'Atiken : sont des particules qui condensent la vapeur d'eau avec une sursaturation inférieure à celle correspondant à la condensation des ions [2].

2.2. Forme des aérosols :

L'organisation des molécules engendre des formes de particules très variées. Les aérosols atmosphériques peuvent être de forme sphérique, allongée ou plate. La figure ci-après illustre ces différentes formes d'aérosols en fonction de leur source.

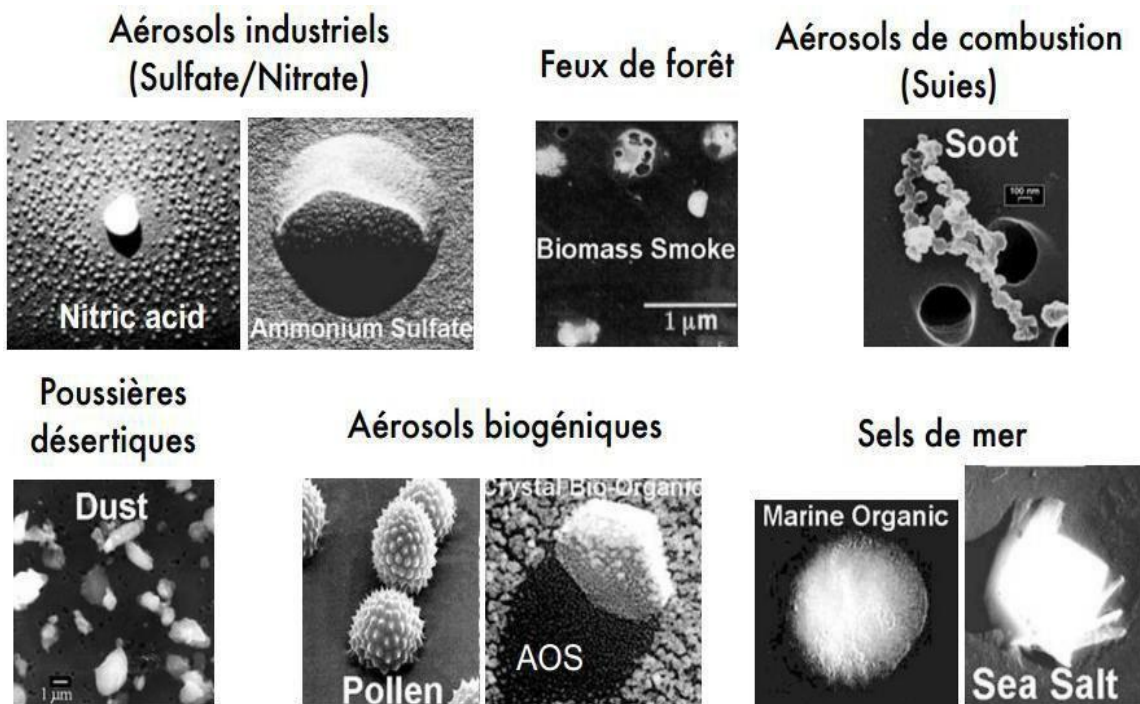


Fig. 4 La forme des aérosols [21].

A l'échelle macroscopique, le diamètre des particules est généralement ramené à un diamètre sphérique : le **diamètre aérodynamique** correspond au diamètre d'une particule sphérique d'une masse volumique de 1 g.cm^{-3} ayant la même vitesse de sédimentation. Le diamètre équivalent est le diamètre d'une particule sphérique de même volume. En ramenant le diamètre réel à un diamètre équivalent, on suppose le transport des particules similaire dans l'atmosphère, quel que soit leur forme.

2.3. Classification des particules

La classification des particules peut se faire selon leurs tailles ou la composition chimique.

2.3.1. Classification des particules selon leurs tailles

On considère toutes les particules comme sphériques ou assimilées à des sphères. La taille des particules est définie par le diamètre aérodynamique moyen appelé D_p . Cette approximation est valable pour les particules humides qui sont sphériques. Elle ne l'est pas pour les cristaux ou des particules fraîchement émises.

En raison des différents effets sur la santé associés à des particules de différents diamètres, la matière particulaire est donc caractérisée selon sa taille. Avec des tailles de particules couvrant une gamme allant de quelques nanomètres, à plus de 100 μm , plusieurs classes de particules se distinguent en littérature, en fonction de leurs tailles :

Les particules totales en suspension (TSP) : ces particules de diamètre inférieur à 30-40 μm séjournent longtemps dans l'atmosphère et sont en général captées par le segment extra thoracique (elles sont arrêtées au niveau de la bouche et du nez).

Les particules inhalables appelées PM-10: de grosses particules, dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 μm , et qui peuvent pénétrer dans l'appareil respiratoire jusque dans les voies aériennes supérieures.

Les particules respirables ou alvéolaires PM-2,5 : de fines particules, dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 μm , et qui peuvent parcourir l'appareil respiratoire jusqu'aux alvéoles pulmonaires.

Les particules très fines PM-1 : Cette classe désigne les particules de diamètre inférieur à 1 μm qui échappent en partie à la rétention dans les installations de dépoussiérage et qui se déposent de manière irréversible dans les alvéoles du système respiratoire [24]. La figure ci-après illustre le classement de quelques exemples de particules selon leurs classes granulométriques.

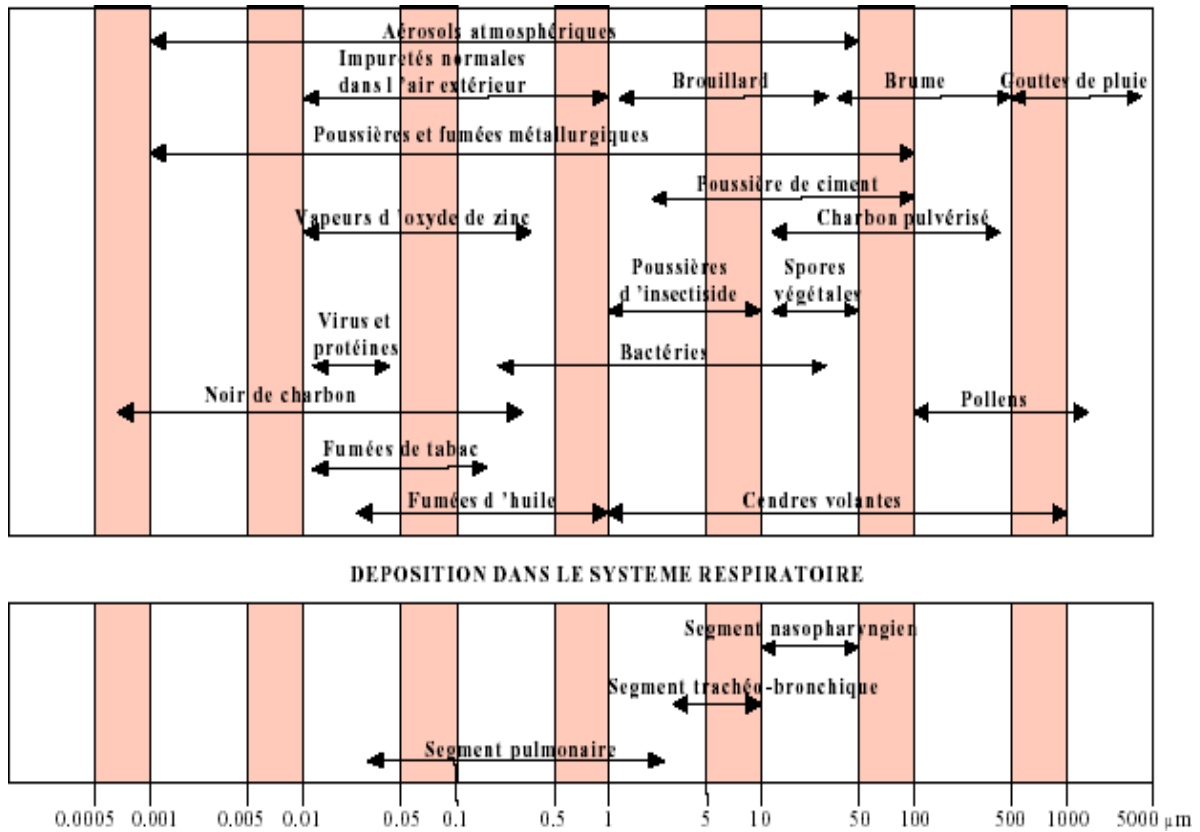


Fig. 5 Le classement des particules selon granulométrie [21].

2.3.2. Classification des particules selon leur composition

On distingue alors :

Particules minérales

Telles que les particules de poussière métalliques, particules de poussière minérale et particules de matériaux de construction.

Particules organiques

Telles que les fibres végétales, la peau des animaux, les cheveux, la corne, les débris de peau, carburant chimique et plastique [10].

2.4. Composition chimique des aérosols

La composition des particules atmosphériques est très hétérogène et varie en fonction de leurs sources d'émission (marine, crustale, biogène, transport, industrie), de leurs évolutions physico-chimiques dans l'atmosphère ainsi que de leurs fractions granulométriques.

Les espèces majoritairement retrouvées au sein des particules sont les ions sulfate, nitrate et ammonium, les éléments de la croûte terrestre, les espèces carbonées organiques et inorganiques,

ainsi que la fraction biogénique et également l'eau. A ces composés s'ajoutent des espèces à l'état de traces, tels que les métaux. Quant à la fraction biologique des particules atmosphériques, elle est constituée de bactéries, de champignons ainsi que de pollens.

Des données sur la composition chimique des PM-10 et PM-2,5 ont été issues de plus de 60 sites Européens [22]. Cette étude a montré que tous les composants (matière carbonée, carbone élémentaire, nitrate, sulfate, ammonium, matière organique, sel marin et poussière minérale) sont présents à la fois dans les fractions de particules fines et grossières à des proportions variables.

La figure 6 illustre la composition chimique typique des PM-2,5 continentale.

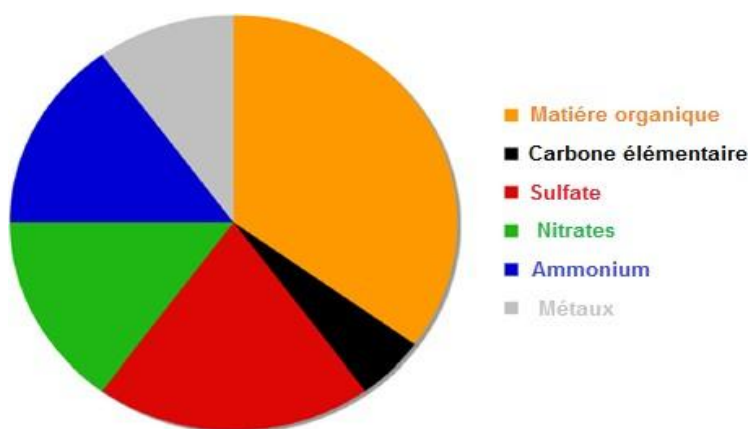


Fig. 6 Composition chimique typique des particules urbaines continentales (PM-2,5) [16].

L'aérosol de particules est constitué de quatre fractions majeures (Figure 6) :

- Fraction minérale soluble dans l'eau.
- Fraction minérale insoluble.
- Fraction carbonée.
- Fraction organique.

La répartition des fractions diffère de façon importante suivant la taille des particules. Ainsi, la fraction insoluble augmente régulièrement quand la taille augmente. La fraction soluble diminue quand le diamètre augmente.

L'importance relative des fractions carbonées et organiques varie beaucoup, mais la somme de ces deux fractions reste approximativement constante.

La fraction minérale soluble contient principalement les aérosols secondaires, sulfates et nitrates provenant de la conversion du SO_2 et NO_2 ainsi que les ions chlorures et ammonium. La partie insoluble est riche en fer, aluminosilicates et métaux lourds.

La fraction carbonée est constituée de carbone élémentaire appelé aussi « carbone suie » ou «black carbon ». Ce carbone non fonctionnalisé et hautement polymérisé est non réactif. Il provient de toutes les combustions et des débris de matériaux organiques largués par les activités humaines.

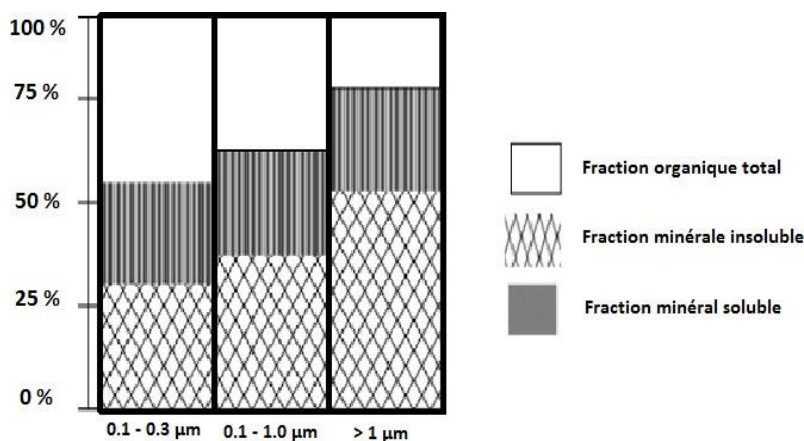


Fig. 7 Proportions relatives des fractions inorganiques et organiques, solubles et insolubles, en fonction de la taille de la particule [23].

Le carbone organique se retrouve sous forme d’alcane lourds, d’alcools, d’esters et de composés aromatiques polycycliques (HAP). Il s’agit de composés organiques à chaînes longues de 8 à 30 atomes de carbone [24].

2.5. Durée de vie des aérosols

Les aérosols ne restent pas longtemps dans l’atmosphère car ils se redéposent au sol par des phénomènes d’abatement.

Les dépôts sec et humide diminuent le temps de séjour des particules dans la troposphère. La durée de vie des aérosols atmosphériques dépend du diamètre, de la composition chimique et des propriétés thermodynamiques des particules. Si les traces de gaz atmosphériques ont des durées de vie allant de moins d’une seconde à un siècle ou plus, les temps de séjour des particules dans la troposphère ne varient que de quelques jours à quelques semaines.

La composition chimique des particules influe aussi sur la durée de vie de celles-ci. La durée de vie est liée à leurs caractéristiques hygroscopiques. Les particules grossières et celles issues du processus d’accumulation ont des noyaux de condensation efficaces, car elles ont habituellement une importante fraction de solubilité dans l’eau, et elles sont principalement éliminées de l’atmosphère par dépôt humide [25].

2.6. Evolution des particules dans l'atmosphère

Les particules n'ont pas une composition constante tout au long de leurs vie dans l'atmosphère. Depuis leurs émissions, leurs tailles, leurs abondances et leurs compositions chimiques peuvent être modifiées par différents processus physico-chimiques.

2.6.1. Evolution chimique

Les processus d'évolutions chimiques des particules au cours de leurs transports correspondent le plus souvent à des réactions chimiques homogènes ou hétérogènes de nucléation ou de condensation de gaz émis de façon naturelle ou anthropique. Ce phénomène est connu sous le nom de conversion gaz-particule. Les particules résultantes ont une faible taille à l'état initial, mais qui augmente rapidement par des processus de coagulation et de condensation.

Nucléation des gaz

Une fraction importante du nombre total de particules présentes dans l'atmosphère se forme à l'origine par nucléation à partir de la phase gazeuse. Ce mécanisme a lieu lorsque la pression de vapeur s'abaisse suffisamment. Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses observations sur la nucléation ont été effectuées, notamment la quantification du taux de nucléation, la caractérisation du processus de croissance et les premières caractérisations chimiques des particules fraîchement formées. La nucléation a été observée à différents endroits de l'atmosphère. Les particules sont formées par nucléation homogène, qui décrit la formation de nouvelles particules par conversion de gaz en particules. La nucléation des particules se fait via les amas de molécules initiaux, qui implique de l'eau et de l'acide sulfurique et éventuellement des composés basiques tels que l'ammoniac, les amines organiques ou d'autres composés organiques. Dans des conditions favorables, ces grappes se développent en particules d'aérosol de dizaines de nm de diamètre [16]. Dans la plupart des cas, l'acide sulfurique gazeux est supposé être le principal gaz précurseur car l'acide sulfurique pur (H_2SO_4) à une faible pression de vapeur aux températures atmosphériques. La pression de vapeur de H_2SO_4 est encore réduite en présence d'eau en raison de l'importante enthalpie libérée lorsque les deux substances sont mélangées. Lorsque H_2SO_4 est produit à partir de dioxyde de soufre (SO_2) en phase gazeuse, il est donc facilement sursaturé et le H_2SO_4 gazeux commence à se condenser. La vapeur d'eau est omniprésente dans l'atmosphère [18].

2.6.2. Evolution physique

Parmi les processus de transformation auxquels sont soumises les particules, deux d'entre eux méritent particulièrement de retenir notre attention : la coagulation et la condensation.

Les particules dispersées sont formées à l'état aéroporté à partir de solide / liquide sous l'effet de la division, de l'effondrement, de l'écoulement et des vibrations. Les particules Solide dispersé peuvent être celles de forme irrégulière ou celles formées par des particules coagulées qui sont formées [10]. Mais aussi les aérosols qui sont directement émis sous forme solide, qui contiennent des particules métalliques et du carbone élémentaire dit carbone suie. C'est le cas de débris de pneu, des poussières de charbon, des poussières émises par les incinérateurs de déchets cet aérosol est plus grossier [2].

Condensation des gaz sur les particules

L'augmentation de la taille des particules par condensation est le mécanisme le plus important pouvant se produire entre les gaz et les particules dans l'atmosphère. Ce processus nécessite une phase vapeur sursaturée en présence de particules jouant le rôle de noyaux de condensation. Cependant les condensations de gaz qui s'en suivent sur ces particules nouvellement formées, conduisent à des phénomènes de transformation, à savoir des changements au niveau de leur composition et de leur taille [2].

Coagulation

Du fait du mouvement brownien, les particules migrent en permanence dans l'atmosphère et peuvent entrer en collision avec d'autres particules. Un certain nombre de ces collisions conduit à un agglomérat aboutissant à la formation de particules de taille plus grande. La vitesse de la coagulation dépend de la concentration des particules, leurs compositions, de la vitesse de leurs mouvements et de la surface spécifique de chaque particule.

Le phénomène de coagulation est le plus efficace dans le domaine des plus petites particules (noyaux d'Aitken) et semble être le facteur principal pour définir la limite inférieure de la taille des particules : les particules les plus petites subissent le phénomène de coagulation si rapidement, qu'elles sont éliminées pour donner naissance à des particules plus grandes [2].

2.7. Propriétés mécaniques des particules

Les propriétés mécaniques des particules sont présentées dans ce qui suit.

2.7.1. La vitesse de sédimentation

La vitesse de sédimentation ou vitesse de chute, sous l'action de la gravité des particules en suspension dans un gaz. La particule soumise à son poids et à la poussée d'Archimède atteint rapidement une vitesse verticale qui est appelée la vitesse de sédimentation. Cette vitesse dépend du rayon R au carré et elle est proportionnelle à ρ . En général on ne connaît pas la densité des particules ni leurs formes. On suppose que la particule est sphérique et on pose : $R_a = R\sqrt{\rho}$ (3).

R_a : Rayon aérodynamique [1].

2.7.2. La diffusion brownienne

C'est le mouvement des particules qui résulte du bombardement par les atomes et molécules de gaz. Le tableau donne le déplacement moyen en une seconde projeté sur un axe. Ce déplacement devient important lorsque le rayon aérodynamique de la particule devient inférieur à 0.1 μm . En raison de cette agitation brownienne, les particules vont se déposer sur les parois, les particules les plus petites sont arrêtées de façon efficace en raison de cette agitation et elles sont d'autant plus collectées qu'elles sont petites [1].

Tableau 1 Valeurs comparées en cm/ mn du déplacement dans l'air, dans les conditions normales de température et de pression, de particules sphériques dont la densité est égale à 1, en raison de l'agitation brownienne et la vitesse de sédimentation (d'après Fuch) [1].

Rayon des particules (μm)	0.001	0.01	0.05	0.1	0.5	1	5	10
Agitation Brownienne (cm/ mn)	7.68	0.786	0.177	0.10 1	3.54* 10^{-2}	2.41* 10^{-2}	1.04* 10^{-2}	0.73* 10^{-2}
Sédimentation (cm/mn)	0.78* 10^{-4}	0.82* 10^{-3}	5.18* 10^{-3}	0.01 3	0.208	0.77	18.2	72.6

Conséquences des propriétés mécaniques sur le dépôt dans l'appareil respiratoire

Le poumon peut être schématisé comme formé de cylindres de plus en plus nombreux lorsqu'on s'enfonce dans l'appareil respiratoire. Les particules les plus grosses, supérieures à 10 μm , ont une très grande inertie en raison de leurs masses. Lorsqu'il y a une déformation des filets d'air dans un écoulement en raison de l'air, continuant leur mouvement dans la direction initiale. Elles vont se collecter sur les parois par ce phénomène d'inertie. C'est ainsi que les grosses particules sont arrêtées par le nez. Les plus fines particules sont arrêtées par diffusion brownienne, en particulier dans le poumon [1].

2.7.3. Propriétés optiques

L'interaction du rayonnement électromagnétique, (le rayonnement solaire par exemple) avec les particules d'aérosols joue un rôle important dans le fonctionnement du climat. On appelle propriétés optiques des aérosols, la capacité des particules d'aérosols à interagir avec la lumière. Lorsqu'un rayon lumineux rencontre un aérosol, la lumière est déviée dans de multiples directions: c'est la diffusion. Quand une partie du rayonnement est dissipée sous forme de chaleur c'est l'absorption. La somme de l'absorption et de la diffusion est appelée extinction.

Les particules d'aérosol ont la propriété de diffuser la lumière. Cette diffusion résulte de l'interaction de l'onde électromagnétique avec les charges positives et négatives contenus dans la particule. Lorsque la dimension de la particule est petite par rapport à la longueur d'onde du rayonnement, la diffusion est dite de Rayleigh et l'énergie totale rayonnée est proportionnelle à $\frac{R^6}{\lambda^4}$

(4)

R : le rayon des particules supposé sphérique.

λ : la longueur d'onde.

Lorsque la dimension de la particule devient comparable à la longueur d'onde ou plus grande, le phénomène de diffusion devient théoriquement plus complexe. La quantité de lumière diffusée ne varie pas aussi fortement avec la dimension de la particule, elle devient proportionnelle au R^2 [1].

Chapitre 03

Effets des particules atmosphériques et réglementation sur la qualité de l'air

Chapitre 3 : Effets des particules atmosphériques et réglementation sur la qualité de l'air

La pollution de l'air par les particules (PM) est devenue un grave problème environnemental dans le monde et pose de grands risques pour la santé humaine, toutefois, elle peut présenter des effets positifs. Les conséquences de la pollution atmosphérique sont de deux sortes. Impacte sanitaire et environnemental, troubles de la santé humaines principalement mais aussi la dégradation des sols, des eaux ou de la végétation. Impacte climatique, influençant le système climatique Les fortes concentrations d'aérosols jouent un rôle important, rôle crucial dans la visibilité décroissante. De nombreuses études ont indiqué que la pollution par les aérosols est principalement affectée par les phénomènes météorologiques. Conditions combinées avec des émissions anthropiques. Cependant, ce qui est facilement oublié est une forte concentration d'aérosols a également d'importants effets en retour sur les facteurs météorologiques, ce qui peut avoir une incidence supplémentaire sur les conditions planétaires climatique et aggraver la pollution atmosphérique [26].

On reconnaît aux particules également quelques effets positifs.

En raison des impacts sur la santé, on développe des stratégies de contrôle de la pollution (Alerte, surveillance) et des législations de contrôle de celle-ci. Par application et respect des normes, on peut limiter la pollution. Afin de connaître la pollution globale de l'atmosphère il est nécessaire d'établir, au préalable un bilan des émissions naturelles et des émissions dues aux activités humaines [2].

3.1. Effets négatifs

Dans ce qui suit, nous présentons les effets négatifs des particules dans l'air.

3.1.1. Effets des particules sur la santé humaine

Pour comprendre les effets néfastes des matières particulaires sur la santé humaine, il est utile d'examiner les aspects suivants :

3.1.1.1. Le cheminement des particules dans l'appareil respiratoire

L'inhalation est la principale voie d'exposition de l'être humain aux particules en suspension. L'action nocive des matières particulaires en suspension dans l'air s'exerce ainsi principalement, si ce n'est exclusivement, par les voies respiratoires. Il faut rappeler ici qu'une personne respire chaque jour 15 m³ d'air et que la zone des échanges gazeux de l'appareil respiratoire constitue une interface de 70 m² environ entre le milieu extérieur et l'organisme. La profondeur de pénétration et les mécanismes de déposition des particules dans l'appareil respiratoire dépendent d'abord de leur

granulométrie et de la morphologie des voies aériennes qui conditionne les modalités de l'écoulement aérien. Ainsi, les particules de diamètre aérodynamique supérieur à 10 μm sont retenues au niveau des voies aériennes supérieures. Leur rétention se fait par deux mécanismes principaux : La filtration interception et l'impaction au niveau du nez, de la gorge et des voies aériennes supérieures. Les particules de diamètre compris entre 2,5 et 10 μm se déposent au niveau de l'arbre trachéobronchite par impaction. Dans cette zone, les particules peuvent être éliminées par clearance mucociliaire et la toux. Les particules de diamètre aérodynamique moyen inférieur à 2,5 μm (particules alvéolaires) pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire jusqu'aux sacs alvéolaires, où, elles se déposent par diffusion. En ce point, la vitesse de l'air est très faible. Au niveau alvéolaire, les particules déposées peuvent être phagocytées par les macrophages et selon leur solubilité, certaines seront retenues alors que d'autres sont véhiculées vers les lymphatiques bronchiques, d'où, elles pourront diffuser par voie hématogène dans tous les organes [27]. La figure 8 résume le cheminement des PM-i selon leurs tailles.

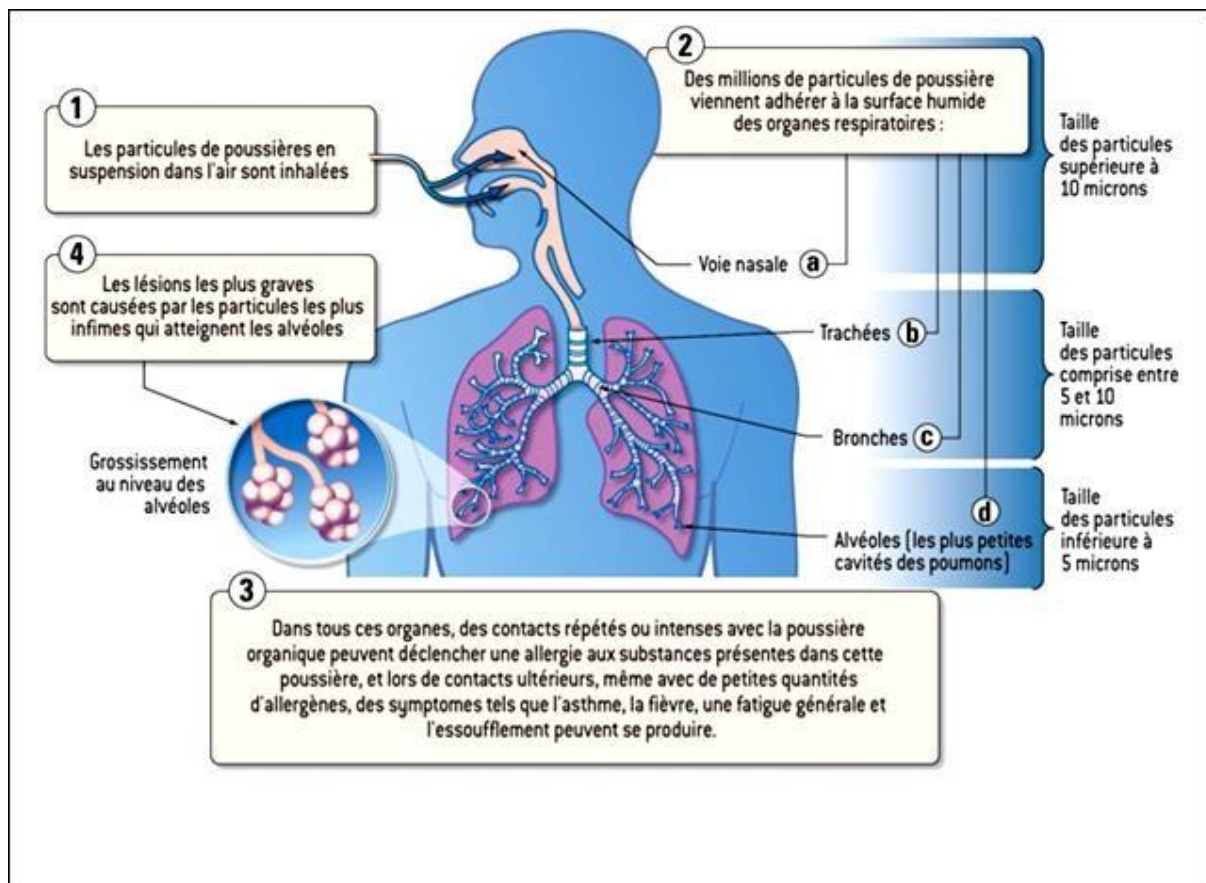


Fig. 8 Effet des particules sur le système respiratoire.

Il a été prouvé que les PM-2,5 sont les déclencheurs de diverses maladies, telles que la bronchite, l'asthme, le diabète, la maladie pulmonaire obstructive chronique (MPOC) et les maladies cardiovasculaires. Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé les PM issues

de la pollution de l'air extérieur et de celles-ci comme cancérigènes pour l'homme. La fonction exposition-réponse (IER) intégrée a été développée pour l'étude mondiale sur la charge de morbidité en intégrant les informations relatives aux PM-2,5 et en produisant une prévision plus raisonnable des risques relatifs (RR). Il a été utilisé dans un certain nombre d'estimations récentes de la mortalité attribuées à l'exposition aux PM-2,5. À ce jour, il a été considéré qu'une exposition à long terme aux PM-2,5 induisait une mortalité prématurée due à la MPOC, aux accidents cérébrovasculaires, aux cardiopathies ischémiques, au cancer du poumon et aux infections aiguës des voies respiratoires inférieures. La mortalité prématurée due à la pollution atmosphérique en Chine a été largement rapportée dans des études antérieures. Ces derniers ont estimé que la pollution de l'air extérieur en Chine avait causé environ 1,36 million de décès prématurés en 2010. Et ils ont rapporté qu'en Chine 1,25 million de décès prématurés chez les adultes étaient liés aux PM-2,5 en 2013. D'autres études antérieures ont estimé que les PM-2,5 étaient à l'origine de 1,1 million de décès prématurés grâce à une étude de la charge de morbidité mondiale réalisée en 25 ans sur la Chine en 2015.

Selon le rapport de l'OMS de 2016 sur l'évaluation globale de l'exposition et le fardeau de la maladie en Algérie, le taux de décès prématurés causés par les PM-2,5 en Algérie font environ 11400 morts / an [43].

Les particules provenant du trafic ont un fort potentiel d'oxydation, peut-être en raison des métaux provenant du moteur et l'abrasion des freins. Certaines études, mais pas toutes, l'ont démontré à mesure que la densité du trafic augmente, la capacité des particules en bordure de route de produire des espèces réactives de l'oxygène nocives pour les tissus augmente [44].

Les effets sur la santé sont dus, non seulement à la finesse des particules, mais aussi à la nature des composés chimiques que véhiculent les particules. C'est ainsi par exemple que les PM-1 issues des moteurs Diesel (particules Diesel) et qui adsorbent les HAP cancérigènes sont plus nocives que les PM-1 des cimenteries.

3.1.1.2. Effets sur la grossesse

Une association entre naissances prématurées et poids à la naissance des nouveau-nés nés à terme et les concentrations d'exposition aux polluants de l'air ambiant pendant la grossesse, en particulier aux PM-10, a été rapportée dans quelques études épidémiologiques antérieures. En effet, une exposition aux PM-10 > 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant la grossesse pourrait être associée aux naissances prématurées. Les naissances prématurées représentaient 4,6 % des naissances en 2010 et ont augmenté à 4,9 % en 2013. Une augmentation de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentration en PM-10 pendant la grossesse était associée à une diminution de 1Kg du poids à la naissance chez les nourrissons nés à terme.

Dans les régions métropolitaines, les naissances prématurées étaient plus fréquentes chez les personnes exposées au quartile le plus élevé de PM-10 que chez celles exposées à des concentrations inférieures de PM-10 (5,4 % contre 4,6 %), et le rapport de risque était statistiquement significatif. Cependant, il n'y avait pas de différence entre les groupes dans les régions non métropolitaines. Par contre, l'association entre naissances prématurées et exposition moyenne aux PM-10 > 70 µg/m³ étaient statistiquement significatifs, quelle que soit la région [28].

Dans une autre étude européenne récente multicentrique, il a été montré que l'exposition prénatale aux PM-2,5 et la diminution du poids des nouveau-nés sont plus apparentes chez les garçons que chez les filles, mais les différences ne sont pas statistiquement significatives [29].

3.1.2. Effet sur les animaux

L'intoxication se traduit par l'introduction dans l'organisme animal de certaines substances toxiques supportées par les particules et après une exposition plus au moins longues. L'arsenic, le plomb et le sélénium sont toxiques pour les animaux. Ils produisent certains symptômes au niveau du système nerveux, de l'appareil respiratoire et du tube digestif. Les poussières alcalines provenant des composés du calcaire traité dans les cimenteries peuvent provoquer des troubles chez les animaux par des lésions du tube digestif et des modifications du pH. Les particules riches en composés fluorés entraînent la maladie des os (la fluorose) [30].

3.1.3. Effets sur les végétaux

Les végétaux sont exposés de façon durable à la pollution atmosphérique : ils sont utilisés comme « bio-indicateurs » (par exemple : lichens) dans certaines recherches. Ils peuvent être l'objet d'atteintes :

- aiguës: telles que des écorces.
- chroniques : telles que des troubles de croissance.

A part les forêts, la pollution de l'air touche aussi les céréales et les plantes agricoles, comme les pois, les épinards et le trèfle. Certaines espèces d'arbres fruitiers sont également très sensibles c'est le cas des abricotiers.

Les végétaux sont exposés à la fois à l'action des polluants en suspension dans l'atmosphère, aux retombées sèches de poussières, de métaux et aux dépôts acides. Ils sont atteints : directement par le feuillage et indirectement par l'intermédiaire du sol (lessivage d'éléments nutritifs). L'augmentation de l'acidité des sols peut entraîner des lésions aux racelles des arbres et se répercuter sur l'activité des micro-organismes (bactéries de l'azote). Les plantes ont besoin de

composés métalliques à base de cuivre, fer, zinc. en tant qu'oligo-éléments mais une accumulation de ces métaux équivaut à un empoisonnement [31]. On observe qu'à proximité des cimenteries, il y a forte dégradation des végétaux par obstruction des stomates des feuilles, ce qui freine les échanges gazeux avec l'atmosphère.

3.1.4. Effet sur les milieux océaniques

Transport à grande distance d'aérosols atmosphériques provenant de continents est récemment devenu un domaine de recherche actif. Les compositions chimiques des aérosols atmosphériques dans le milieu marin couche limite (MBL) contribue de manière significative aux effets du climat. Il a été démontré que la poussière tempête, combustion de la biomasse, combustion du charbon et des gaz d'échappement des navires dans les ports côtiers sont des contributeurs clés d'aérosols dans l'atmosphère marine, et les particules d'origine terrestres contenant du carbone, de l'azote et d'autres nutriments. Les dépôts de ces particules dans les zones océaniques affectent leur circulation et perturbera la biogénétique de l'océan en augmentation de la disponibilité des éléments nutritifs. En outre, les dépôts de substances toxiques aérosols anthropiques, tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les métaux lourds peuvent nuire aux organismes marins [32].

3.1.5. Effets sur les matériaux :

Si l'humidité, la température, le rayonnement solaire et le processus de gel et de dégel ont une action directe sur la dégradation des matériaux (façades, toitures, peintures), plusieurs contaminants jouent un rôle non négligeable. Les contaminants atmosphériques peuvent endommager les biens matériels de diverses façons :

- Abrasion : les grosses particules solides peuvent avoir une action abrasive sur les matériaux lorsqu'elles sont emportées dans l'air à une grande vitesse.
- Attaque chimique : plusieurs contaminants peuvent réagir directement sur les matériaux et les détériorer (exemple du décapage de surfaces métalliques par des brouillards acides).
- Attaque chimique indirecte : certains matériaux absorbent les contaminants et sont endommagés lorsque ceux-ci subissent une transformation chimique. Le dioxyde de soufre absorbé par le cuir est transformé en acide sulfurique, lequel détériore le cuir.
- Corrosion électrochimique : la plupart des dommages aux matériaux ferreux sont causés par ce processus. La différence de potentiel entre des cellules positives ou négatives est la force qui régit l'action corrosive. Celle-ci est absente lorsque la surface est propre et sèche. Par contre, la corrosion surviendra lorsque la surface sera humide et contaminée, la conductivité électrique étant alors activée [33].

3.1.6. Effets sur le climat

Les aérosols modifient considérablement le bilan radiatif de l'atmosphère terrestre.

L'impact des aérosols sur le climat est de deux types :

Direct : c'est-à-dire par modification de l'albédo planétaire sous l'action de la diffusion et de l'absorption du rayonnement.

Indirect : c'est-à-dire par modification des propriétés de la couverture nuageuse.

Directs : Les aérosols de petite taille (inférieure au micron) ont la faculté de rétrodiffuser le rayonnement solaire incident et donc de refroidir la colonne d'air atmosphérique située au-dessous d'eux. C'est le cas des aérosols formés à partir des sulfates dont l'origine est l'oxydation du dioxyde de soufre. A l'inverse, les aérosols plus gros, comme ceux formés à partir du carbone-suie issu de la combustion des hydrocarbures ou des feux de forêts, ont un fort pouvoir d'absorption et ont donc pour effet de capturer l'énergie au profit d'une augmentation de l'effet de serre.

Indirect : Les aérosols ont un effet indirect sur le climat par les modifications qu'ils apportent aux nuages et au cycle de l'eau. Ces modifications sont directement liées aux facteurs de formation des noyaux de condensation des gouttes d'eau dans les nuages qui impliquent les aérosols. Les modifications résultent de deux types d'effets :

- Effets liés au rôle des aérosols en tant que noyaux de condensation dans les nuages. On a vu que la taille des aérosols joue un rôle déterminant pour cela et de plus, elle contribue à modifier l'albédo des nuages. Notamment, une forte présence d'aérosols entraîne un accroissement du pouvoir diffusant des nuages : plus un nuage paraît blanc (parce qu'il diffuse une grande partie de la lumière solaire) plus il contient d'aérosols.
- Effets se traduisant par l'allongement de la durée de vie des nuages jusqu'aux précipitations. Cette durée de vie est d'autant plus longue que la taille des aérosols est petite [34].

3.1.7. Effet sur la visibilité

La visibilité est la qualité de l'atmosphère qui permet de voir à une plus ou moins grande distance, mais aussi de voir plus ou moins bien des objets proches et d'en apprécier les détails de couleur ou de texture. La visibilité est considérée comme un élément de bien-être. La pollution atmosphérique réduit la visibilité par absorption et par diffraction de la lumière, ce qui peut provoquer des accidents routiers et aériens.

L'absorption est principalement le fait des particules de carbone élémentaire émises notamment par les moteurs diesels, et de gaz tels que le dioxyde d'azote qui donne à l'atmosphère une couleur brune. La diffraction, qui est le fait des particules fines (PM-2,5), est fonction de la taille des particules ; elle est aussi donc en relation avec l'humidité de l'atmosphère, la composition chimique

des particules et leur processus de formation. Les sulfates et nitrates, composantes importantes des particules PM-2,5 dispersent très efficacement la lumière et contribuent fortement à la réduction de la visibilité [35].

3.1.8. Effet sur l'économie

On constate que la pollution atmosphérique affecte la santé physique des personnes d'âge moyen et âgées, affectant ainsi indirectement et négativement le coût de l'assurance maladie ainsi que les coûts médicaux. L'augmentation continue des coûts médicaux, y compris l'assurance maladie, est devenue un phénomène mondial. Maintenir une augmentation raisonnable des dépenses médicales et coordonner le développement de la santé publique avec l'économie sociale est devenu l'objectif commun de la plupart des pays.

Selon les données sur la santé publique du Ministère de la Santé (2016), les maladies respiratoires chez les Chinois d'âge moyen et les personnes âgées ont considérablement augmenté au cours des 10 dernières années [52]. Les coûts de l'assurance maladie reflètent la sensibilisation des aînés à l'assurance santé physique et mentale. En fait, un mécanisme inhérent d'association et de lien existe entre la pollution de l'air, l'état de santé des personnes et les frais médicaux. Le développement économique local est également lié directement aux dépenses d'assurance maladie des résidents locaux. Dans les zones développées, les populations disposent davantage de canaux pour recevoir des services médicaux de haute qualité, leurs propres conditions économiques peuvent soutenir la demande et les assurances sont solides [36].

Parmi les répercussions économiques on cite :

L'annulation de vols à cause de non visibilité causée par les tempêtes de sable, ce qui provoque des pertes énormes sur le domaine du transport et des activités humaines.

La pollution de l'eau après lessivage de ces polluants par les pluies, ce qui nécessite des types de traitement de ces eaux coûteux.

L'absorption du rayonnement solaire et le dépôt sur les surfaces des équipements de production d'énergie renouvelable (panneaux photovoltaïques et miroirs solaires), ce qui diminue leur rendement et induit des pertes économiques non négligeables.

L'affectent la balance radiative et participent dans le réchauffement climatique.

Le coût annuel de la pollution atmosphérique estimé par la Banque mondiale et l'Institute for HealthMetrics and Evaluation de l'Université de Washington, a été de 5110 Milliards de dollars en perte de bien-être, représentant 2,2% du PIB des pays de la région MENA [37].

3.2. Effets positifs

La dispersion et le transport du pollen sont influencés par de nombreux facteurs météorologiques (comme la température ou l'humidité relative), mais c'est le vent qui joue le rôle principal. Une fois en l'air, le pollen peut voyager sur des centaines de kilomètres avec une trajectoire très proche de celle du vent.

3.2.1. Fécondation des plantes ou Pollinisation par le vent (anémogamie)

La pollinisation est le transport du pollen (produit par les étamines) jusque sur le stigmate (qui prolonge l'ovaire). En effet, le pollen des graminées est confié au vent, on parle d'anémophilie (ou anémogamie). C'est une des stratégies de pollinisations les plus anciennes sur la terre, laissant à l'atmosphère le soin de transporter le pollen d'une fleur à l'autre. Ici, seule une petite partie du pollen produit rencontrera les stigmates à féconder, le reste sera perdu. On comprend alors que la quantité de pollen produit va être considérable. Les plantes anémophiles produisent une telle quantité de pollen que l'on peut apercevoir de véritables nuages polliniques (on parle de « pluies de soufre » pour les forêts de pin). Par exemple, un seul chaton mâle de bouleau produit environ 5,5 millions de grains de pollen [38].

Le grain de pollen est l'élément reproducteur mâle des plantes. Son transport de la fleur mâle à la fleur femelle se fait soit par les insectes (plantes entomophiles), soit par le vent (plantes anémophiles). Pour le pollen, la météo joue un rôle déterminant : elle intervient en effet dans le déclenchement de la pollinisation, dans la quantité de pollen produit et dans le transport des grains dans l'atmosphère.

3.2.2. Apparition de nouvelles plantes

Le transport des semences par le vent peut atteindre des distances importantes, ce qui explique la présence de quelques espèces sahariennes au niveau des pays méditerranéens.

3.2.3. Formation de nuages (nucléation)

Le processus de nucléation par lequel la sursaturation active une fraction de l'aérosol atmosphérique pour former des gouttelettes de neige constitue le lien critique entre nuage et aérosol. Si la vitesse d'ascendance est élevée ou les aérosols sont peu nombreux, de fortes sursaturations sont atteintes et la plupart des aérosols sont activés. A l'inverse, en présence de faibles vitesses d'ascendance ou d'aérosols en grand nombre, la sursaturation reste faible et seule une fraction des aérosols est activée [39]. Cet effet des aérosols est bénéfique en favorisant les précipitations et joue un grand rôle contre le réchauffement planétaire.

La capacité d'une particule à absorber de l'eau (hygroscopicité) et se développer éventuellement en une gouttelette de nuage noyaux est principalement régie par la taille initiale des particules sèches, sa composition chimique et humidité relative [16].

3.3. Réglementation sur la qualité de l'air

Ces effets néfastes pour l'homme et l'environnement ont motivé la mise en place d'un certain nombre de résolutions et de dispositifs législatifs aux échelles mondiale et européenne, tels que la convention internationale de Genève de 1979 sur la pollution transfrontalière et les directives européennes, visant à lutter activement contre la pollution atmosphérique. Ces dispositifs imposent des actions de surveillance et de prévision des concentrations des polluants, et définissent des politiques de contrôle et de réduction des émissions.

Il existe différentes recommandations et réglementations et systèmes de prévisions concernant la qualité de l'air dans le monde. Dans cette partie nous étudierons trois niveaux, le niveau mondial avec les lignes directrices de l'OMS, le niveau européen et le niveau national qui est dans notre cas en Algérie.

Contrairement aux normes algériennes traitant des particules fines sans leur donner une définition, les normes européennes portent sur les particules PM-10 et PM-2,5.

3.3.1. En Algérie

Pour contrôler la pollution générée par les rejets gazeux, préserver la santé des populations et protéger l'environnement, l'état algérien a mis au point des lois et des décrets qui spécifient des valeurs de concentration (ou des facteurs d'émission) de polluants à respecter dans le milieu tant en pollution moyenne qu'en pointe.

Selon les caractéristiques physiques et chimiques des particules concernées. Les seuils d'alerte sont fixés, le cas échéant, par arrêté conjoint du ministre chargé de l'environnement et du ministre concerné par l'activité engendrant le type de particule considérée.

Art. 9. — Lorsque les seuils d'information et les seuils d'alerte fixés sont atteints ou risquent de l'être, le ou les walis concernés prennent toutes les mesures visant à protéger la santé humaine et l'environnement ainsi que les mesures de réduction et/ou de restriction des activités polluantes.

Pour les particules fines en suspension Les valeurs limites ainsi que les objectifs de qualité de l'air sont fixés comme suit

Art. 6. Valeurs limites ainsi que les objectifs de qualité de l'air sont fixés comme suit :

Particules fines en suspension :

Objectif de qualité : $50 \mu\text{g} / \text{Nm}^3$.

Valeur limite : $80 \mu\text{g} / \text{Nm}^3$.

En général, la réglementation fixe divers seuils avec un objectif bien déterminé.

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

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

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

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

Contrairement aux normes algériennes traitant des particules fines sans leur donner une définition, les normes européennes portent sur les particules PM-10 et PM-2,5 [51].

3.3.2. A l'échelle européenne

Les institutions votent des directives fixant des seuils réglementaires concernant les concentrations de polluants. Les directives européennes sont des indications à respecter. La directive 2001/81/CE est par exemple une directive sur les plafonds d'émissions nationaux. La directive 2008/50/CE a pour objectif de fixer les méthodes de mesure des polluants, de fixer les seuils de concentrations à ne pas dépasser ou encore de permettre la mise en place de mesures exceptionnelles pour lutter contre un pic de pollution. Le tableau 2 et 3 donne les seuils réglementaires européens pour les concentrations de particules fines PM-10 et PM-2,5 respectivement. A la fin de l'année, chaque pays doit prouver que les seuils fixés n'ont pas été dépassés sur son territoire. Si ce n'est pas le cas, l'État concerné doit payer une amende pour chaque dépassement, sauf s'il arrive à prouver que le pic a été provoqué au moins en partie à cause d'un transport transfrontalier ou par un phénomène naturel. Fin 2013, 17 États membres faisaient

l'objet de procédures d'infraction pour non-respect des valeurs limites applicables aux PM-10. En 2013, l'Union Européenne a lancé le programme "Air pur pour l'Europe". Ce programme vise à améliorer la qualité de l'air en Europe en agissant à plusieurs niveaux [45].

a) Particules « PM-10 »

Tableau 2 Réglementation concernant les PM-10 en Europe.

Objectif de qualité pour la protection de la santé	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Moyenne annuelle civile
Valeurs limites pour la protection de la santé humaines	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Moyenne annuelle civile
	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Moyenne journalière à ne pas dépasser plus de trente-cinq fois par année civile
Seuil de formation et de recommandation	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Moyenne journalière
Seuil d'alerte (fixé par la France)	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Moyenne journalière

b) Particules « PM-2,5 »

Tableau 3 Réglementation concernant les PM-2,5 en Europe.

Objectif de qualité pour la protection de la santé humaine	10 µg/m ³	Moyenne annuelle civile
Valeurs limite pour la protection de la santé humaine	20 µg/m ³	Moyenne annuelle civile
Seuil de formation et de recommandation	25 µg/m ³ , à partir du 1 ^{er} Janvier 2015	Moyenne annuelle civile

3.3.3. Au niveau mondial

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a publié des lignes directrices qui doivent permettre de protéger la santé publique partout dans le monde. Ces documents se basent sur une grande quantité de données scientifiques. L'OMS préconise ainsi des niveaux de pollution à ne pas dépasser pour quatre polluants : l'ozone, le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote et les aérosols. Pour les aérosols par exemple, on trouve deux recommandations, une pour les PM-10 et l'autre pour les PM-2,5. Les valeurs sont données dans le tableau 4. Ces lignes directrices sont des valeurs indicatives à ne pas dépasser. Il existe également des valeurs intermédiaires pour chaque polluant permettant aux états d'avoir un objectif intermédiaire. L'OMS indique cependant que l'objectif final de la gestion de la qualité de l'air devrait tendre vers ces valeurs indicatives.

Tableau 4 Les directives de l’OMS.

Valeurs guides OMS pour les polluants classiques de la qualité de l'air extérieur		
Source : OMS, 1999 et 2005		
Polluant	Valeur guide ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Durée d'exposition
PM-10	50	24 heures
	20	1 an
PM-2,5	25	24 heures
	10	1 an

Le tableau 5 résume de la réglementation de la qualité de l’air.

Tableau 5 Réglementation de la qualité de l’air pour les PM-10 et les PM-2,5

	UE (Valeurs limites)	OMS (Valeurs guides)	Algérie (Valeurs limites)
PM-10	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 an)	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 an)	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 an)
	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h) à ne pas dépasser plus de 7 fois par an	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)	Limite 24h Non disponible
PM-2,5	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 an)	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (an) 25 $\mu\text{g}/\text{m}$ (24 h)	Non disponible

Partie 02

**Matériel et
Méthodes**

Ce chapitre présente les détails concernant la partie pratique de notre stage de fin d'étude qui s'est déroulé au sein de l'Equipe de Recherche Environnement et Changement Climatique affiliée à la division bioénergie et environnement du Centre de Développement de Energies Renouvelables à Bouzaréah, Alger.

1. Le réseau de surveillance de la qualité de l'air

1.1. Station atmosphérique « Nesma »

Le 30/04/2017 a connu la naissance du deuxième réseau de surveillance de la qualité de l'air à Alger, baptisé «NESMA», après «Sama Safia», cette station a été installée par le Centre de Développement et des Energies Renouvelables, au sein du Centre-Universitaire Mustapha Bacha (Alger-Centre) parmi ses principales missions :

- Mesure en continue des niveaux de pollution en particuliers les particules de carbone suie, les particules fines, l'ozone, les oxydes d'azote, le méthane, les hydrocarbures totaux, en plus des paramètres météorologiques dans un site urbains de la capitale.
- Détecter les pics de pollution et les périodes durant lesquelles les seuils limites sont dépassés.
- Alerter les autorités durant les situations critiques et informer la population des mesures à suivre pour minimiser l'impact sur la santé.
- La station d'analyse destinée à la surveillance de la qualité de l'air a pour but de fournir un bilan quantitatif et qualitatif de la pollution du site destiné.

1.2. Le site urbain d'Alger-centre

La commune d'Alger-Centre est située au nord de la wilaya d'Alger. Elle occupe une superficie de 3.7 Km², avec une population de 75 541 habitants (en 2008), soit une densité estimée à 20 416 hab/km² en 2008. Les données géographiques ainsi que la photo satellite relative au site (figures 09 et 10) sont obtenues grâce à Google Maps. Le site de mesure est situé à une latitude de 36,7724841 N et une longitude de 3,0551159 E.

L'hôpital Mustapha Pacha ou hospitalo-universitaire Moustapha Pacha d'Alger (CHUMA), fondé en 1854 dans la commune de Mustapha, devenue Sidi M'Hamed, est le plus grand hôpital d'Algérie. Le choix de ce site pour l'implantation de la station est du, entre autre, au fait qu'au niveau de ce CHU, il existe une station de mesure du réseau Samasafia relevant du Ministère de l'environnement et des énergies renouvelables (MEER) et qui n'est plus opérationnelle depuis plusieurs année

Le site de mesure se trouve à environ 600 m de la mer. Il est ouvert sur la mer et subit de ce fait également une bonne ventilation naturelle.

Les sources, proches ou lointaines, potentiellement émettrices des particules sont :

- Le trafic routier du grand carrefour de la Place du 1^{er} Mai avec ses routes fortement fréquentées (Vers Adis Abbéba en longeant l'hôpital, vers Belcourt, vers Alger).
- La gare ferroviaire d'Alger à 1,5 km.
- Le port d'Alger a 2 Km.
- L'aéroport d'Alger a 10 Km.
- La clairière de Beb El Oued a 5 km.

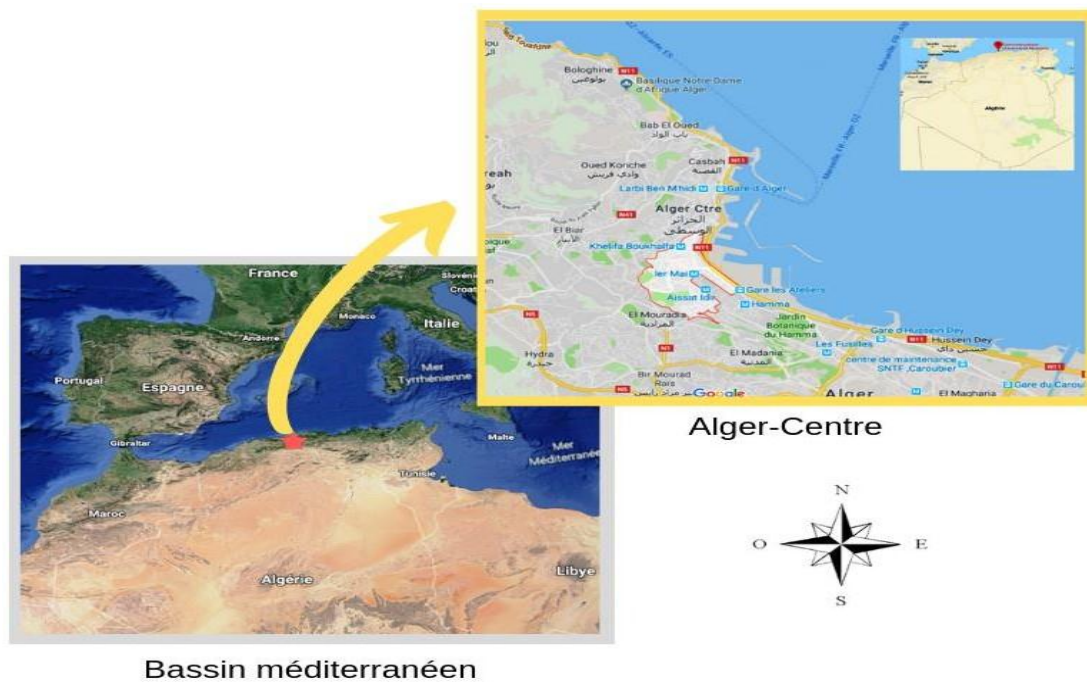


Fig. 9 Localisation du site de prélèvement.

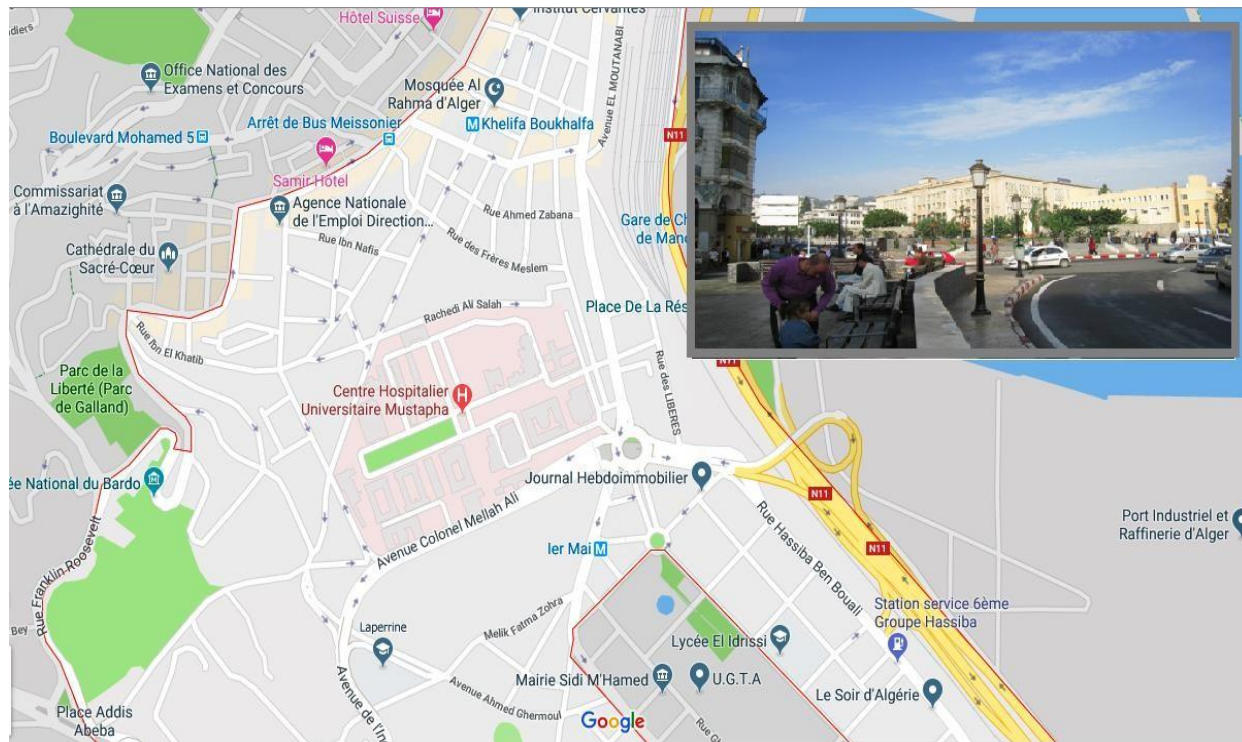


Fig. 10 Localisation de la station NESMA.

1.3. Méthode de prélèvement et d'analyse des PMi et description de l'analyseur

La station de mesure NESMA se compose d'une cabine contenant cinq analyseurs des polluants atmosphériques:

- Un analyseur de particules Fidas 200 (PM-1, PM-2,5, PM-4 ; PM-10, PMtot et nombre de particules par centimètre cube),
- Un analyseur de carbone suie (aéthalomètre AE33),
- Un analyseur d'ozone (APOA),
- Un analyseur de composés organiques volatils ou COVs (APHA),
- Un analyseur des oxydes d'azote ou NO_x(APNA).

La station est équipée aussi d'une station météorologique, des deux panneaux solaires photovoltaïques et deux stabilisateurs de courant et onduleurs pour la protection des appareils (Fig 11 et 12).



Fig. 11 atmosphérique NESMA.



Fig. 12 Les analyseurs de la station NESMA.

Pour les besoins de notre étude, nous avons travaillé avec l'analyseur de particules, le Fidas 200.

1.3.1. Présentation de l'appareil

L'analyseur utilisé, le Fidas 200 est un spectromètre optique pour aérosol, qui détermine la taille des particules via la lumière diffusée au niveau de la particule unique selon Lorenz-Mie. Il mesure en temps réel les fractions conventionnelles PM-10, PM-4, PM-2,5 et PM-1. Lorsque, l'instrument est mis sous tension avec le commutateur I / 0 situé à l'arrière de l'unité de contrôle Fidas,

l'instrument se met en marche. La procédure de mesure commence automatiquement. Toutes les données mesurées dans chacun des 256 canaux sont automatiquement enregistrées dans la mémoire interne [46].

Le FIDAS dispose de toutes les fonctionnalités nécessaires pour fonctionner automatiquement et transmettre les données à distance pour une utilisation sur les stations de mesure de polluants atmosphériques.

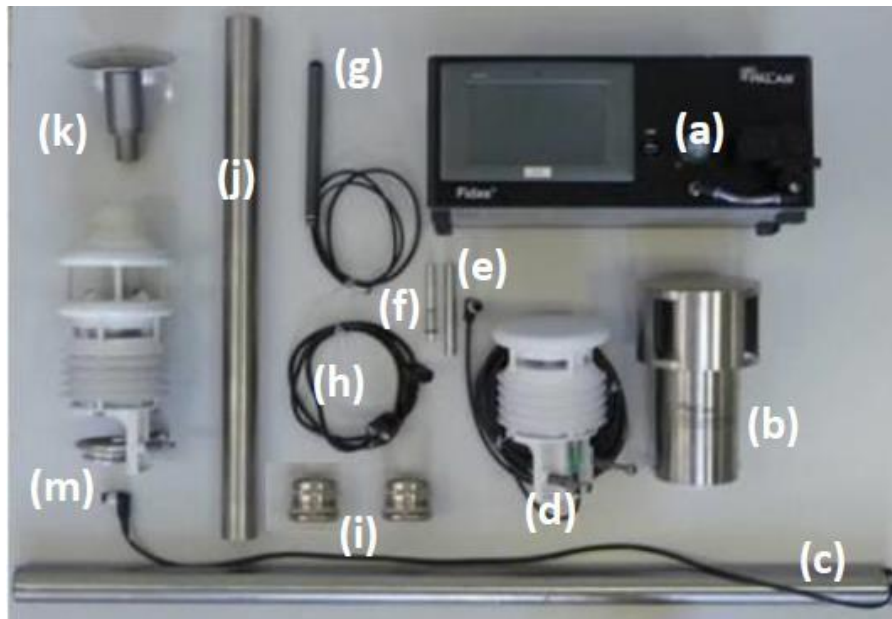


Fig. 13 Les composants d'un système Fidas®.

Les lettres entre parenthèses font référence aux indications de la figure 13.

- Unité de contrôle Fidas® (a).
- Tube d'entrée des aérosols (f).
- Câble d'alimentation (h).
- Station météo WS300-UMB (d) facultatif à la place aussi WS600-UMB (m).
- Tube d'échantillonnage avec IADS (c).
- Raccorder la tête d'échantillonnage au tube de prélèvement (e).
- Tête d'échantillonnage Sigma-2 (b) - option facultative, ainsi que tête d'échantillonnage PM-10 ou PM-2.5 (non certifiée) (k).
- 2x fixation du tube de prélèvement et du tube de la station météo sur le boîtier (i)
- Tube pour station météo (j).
- Antenne - optionnel et peut avoir une apparence différente (g).

- Boîtier de protection contre les intempéries IP-65.

Au démarrage de l'appareil, le menu principal apparaît (Figure 14).

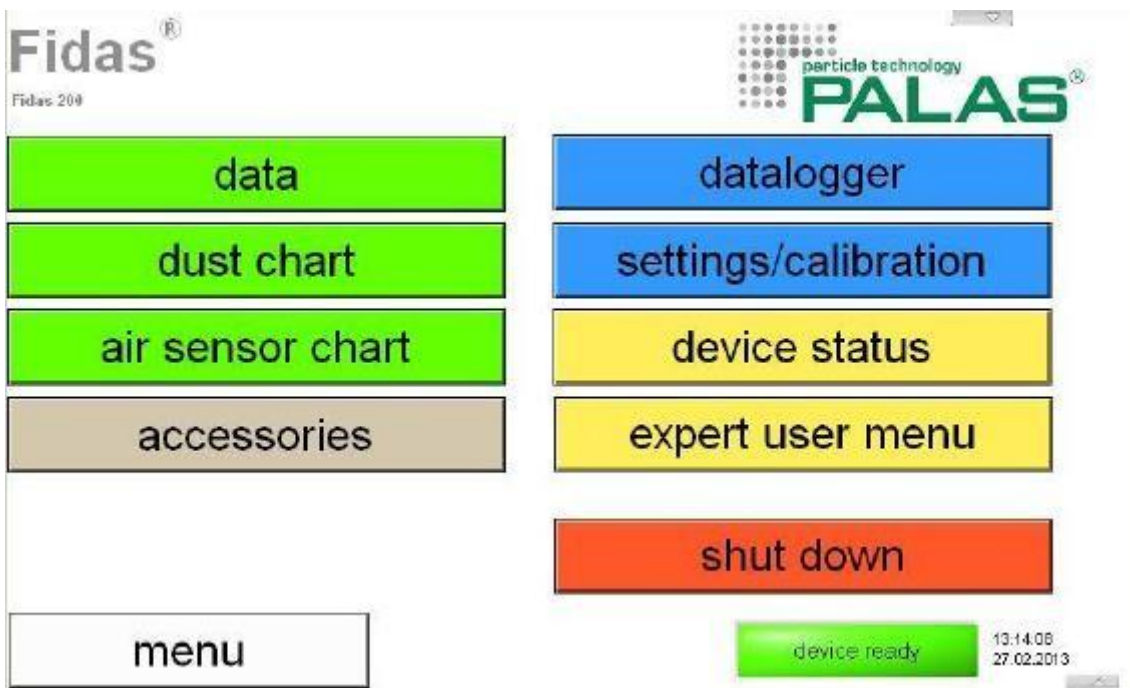


Fig. 14 Interface du menu principal.

Après avoir démarré le système d'exploitation Windows et le gestionnaire de démarrage Fidas®, on obtient l'écran avec les différentes fractions de particules, la concentration en nombre de particules et les conditions ambiantes (température, humidité relative et pression atmosphérique).

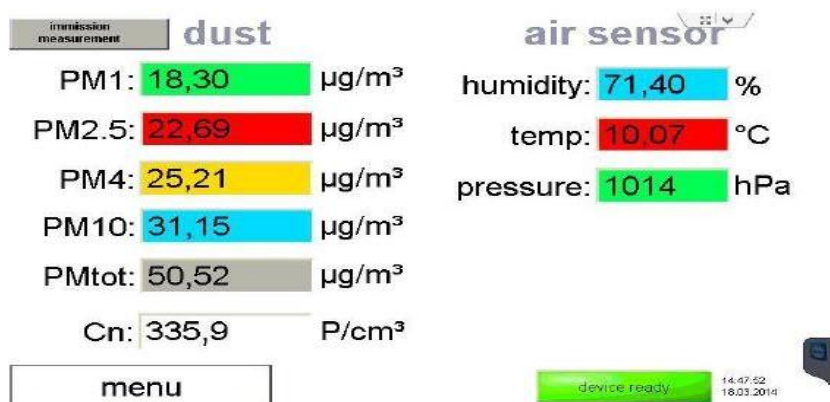


Fig. 15 Vue d'ensemble des données.

1.3.2. Principe de fonctionnement

Le spectromètre optique à aérosol FIDAS 200 est basé sur la détection de la lumière diffusée par les aérosols pour déterminer leurs tailles et leurs nombres par classe de taille en temps réel.

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.

Lorsque l'humidité ambiante est élevée, l'eau se condense sur les particules et fausse la taille des particules. Pour remédier à ce la, le constructeur a intégré un module de compensation d'humidité en aérosol IADS. L'échantillon passe dans une ligne de prélèvement chauffée IADS, qui permet de conditionner l'aérosol. 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. 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 postériori.

Après son conditionnement, le flux d'air pénètre la cellule de mesure. Ce flux d'air passe par le volume optique qui est éclairé de manière homogène avec une lumière polychromatique, dans lequel les aérosols de l'échantillon vont diffuser la lumière, avant de ressortir de la cellule de mesure. La détection de la lumière diffusée se fait entre 85 et 95° (indiqué à 90° par simplification) par un photomultiplicateur. La limite de détection inférieure pour les mesures d'émission a été réduite à 180 nm en utilisant une optique optimisée, une densité de lumière plus élevée en utilisant une nouvelle LED à lumière blanche comme source de lumière et une analyse de signal améliorée (convertisseur A / N logarithmique) (Figures 16 et 17).

La concentration en nombre est déduite du nombre d'impulsions lumineuses diffusées. L'amplitude (hauteur) de l'impulsion de lumière diffusée est une mesure du diamètre de la taille des particules. Le flux d'air passe ensuite par une cartouche filtrante protégeant la pompe de prélèvement. La tension d'alimentation de la pompe est régulée 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 ambiante 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.

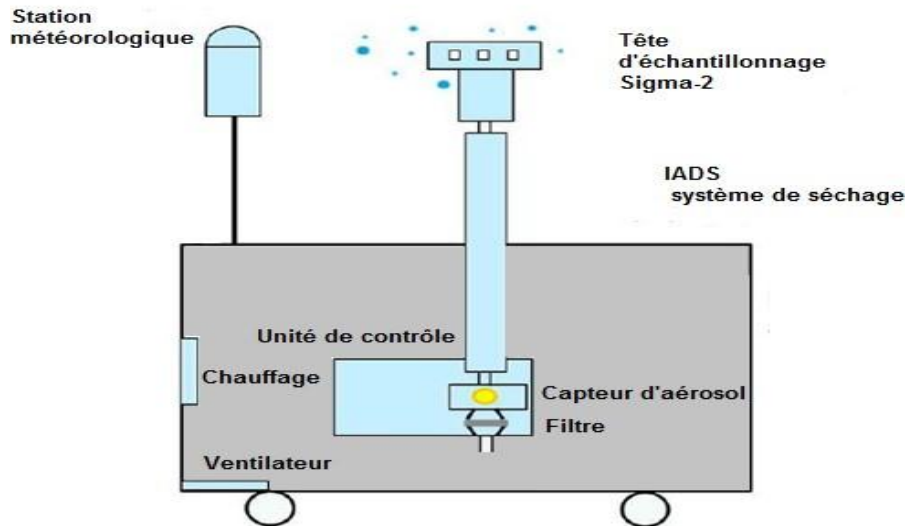


Fig. 16 d'installation du système de mesure Fidas® 200 S.

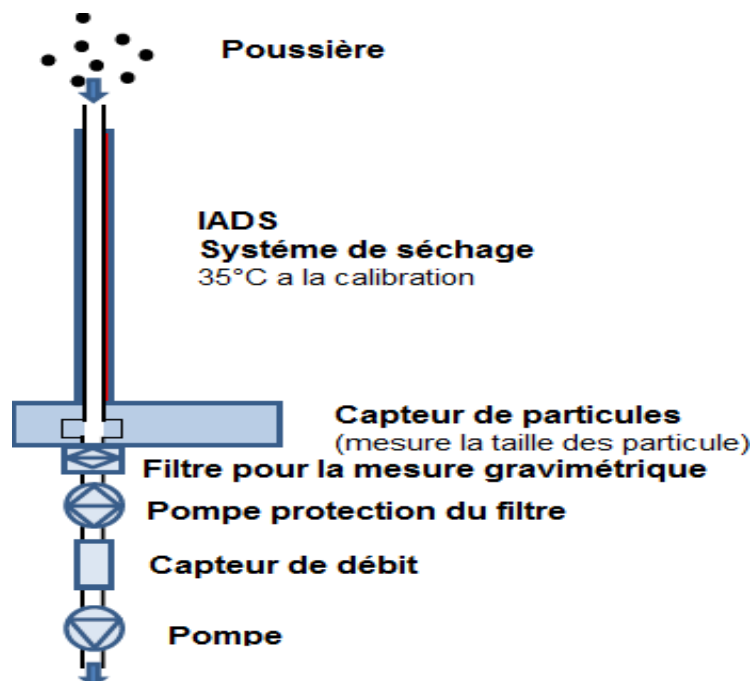


Fig. 17 Configuration schématique du système de mesure Fidas® 200 S.

1.3.3. Mécanisme de correction de zone de frontière

L'erreur de zone frontière peut être éliminée en utilisant l'ouverture en T brevetée et les mesures simultanées de la longueur du signal. L'erreur de zone frontière est caractérisée par l'éclairage partiel de particules au bord de la plage de mesure. Cet éclairage partiel implique que les particules sont classées en taille plus petite qu'elles ne le sont réellement. Par l'intermédiaire de l'ouverture en T, les particules ne traversant que le bras du T (longueur de signal plus courte) diffèrent de celles qui traversent la partie médiane du T (longueur de signal plus longue). Ces derniers sont complètement éclairés dans la partie supérieure. Par conséquent, aucune erreur de zone frontalière ne se produit lors de l'utilisation du logiciel Fidas®. La figure 18 illustre la cellule de mesure en forme de T.

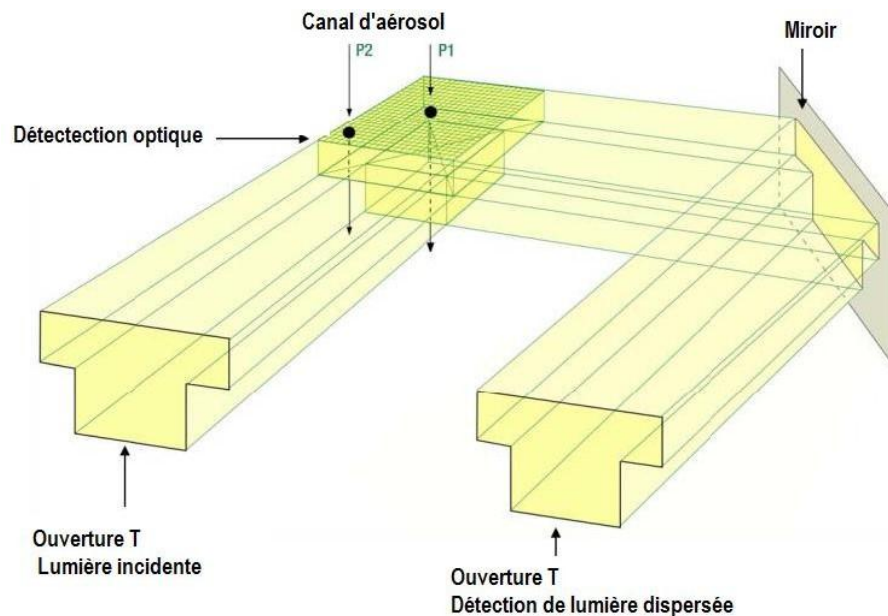


Fig. 18 Illustration de l'ouverture en T.

En utilisant une source de lumière polychromatique (LED) en combinaison avec une détection de lumière diffusée à 90°, illustré sur la (Fig 19), il est possible d'obtenir une courbe d'étalonnage précise sans ambiguïté dans la plage de Mie. Cela se traduit par une résolution de taille élevée.

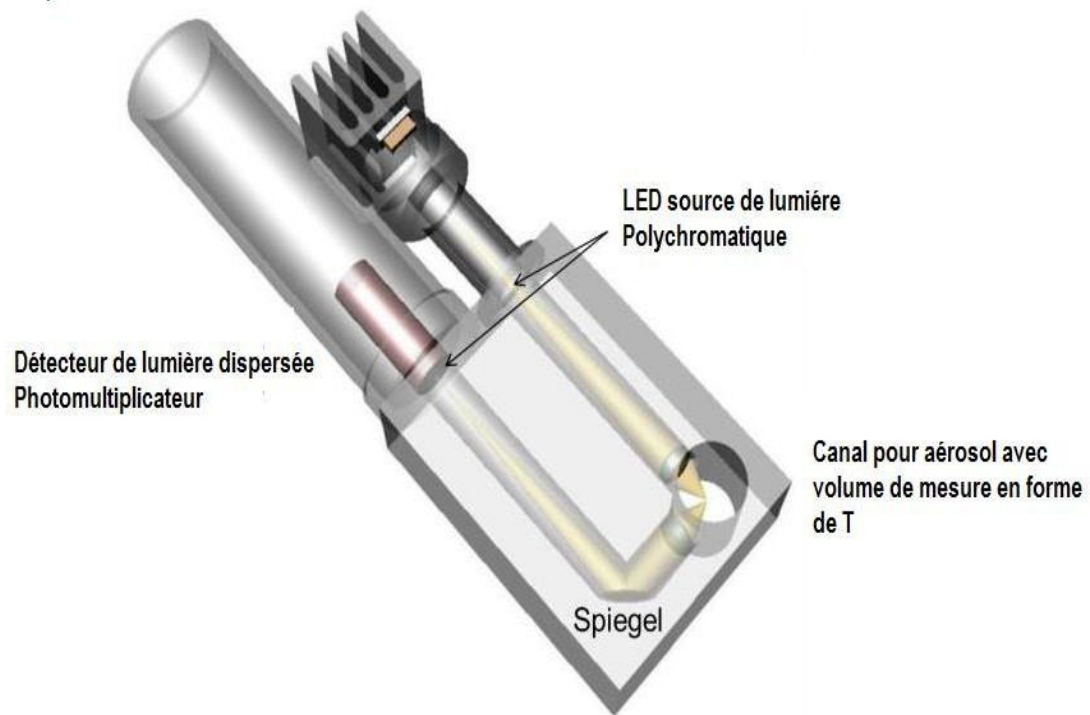


Fig. 19 Mise en place du capteur du système de mesure Fidas®.

1.4. Les étapes de détection des particules par le FIDAS 200

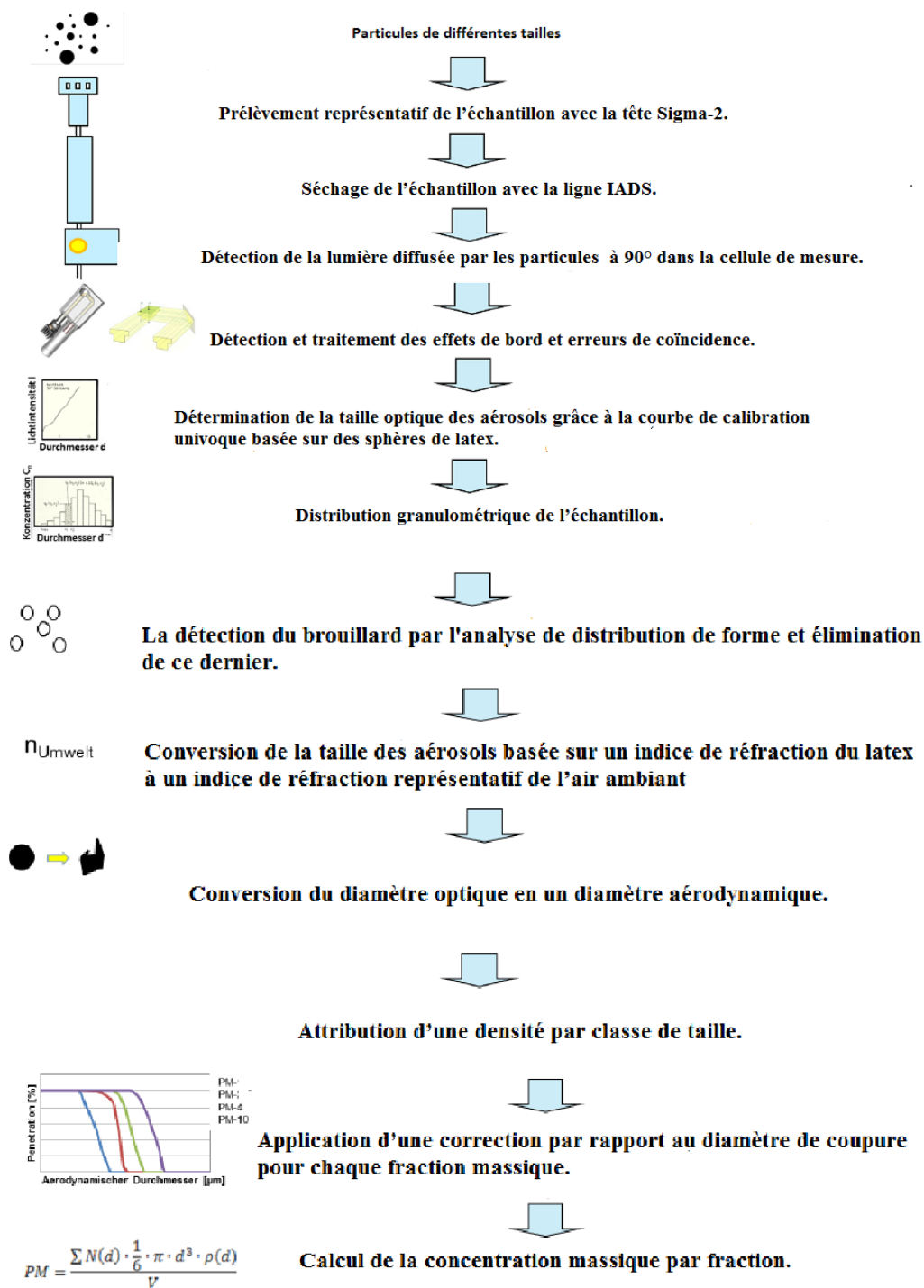


Fig. 20 Schéma d'installation du système de mesure Fidas® 200 S.

1.5. Caractéristiques et avantages de Fidas® 200

Le système Fidas® présente des caractéristiques suivantes grâce à l'utilisation de ces techniques :

- Courbe d'étalonnage non ambiguë (détection de la lumière polychromatique et de la lumière diffusée à 90°).

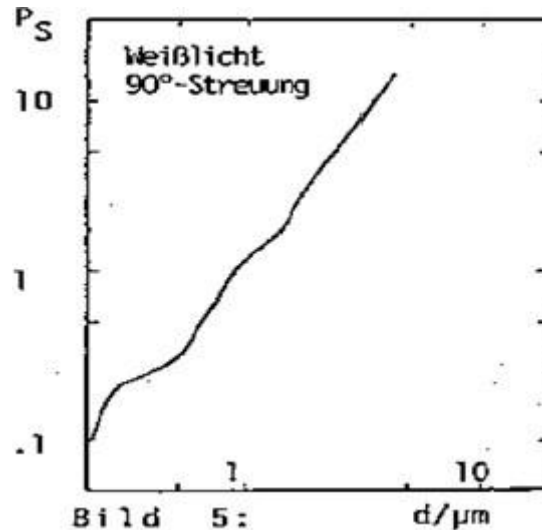


Fig. 21 Courbe d'étalonnage pour la détection de lumière diffusée à 90° avec une source de lumière polychromatique.

- Pas d'erreur de zone frontière (technologie brevetée d'ouverture T).
- Détection de coïncidence et correction de coïncidence (analyse numérique à particule unique).

Les avantages importants suivants peuvent être obtenus :

- Très bonne résolution de taille (nombre élevé de canaux de données brutes).
- Très bonne précision de classement de taille.
- Détermination exacte de la concentration [41].

1.3.4. Utilisation du logiciel PDAnalyze Software

Le logiciel **PDAnalyze Software** est un outil essentiel qui nous a aidés à traiter les résultats obtenus de l'appareil Fidas 200. Il est fourni avec les manuels de l'appareil, nous l'avons utilisé pour convertir les sauvegardes journalières en fichier .txt exploitable avec l'Excel. Le programme permet aussi de fournir des graphes de variations des PM_i et aussi les variations des données météorologiques obtenues de 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.

2. Modélisation

2.1. Model HYSPLIT de la 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(NOOA), est l'un des modèles les plus largement utilisés pour les calculs de Trajectoire atmosphérique 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, transformation chimique et simulations de dépôt. HYSPLIT continue d'être l'un des modèles de transport et de dispersion atmosphériques les plus largement utilisés dans le monde des sciences de l'atmosphère

L'une des applications les plus courantes du modèle est l'analyse de la rétro trajectoire arrière 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 de 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 m, 1 000 m, 1 500 m, 2 000 m et 2 500 m. Le modèle HYSPLIT calcule les trajectoires de la masse 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). Les entrées météorologiques sont traitées dans les jeux de données FNL pour le modèle de trajectoire, qui sont retraités à partir de la NOAA par Air Resource Laboratory (ARL) pour comprendre les origines des masses d'air indiquent également que divers programmes de préprocesseurs convertissent les données de sortie de la NOAA, le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF), de la cinquième génération du modèle NCAR / Penn State Mesoscale Model (MM5) et le Centre National de Recherche sur

l'Atmosphère (NCAR) et prévision de la recherche météorologique (WRF) dans un format bien adapté destiné à être intégré directement dans le modèle [47].

2.2. Les étapes d'obtention des rétro trajectoires avec HYSPLIT

On accède la page d'accueil du modèle HYSPLIT (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>)

- On choisit les trajectoires des scénarios antérieurs: «Calculer les trajectoires des archives».
- Puis on sélectionne le nombre de trajectoire des lieux de départ, dans notre cas 1 et on sélectionne « normale» comme type trajectoire ensuite on clique sur «Next».

- On sélectionne le "Modèle GFS (384h fcst, 3h à 192h puis 12h, global, pression)" pour la prévision et les données météorologiques GDAS (mondiales, 2006 à aujourd'hui) dans le menu déroulant.

- On choisit un point de départ de la trajectoire à l'aide d'un «Identificateur de code» ou de «Latitude et Longitude», le point de départ de la trajectoire doit correspondre à votre zone de prévision. « Codes Identifiants » sont généralement des codes d'aéroport.

The screenshot shows a web form titled "Source Location" with the instruction "(enter using one of the following methods):". At the top, there is a dropdown menu for "Meteorology:" set to "GDAS (1 degree, global, 2006-present)". Below this is a map of the United States with a blue pin over Phoenix. Underneath the map, there are four radio button options for location selection: "Decimal Degrees Latitude:" (selected), "DDD/MM/SS Latitude:", "City (Country or State: name: lat: lon):", and "Airport or WMO ID (i.e., dca):". The "Decimal Degrees Latitude:" option has input fields for "31.9521622" and "N" for latitude, and "106.875" and "W" for longitude. There are also fields for "DDD/MM/SS Latitude:" and "Airport or WMO ID (i.e., dca):" with an "ID Lookup" button. At the bottom, there are "Reset Form" and "Next>>" buttons.

- On sélectionne le "Cycle de prévision météorologique" la semaine qui où est situé le jour et l'heure qu'on veut étudier dans le menu déroulant.
- On choisit le jour et l'heure d'arrivée des masses d'air ainsi que la durée des rétro trajectoires en heurs et l'altitude.
- On sélectionne les «Paramètres de modèle par défaut et les options d'affichage»: «Direction de la trajectoire»: on sélectionne «Arrière».
- On attend jusqu'à l'obtention des résultats (cela prendra une minute ou deux pour traiter la trajectoire). Quand le modèle et les graphiques sont terminés, on clique sur le lien «GIF» situé en haut de la page pour avoir ce format ou pdf.
- Une fenêtre apparaîtra avec votre trajectoire. Pour enregistrer la capture sous forme de fichier « gif », cliquez avec le bouton droit de la souris sur l'image et on sélectionne "Enregistrer l'image sous". Ensuite, on peut naviguer dans la zone de l'ordinateur où enregistrer le fichier.
- Le résultat final sera une carte comme présenter sur la figure suivante.

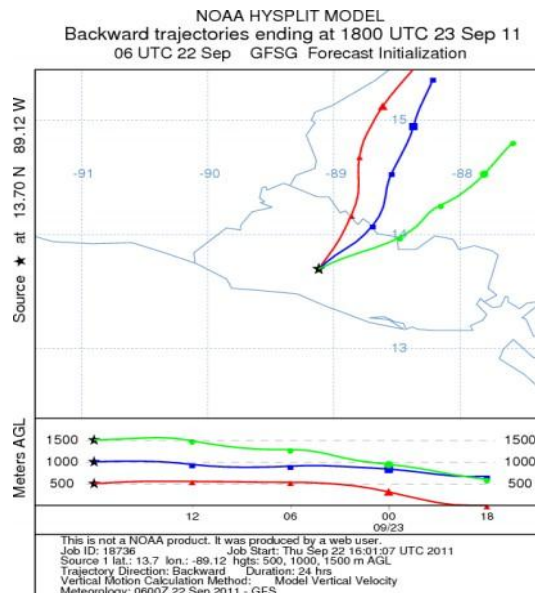


Fig. 22 Exemple d'une carte des retro trajectoire obtenus avec le modèle HYSPLIT.

2.3. Model Modis de la 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 (10h30 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 où le capteur n'a pas collecté de données [43].

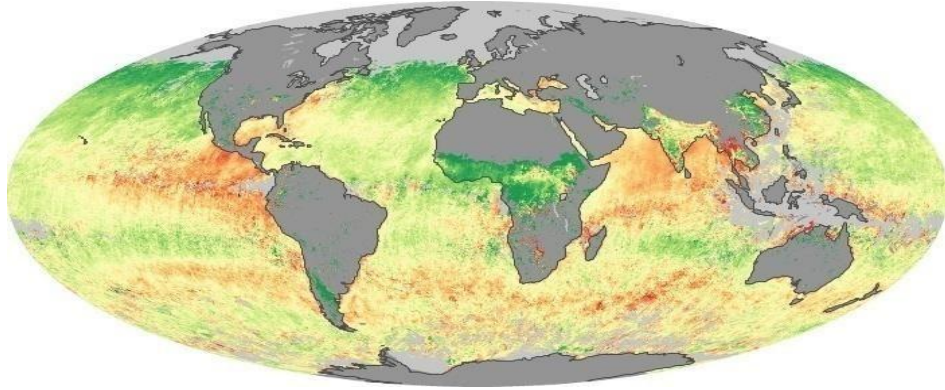


Fig. 23 Exemple d'une carte sources d'aérosols obtenus avec le modèle MODIS.

2.4. Cartes d'aérosol

Afin d'interpréter la variabilité journalière des PM, différentes cartes d'aérosols ont été analysées : cartes de concentrations de poussières BSC/DREAM (Barcelona Supercomputing Center-DustREgionalAtmospheric Model) et NRL-NAAPS (Naval ResearchLaboratory-NavyAerosolAnalysis and Prediction System). Les sites développés par BSC et NRL proposent quotidiennement des cartes de concentrations d'aérosols d'origine désertique.

Le modèle NRL-NAAPS réalise des simulations de poussière en temps quasi réel. Ses prévisions portent sur 120 heures. Les prévisions du modèle BSC-DREAM portent sur 72 heures.

Partie 04

Résultats et Discussion

1. Etude de l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines

Les résultats obtenus par le FIDAS 200 et leurs exploitation nous ont permis de suivre dans un premiers temps l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en particules, la corrélation entre les teneurs en particules et l'influence des conditions météorologiques et du parc automobile sur ces dernières.

L'évolution de la pollution de l'air par les particules (PM_i ; i = 1 ; 2,5 ; 4 ; 10) à Alger-centre a été effectuée durant une période allant du 1 Février au 20 Mai 2019, avec un prélèvement chaque minute, ce qui vaut à 68400 valeurs pour chaque classe de particules par jour pendant 4 mois. Chaque prélèvement journalier permet d'obtenir 5 classes granulométriques de particules et le nombre de particules ce qui permet de traiter des millions de données dans le présent travail.

1.1. Teneurs atmosphériques en particules

L'évolution des teneurs atmosphériques des particules PM-10 et leurs fractions est caractérisée par les paramètres statistiques, les concentrations moyennes journalières, les teneurs extrêmes ainsi que les écarts sont résumés dans le tableau 6.

Pour les PM-10, les concentrations varient de 10,35 à 50,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les PM-4 varient de 5,96 à 40,65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les PM-2,5 varient de 3,11 à 27,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les PM-1 quant à elles, varient avec des teneurs journalières allant de 2,28 à 23,71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tableau 6 Teneurs moyennes et extrêmes des PM-i, écart type ainsi que le rapport PM-i/PM-10 à Alger-centre en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

PM-i $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Moyenne	Maximum	Minimum	Ecart type	PMi/PM- 10
PM-1	7,94	23,71	2,28	4,38	0,28
PM- 2,5	10,63	27,78	3 ,11	4,93	0,37
PM-4	18 ,63	40,65	5,96	6,90	0,66
PM- 10	28,08	50,01	10,35	10,31	1
PM - totaux	40,02	77,03	13,96	15,35	

PM-totaux= Particules en suspension.

Les teneurs moyennes en PM-totaux, PM-10, PM-4, PM-2,5 et PM-1 s'élèvent respectivement à 40,02; 28,08 ; 18,63 ; 10,63 et 7,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les figures 24 à 27 illustrent l'évolution journalière des teneurs atmosphériques en PM-i ($i = 10 ; 4 ; 2,5$ et $1\mu\text{m}$) ainsi que les PM-totaux (l'ensemble des particules en suspension dans l'air) mesurées pendant les mois de février, mars, avril et mai 2019.

Un examen des figures permet de montrer qu'il existe une importante fluctuation des teneurs journalières en PM-i et ce, quel que soit la classe granulométrique étudiée (un écart type de 4,4 ; 5 ; 6,9 ; 10,3 ; 15,3 pour PM-1, PM-2,5 ; PM-4 ; PM-10, PM-tot respectivement) .

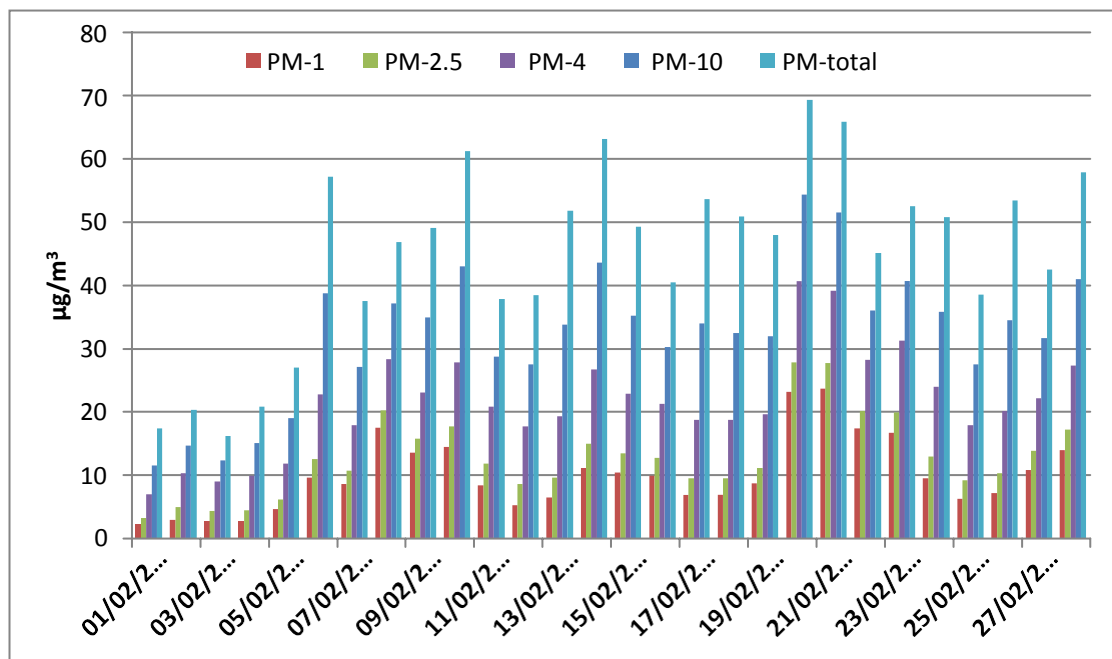


Fig. 24 Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées en mois de février.

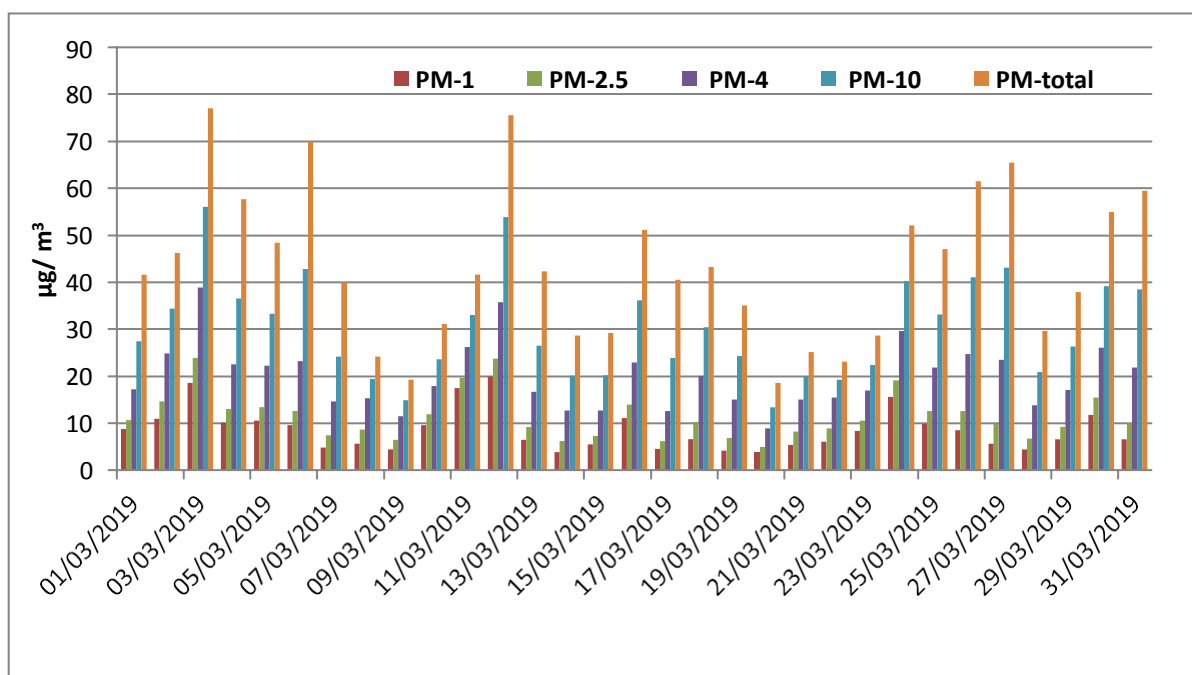


Fig. 25 Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées en mois de mars.

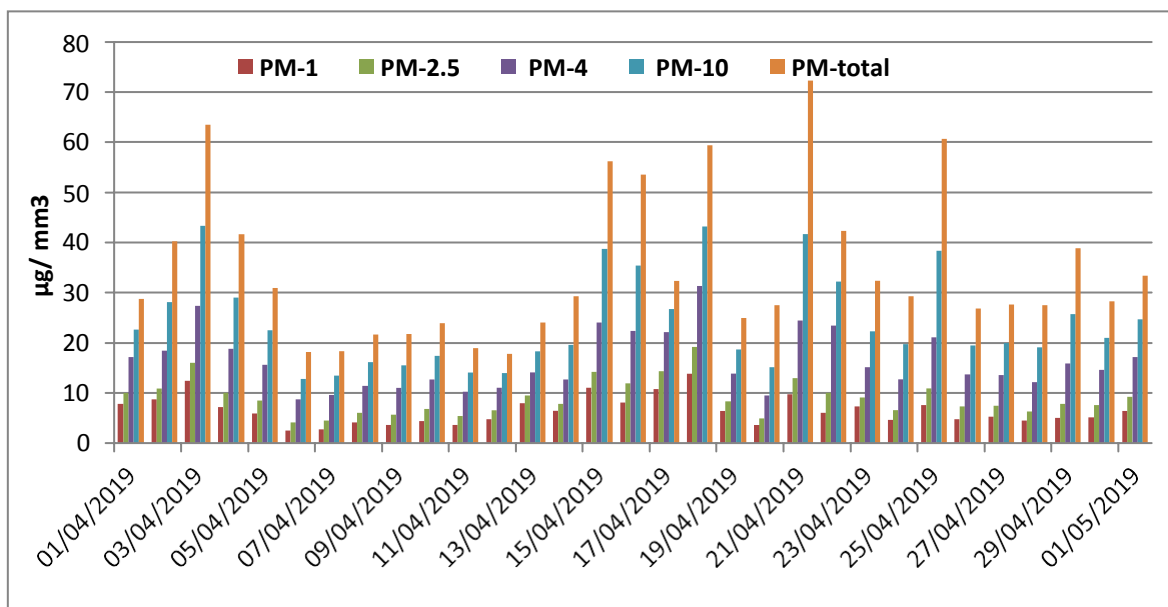


Fig. 26 Evolution des teneurs atmosphériques en PM-i mesurées en mois d'Avril.

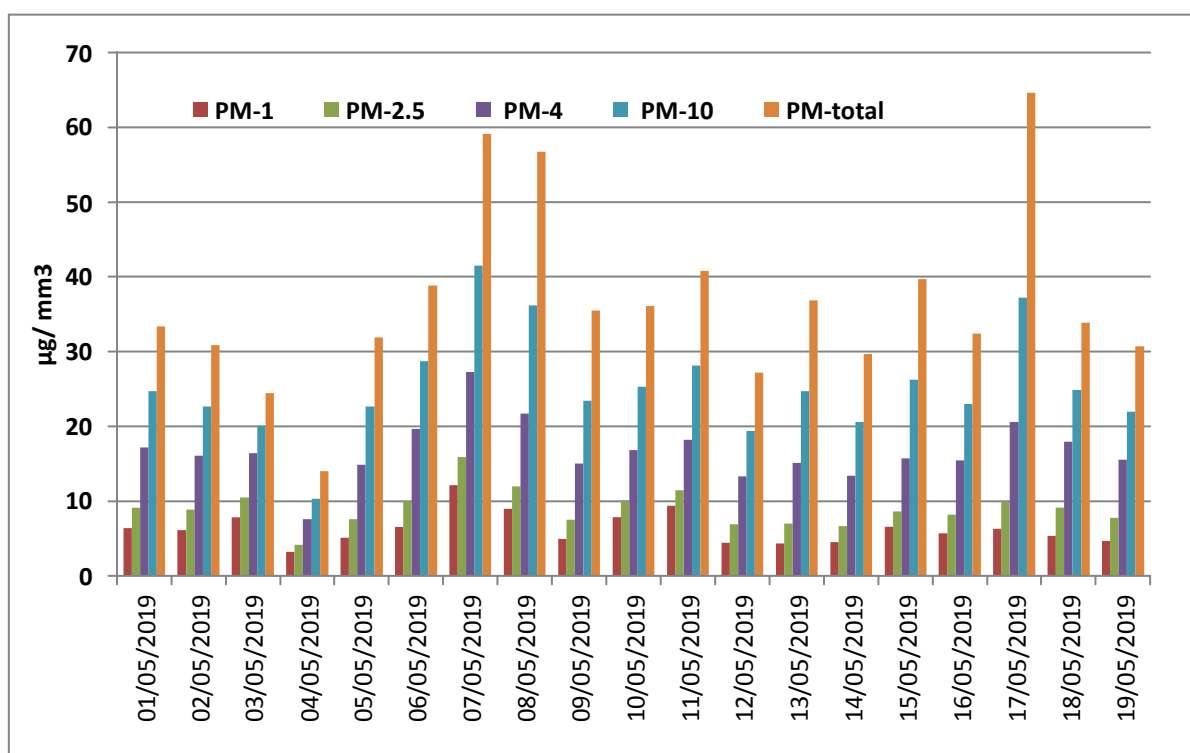


Fig. 27 Evolution des teneurs atmosphériques en PMi mesurées en mois de Mai.

La fluctuation des teneurs mesurées peut s'expliquer, comme déjà mentionné en partie théorique, par l'influence des facteurs météorologiques (vents, pluies, ensoleillement, température), les variations dans les émissions issues des activités humaines (trafic routier, industrie) et les sources naturelles (érosion, vents de sables, sels marins).

Généralement, les teneurs diminuent quand la vitesse du vent augmente (meilleure dispersion des particules atmosphériques). Ceci explique en partie les faibles teneurs mesurées lors de la deuxième semaine du mois d'avril le 06 et 07 avril, où un vent fort balayait la région.

La pluie peut aussi contribuer à réduire les concentrations des particules dans l'air, d'une part par le lessivage de l'atmosphère, mais également par le lavage des sols en diminuant la remise en suspension des particules. Ce lessivage du ciel a induit la diminution des moyennes journalières des poussières durant les premiers jours de février où, les teneurs des PM-10, PM-2,5, PM-4 et enfin PM-1 étaient faibles avec 11,62 ; 8,43 ; 4,16 et 2,65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement.

On remarque également une quantité importante de pluie à mi-mars qui a également engendré de faibles teneurs. Des pointes élevées des PM-tot, PM-10, PM-4 et PM-2,5 atteignant respectivement 47 ; 35 ; 25 et 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont caractérisé la première semaine de mars contre des moyennes journalières très faibles en PM-1. Par la suite, les moyennes journalières de PM-i ont diminué sous l'influence des pluies enregistrées. A mentionner le fait inhabituel où durant la dernière semaine du mois de mars les particules en PM-1 demeurent élevées (elles accusent des teneurs qui sont du même ordre de grandeur que les PM-2,5). Ce résultat reste inexpliqué. Cette évolution illustre la complexité du phénomène de la pollution atmosphérique lié à plusieurs facteurs en même temps.

Les moyennes mensuelles des PM-tot, PM-10, PM-4, PM2,5 et PM-1 durant le mois d'avril s'élevaient à 34,62 ; 24,12 ; 16,28 ; 9 et 6,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement. Les moyennes journalières ont connu une fluctuation avec des pics qui atteignent 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-tot, 72,35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-tot, 43,34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-10, 31,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-4, 19,14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-2,5 et 13,86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-1. Ces pics élevés sont dus à des masses d'air venant du Nord-Ouest (Espagne) ou du Sud Algérien (vents de sable) comme présenté dans en figure 28 obtenue par le Modèle Hysplit.

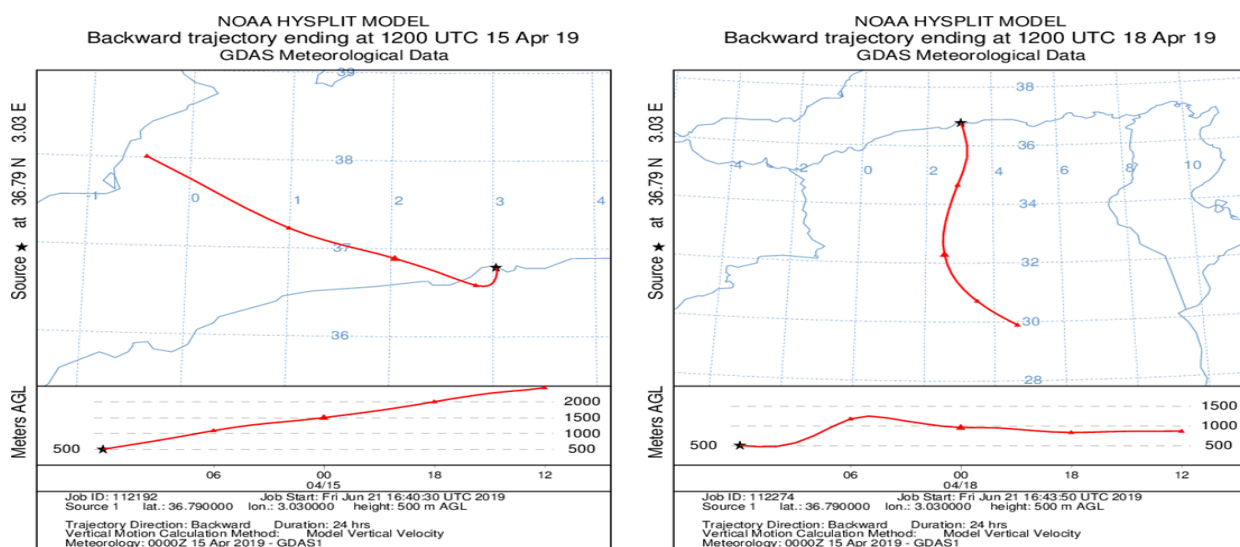


Fig. 28 Déplacement de particules d'Espagne et du Sud Algérien.

Le mois de mai a connu également des fluctuations dans les moyennes journalières des PM-i comme le montre la figure suivante. Les moyennes journalières des PM-tot, PM-10, PM-4, PM-2,5 et PM-1 étaient de 36,65 ; 25, 35 ; 16, 72 ; 9 et 6,32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement avec des pics atteignant 65, 41, 27, 15 et 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Il est intéressant d'examiner les cas spéciaux des journées du 21 et 25 avril, caractérisées par des concentrations relativement élevées en PM-10 (Figure 29) variant entre 41,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 39,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

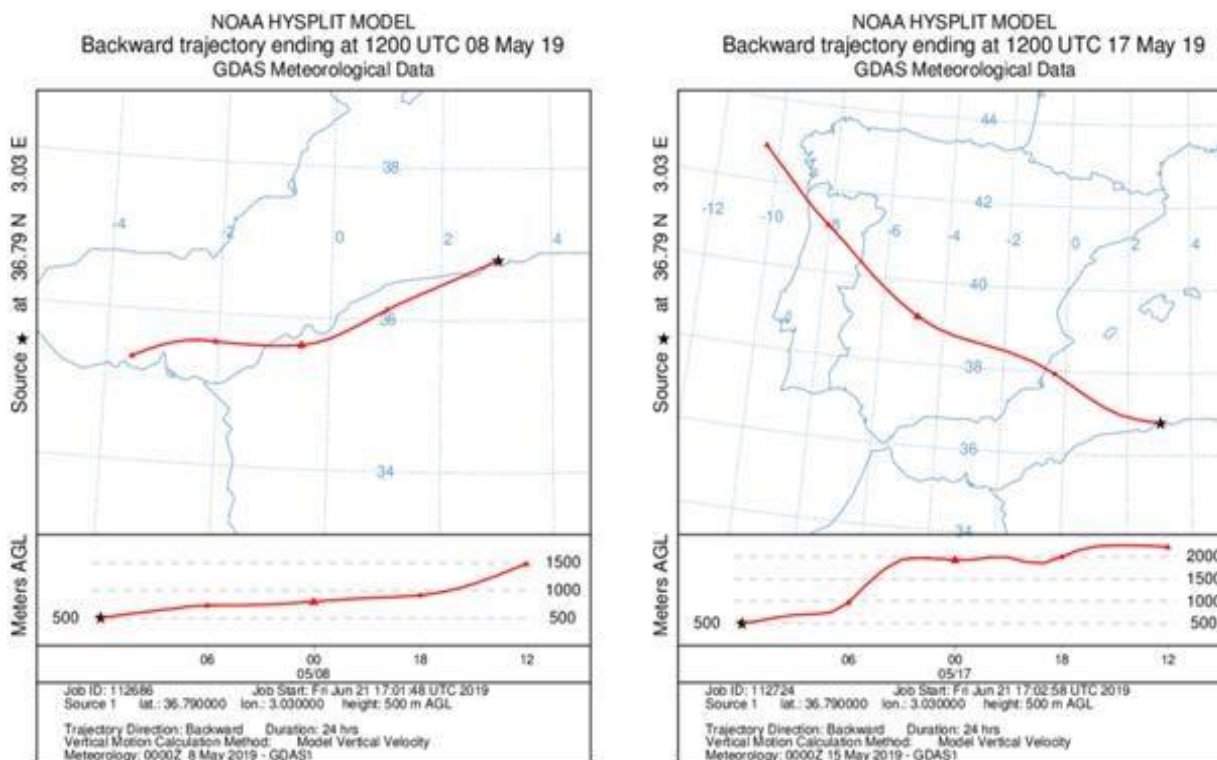


Fig. 29 Rétro trajectoires des masses d'air venant d'Espagne, du Portugal et du Maroc.

Pendant les jours du 3, 4 et 6 Mars et 3, 15 et 17 avril 2019, les teneurs en PM10 sont très élevés atteignant 58, 38, 44, 44,38 et 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le suivi des bulletins météorologiques indiquait pour ces journées un état anticyclonique (journées ensoleillées), caractérisé par une stabilité de l'atmosphère (faible vitesse du vent). Cette situation conjuguée probablement à un trafic routier et à des activités humaines plus intenses a alors engendré un niveau élevé en PM-10.

En outre, on constate l'existence de deux tendances durant le mois d'avril, le 21 et 26 avril, caractérisées par des concentrations relativement élevées variant entre 41,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 19,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La moyenne journalière des concentrations enregistrées durant cette première période est de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Une étude détaillée sur les deux journées remarquables dans le mois d'avril où les teneurs en PM-10 ont atteint les valeurs les plus élevés est présentée ci-après:

1.2. 21 Avril 2019 le soir

Le suivi de l'évolution horaire montre que le 21 Avril 2019 a enregistré des moyennes horaires des PM-i très élevées avec des pics horaires atteignant 178, 80, 38, 10 et 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-tot, PM-10, PM-4, PM-2,5 et PM-1, respectivement (figure 30) .

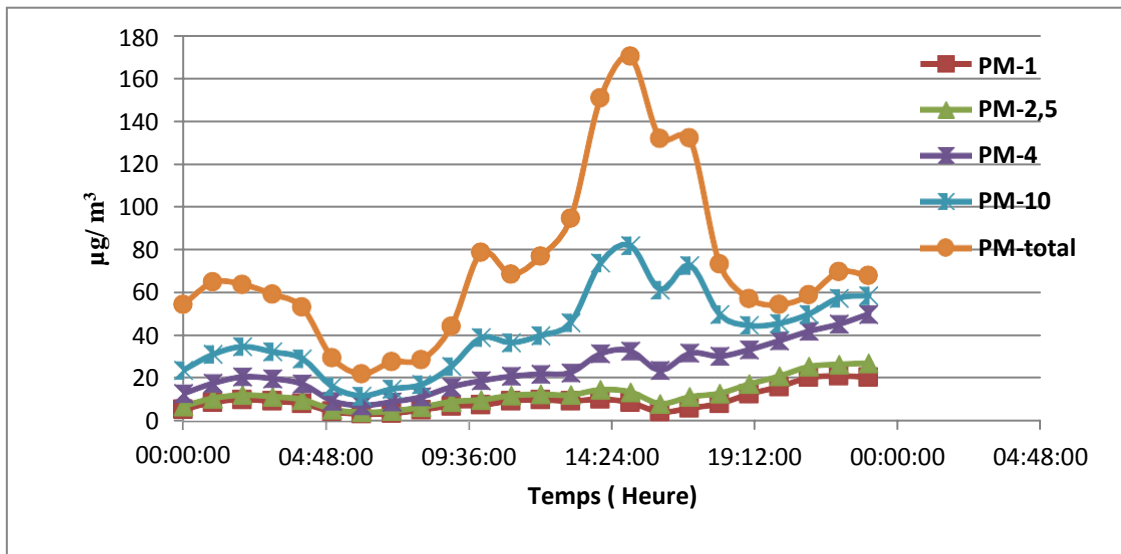


Fig. 30 L'évolution des concentrations horaire des PM-i pour le 21 avril 2019.

Pour déterminer la source de ces moyennes horaires très élevées nous avons élaborée une carte des sources des masses d'air en utilisant le modèle Hysplit (figure 31). La carte Hysplit montre que les vents prédominants à Alger à 15h étaient de l'Ouest (pollution par l'industrie de pétrochimie dans la raffinerie d'Arzew), et venant de la méditerranée à 23h (émissions par les navires ainsi que les sels marins).

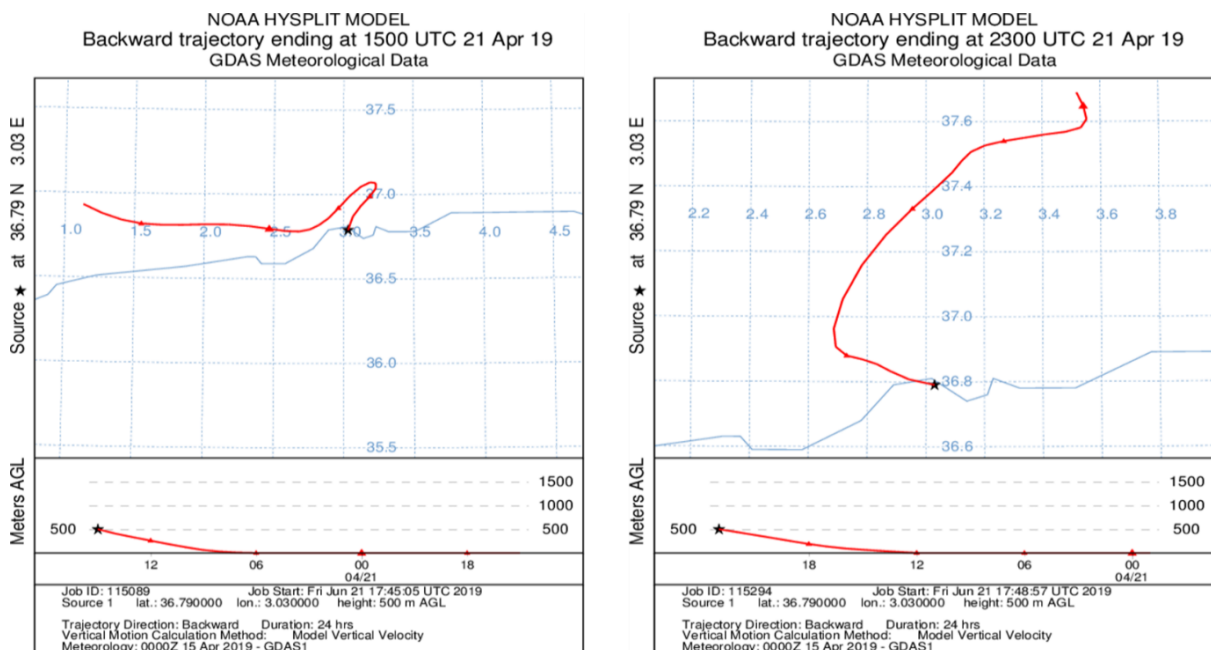


Fig. 31 Rétro trajectoires des masses d'air venant de l'Ouest du Pays et des activités navales.

La figure 32 présente une carte de modélisation de la présence de poussières établis par le Centre de Prévisions de Poussière de Barcelone qui montre la présence d'un nuage de poussières dans le nord d'Alger et la méditerranée et confirme les résultats mesurés dans notre étude.

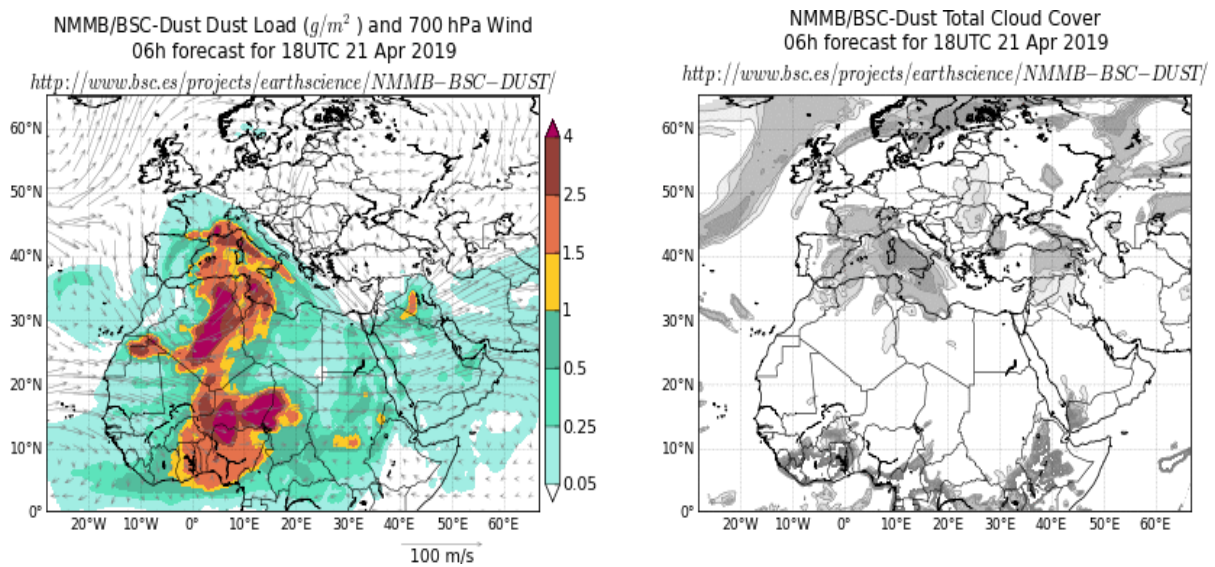


Fig. 32 Concentrations de poussières de sable modélisées pour la date du 21/4/2019 à 18 h (BSC/Dream forecast : Barcelona Super Computing Centre : Dust Regional Atmospheric Model).

La figure 33 présente l'état du ciel (l'épaisseur optique des aérosols) élaborée par le Modèle Modis développé par la NASA qui donne une information sur la présence de poussières dans l'air durant la semaine du 21 Avril 2019. Nous remarquons que la région d'Alger et de la méditerranée a été très polluée par les particules et aérosols, ce qui confirme le résultat trouvé précédemment.

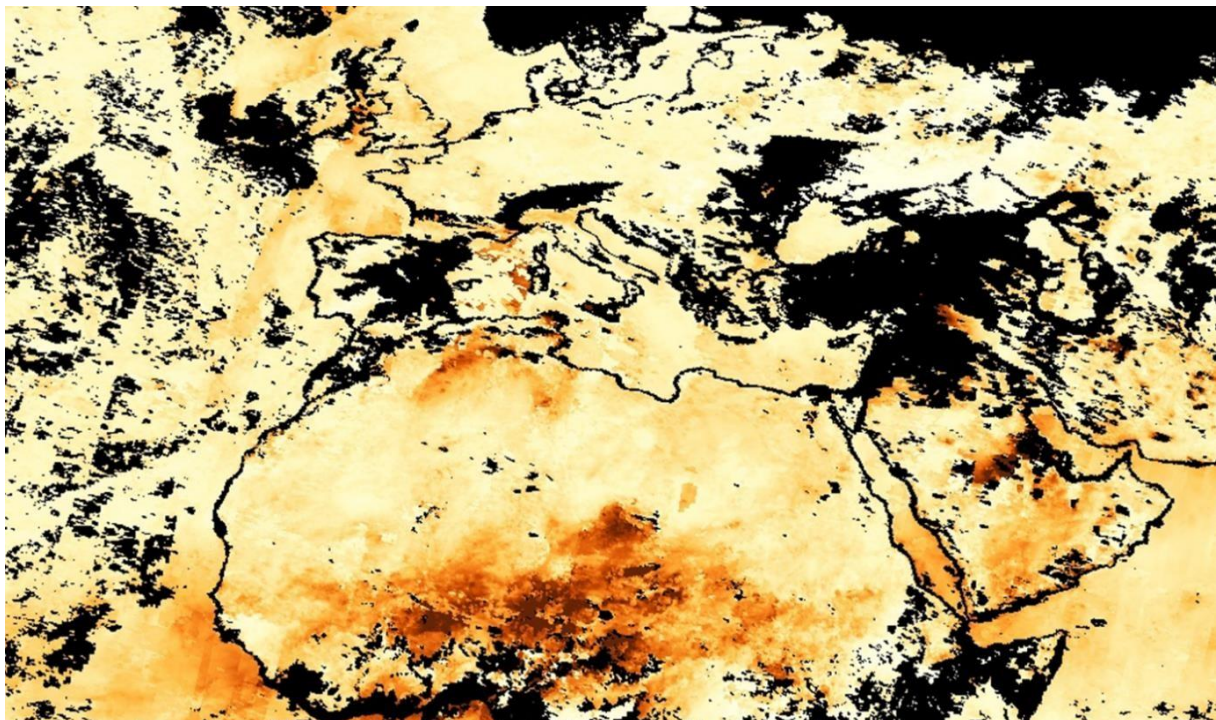


Fig. 33 Carte de l'épaisseur optique durant la semaine du 21 Avril 2019 élaborée par Modis (NASA).

1.3. 25 Avril 2019

Une autre journée à étudier est celle du 25 Avril 2019, où, il y'a eu un au niveau de l'usine de fabrication et de transformation de plastique à Chebli (wilaya de Blida). Le panache de fumée qui en résulta était visible à partir d'une bonne partie de la wilaya de Blida et d'Alger. Il y eut émission de quantité importante de gaz à effet de serre et de particules qui ont porté atteinte à la qualité de l'air durant cette journée. Le suivi horaire des teneurs en PM-i est illustré en figure 34.

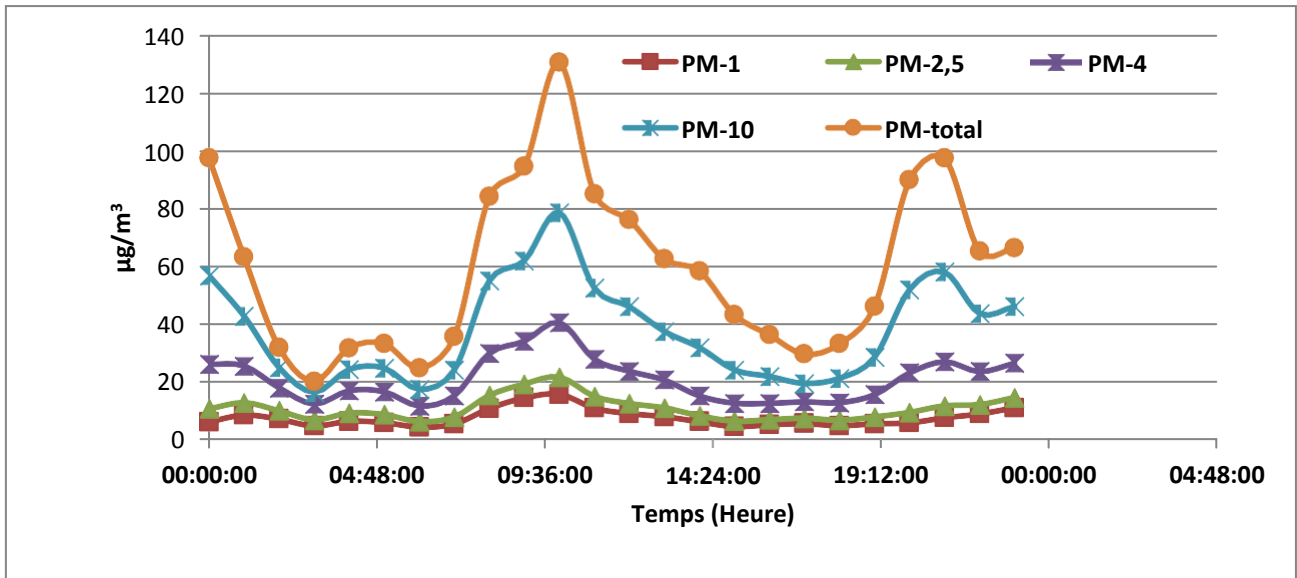


Fig. 34 Evolution des concentrations en PM-i durant le 25 Avril 2019.

Dans le but de confirmer les niveaux des aérosols dans l'air durant le jour du 25 Avril 2019, nous avons élaborée une carte de modélisation faite par le modèle du Laboratoire de recherche de la marine américaine NRL Monterey aerosol modeling. La carte suivante montre que les niveaux des aérosols et des fumées élevés durant cette journée, ce qui confirme les niveaux de polluants mesurés à Alger le jour du feu de Blida.

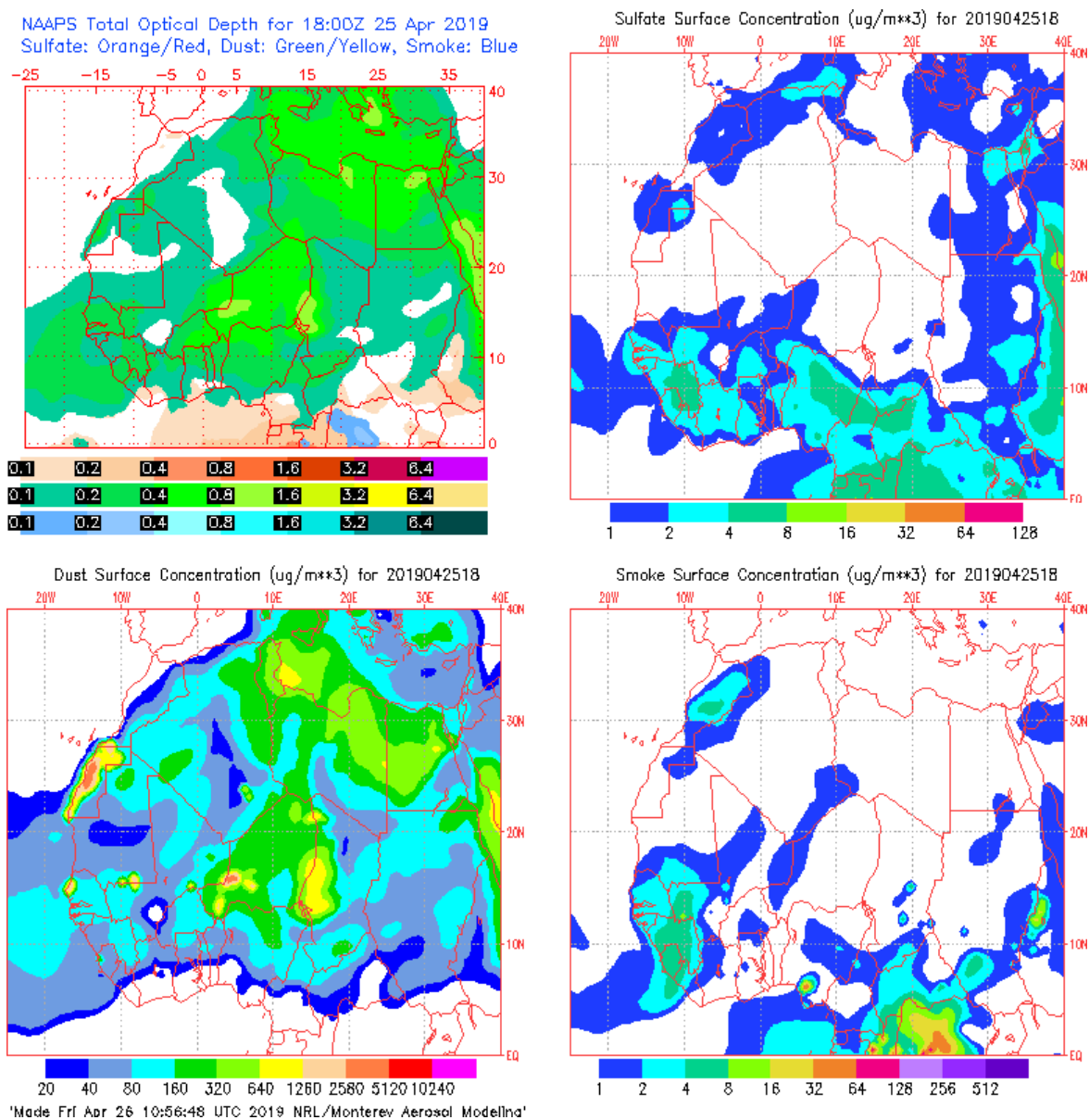


Fig. 35 PM-i modélisées en date du 25/04/2019 à 18h00 (NAAPS : Navy Aerosol Analysis and Prediction system).

2. Etudes de cas des PM-i

Dans ce qui suit nous réaliseront une étude de cas des PM-i en détail.

2.1. PM-10

La concentration moyenne observée durant la campagne de mesures (du 01 février 2019 au 20 mai 2019) des PM-10 est de $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette concentration est supérieure de la moyenne annuelle recommandée par l'OMS pour les PM-10 et qui est fixée à $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Elle est, cependant, inférieure à la limite annuelle moyenne fixée en Algérie à $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par le décret exécutif n° 06-02 du 7 janvier 2006 et inférieure à celle de l'union européen ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tableau 7 Concentrations caractérisant la variation des PM-10 durant la période d'étude

	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Moyenne sur la période de mesure	28
Valeur limite annuelle pour la protection de la santé humaine	20
Maximum horaire	128
Nombre de jours de dépassement de la valeur limite journalière sur la période de mesure (norme OMS)	81
Tolérance du nombre de jours de dépassement de la valeur limite journalière par an (norme OMS)	35
Nombre de jours de fonctionnement de l'appareil	109

Le suivi des teneurs de ces particules chaque minute montre une augmentation de la moyenne inscrite ci-dessus de 0,02% et une augmentation dans la fourchette de variation des teneurs de 32%, où, les teneurs maximales des PM-10 atteignent $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le rapport PM-10/PM-tot évoluant entre 0,55 et 0,83, avec un rapport moyen de 0,70 ce qui montre qu'une grande part des particulaires dans l'air est inhalée par les citoyens.

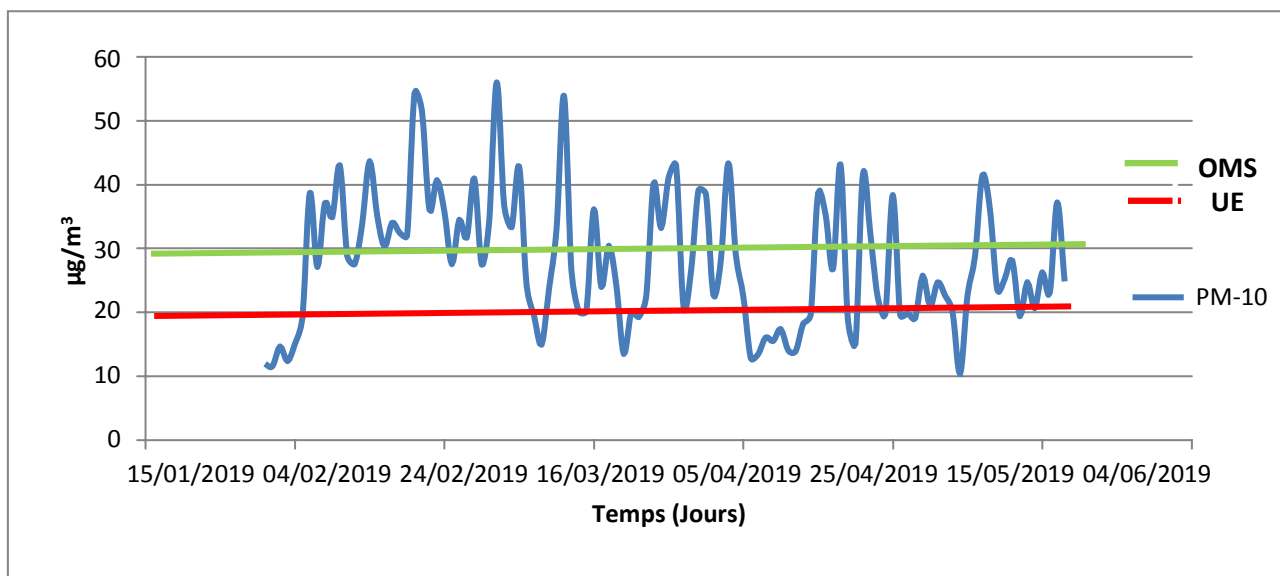


Fig. 36 Etude de cas des PM-10 dans le site urbain de Mustapha Bacha.

2.2. PM-2,5

Au niveau du site urbain, la fraction de PM-2,5 est minoritaire (Figure 37) et varie entre 3,11 et 27,76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, La moyenne des PM-2,5 s'établit à 10,64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, très proche de l'objectif de qualité de l'OMS (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), et largement au-dessous de la norme Algérienne avec un rapport PM-2,5/PM-tot évoluant entre 0,15 et 0,47 avec un rapport moyen de 0,27 ce montre que le tiers des particules dans l'air peuvent traverser les poumons des Algérois et atteindre les alvéoles.

Tableau 8 Résultats caractérisant la variation des PM2,5 durant la période d'étude.

	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Moyenne sur la période de mesure	10,64
Valeur limite annuelle pour la protection de la santé humaine	10
Maximum horaire	66,26
Nombre de jours de dépassement de la valeur limite journalière sur la période de mesure (norme OMS)	49
Tolérance du nombre de jours de dépassement de la valeur limite journalière par an (OMS)	35
Nombre de jours de fonctionnement de l'appareil	109

Nous remarquons que les niveaux des PM-2,5 dépassent les limites de la valeur annuelle limite de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ exigée par l'OMS du 20 février au 10 mars ainsi que le 19 mars 2019, ce qui est un risque sanitaire sur les malades de l'hôpital et les riverains.

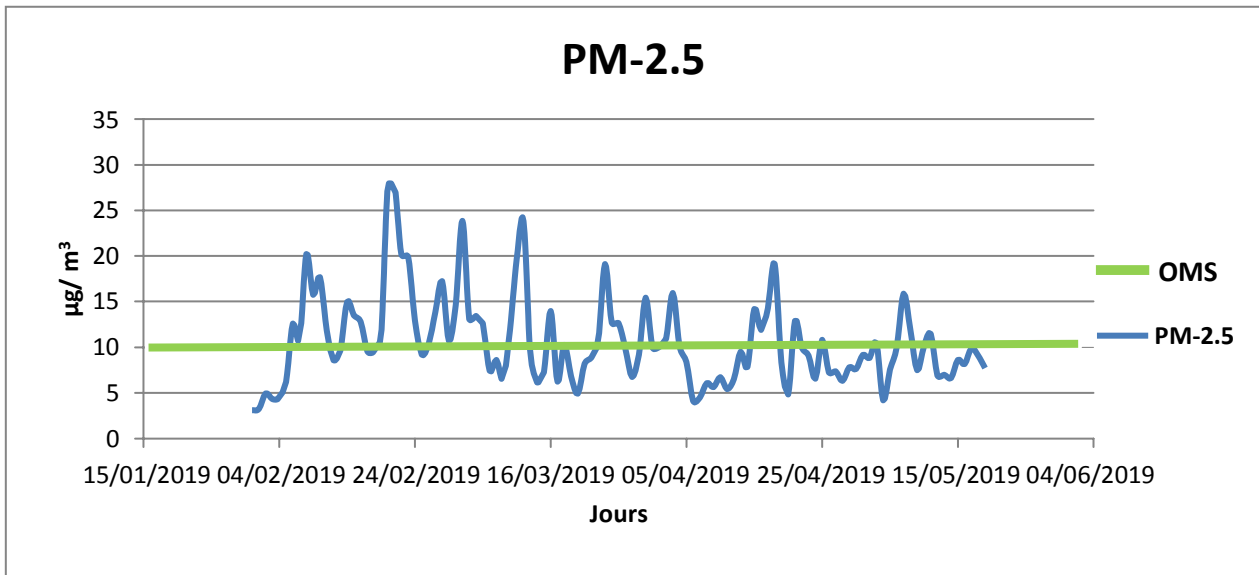


Fig. 37 Etude de cas des PM-2,5 dans le site urbain d'Alger centre.

2.3. PM-1

Sur la période de mesure à Alger-centre, les concentrations en PM-1 varient entre 2,28 et 23,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figure 38). La moyenne s'établit à 7,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les valeurs maximales journalière et horaire des PM-1 atteignent respectivement 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette fraction de particule connue sous le terme de « particules Diesel » est très nocive car elle véhicule des composés très toxiques comme les suies et les HAP. A ce jour, il n'y a pas de normes pour les PM-1, mais tous les pays s'emploient à réduire leurs teneurs (interdiction des véhicules Diesel dans plusieurs centres urbains des villes européennes).

Le rapport PM-1/PM-10 est à 0,28 tandis que la plupart des jours, la proportion des PM-1 représente environ 70% des émissions de PM-2,5 (Rapport PM-1/PM-2,5 est égal à 0,72).

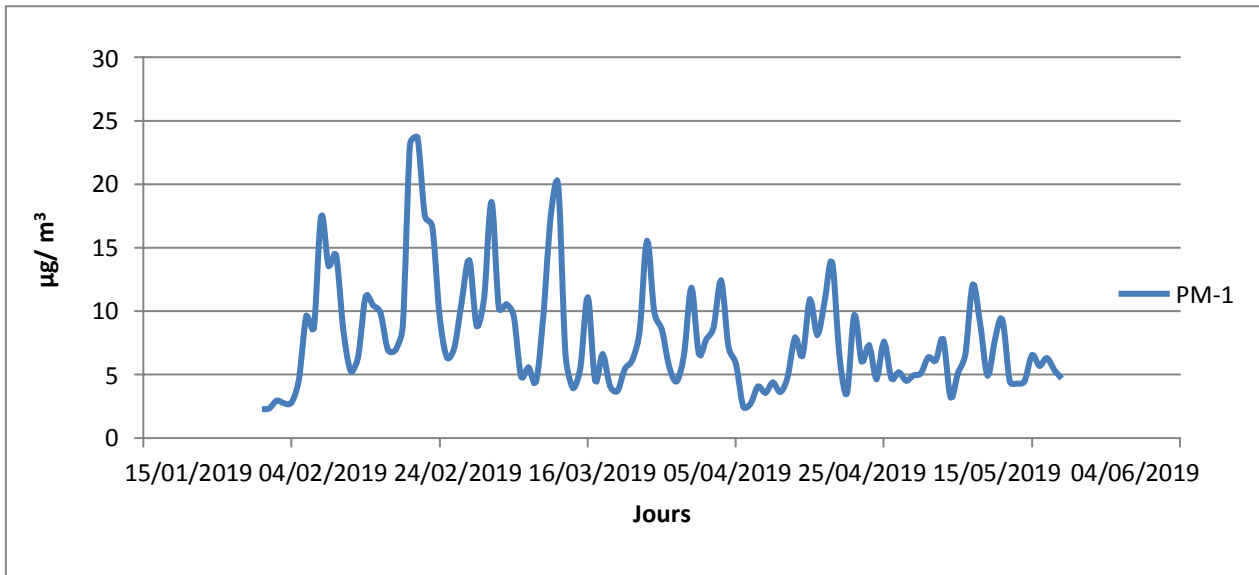


Fig. 38 Etude de cas des PM-1 dans le site urbain de Mustapha Bacha.

3. Etude des profils moyens horaires en particules PM-i

L'étude des profils horaires moyens permet de définir et de comprendre les variations horaires moyennes des concentrations en particules mesurées et les mettre en relation avec les profils horaires du trafic routier sur l'axe Ali Mellah et la vitesse du vent mesurée à Alger.

3.1. Les heures de pointe : 07-09h

La moyenne des concentrations horaires des PM-1 durant les heures de pointe (7h-9h) est de 234 p/cm³ pour le nombre de particules, 11 µg/m³ pour les PM-2,5 ; 26 µg/m³ pour les PM-10, et 36 µg/m³ pour les PM-tot. On remarque un dépassement des concentrations à des valeurs dépassants les 40 µg/m³d'une heure qui est énorme. Une quantité deux fois supérieure à la valeur limite fixée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

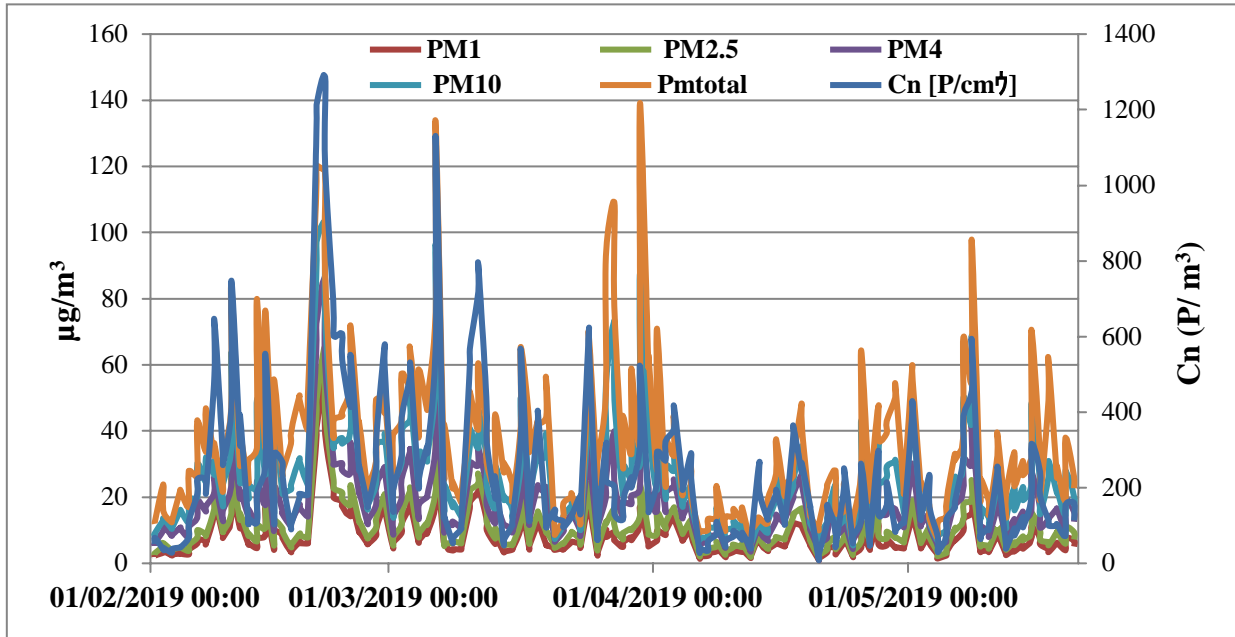


Fig. 39 Concentrations horaires des PM-i et nombre de particules durant les heures de pointe 07-09 h.

3.2. Heures de pointe : 12-13 h

La moyenne horaire des concentrations observées est de 215 p/cm³ pour le nombre de particule, PM-2.5 = 10 µg/m³, PM-10=25 µg/m³, PM-tot = 38 µg/m³.

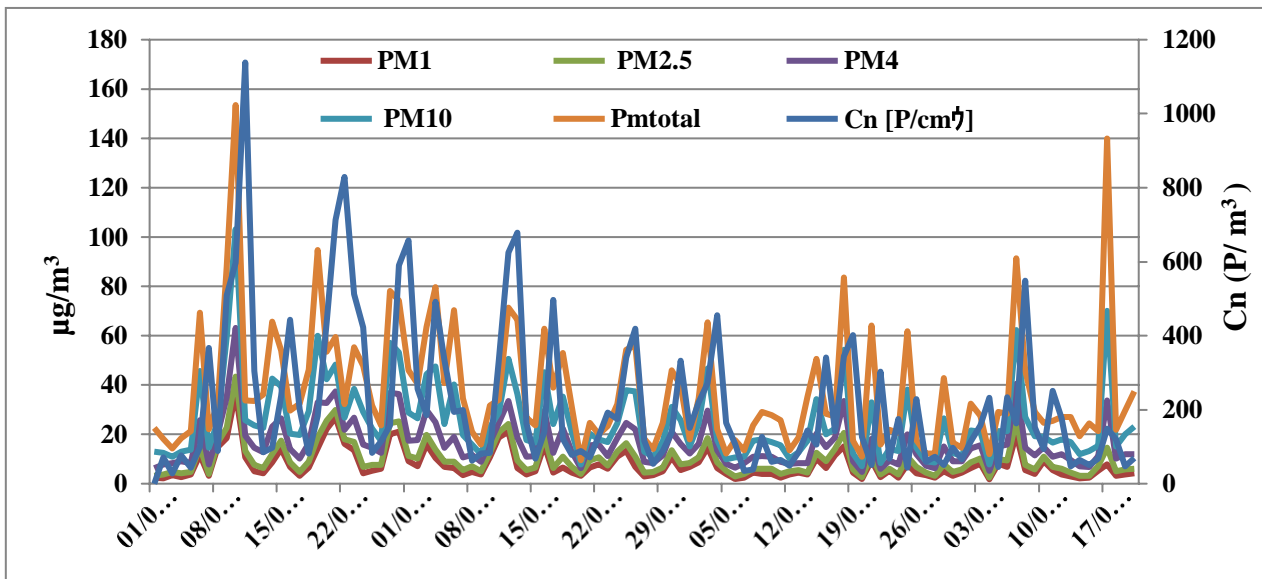


Fig. 40 Concentrations des PM-i et du nombre de particules durant l'heure de pointe (12-13h).

3.3. Heures de pointe : 16-18h

La valeur moyenne de concentrations horaires observées est de 137 p/m^3 pour le nombre de particule, $\text{PM}_{2.5} = 7 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, $\text{PM}_{10} = 19 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, $\text{PM}_{\text{tot}} = 28 \text{ } \mu\text{g/m}^3$.

Durant la période du 06/02 au 06/03 2019, les pics de pollution observés avoisinent les $65 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ et redescendent jusqu'à des valeurs proches de $16 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ pour les PM_{10} (Figure 41). Pendant la durée allant du 09/03 au 20/05/2019, les concentrations oscillaient entre 20 et $30 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Cependant, sur cette période on a deux pics de pollution élevés atteignant $60 \text{ } \mu\text{g/m}^3$.

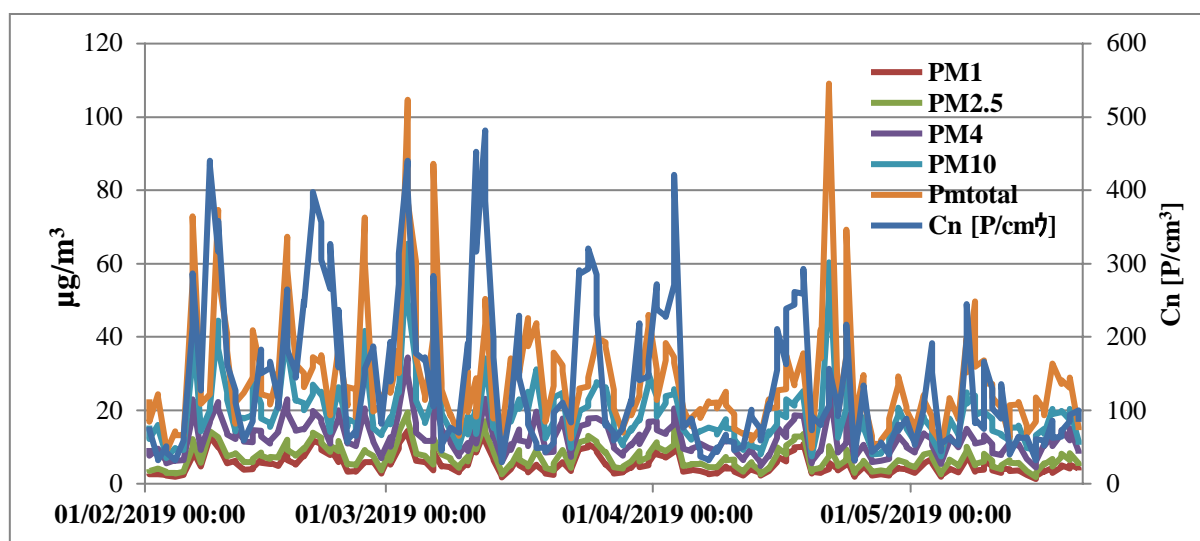


Fig. 41 Concentrations des PM-i et du nombre de particules durant les heures de pointe (16-18h).

3.4. Comparaison entre les heures de pointes

Les box plot, ou diagrammes en boîte de Tuckey (boîtes à moustaches) permettent une représentation simple des principales données statistiques d'une série de données :

- La boîte contient 80 % des données mesurées, elle représente donc les teneurs moyennes relevées sur le site.
- Les situations atypiques se traduisent par des valeurs particulières qui sont comprises entre la boîte et les extrema. Le maximum et le minimum sont représentés à chaque extrémité des traits en dehors de la boîte.

Les boîtes à moustaches présentant les résultats des relevés horaires en particules PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ pendant les heures de pointes (figures 42 et 43), montrent une importante variabilité des mesures, et notamment de nombreuses teneurs élevées.

Les concentrations sont plus hétérogènes avec une gamme de variation qui s'étend de 7 à 103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-10. On remarque que la plus part des pics de pollution élevés se retrouve le dimanche qui est le jour de reprise après le week end.

50% des concentrations moyennes horaires en PM-10 sont comprises entre 13 et 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les trois heures de pointes. Ces données étaient attendues étant donné la forte influence automobile à côté du site en ces heures-là.

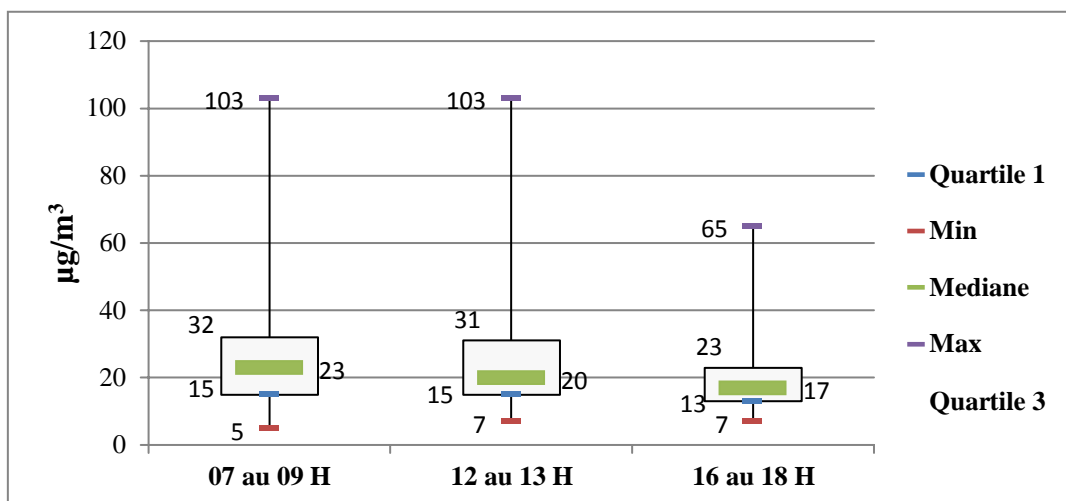


Fig. 42 Boite à moustache des concentrations PM-10 en heures de pointes.

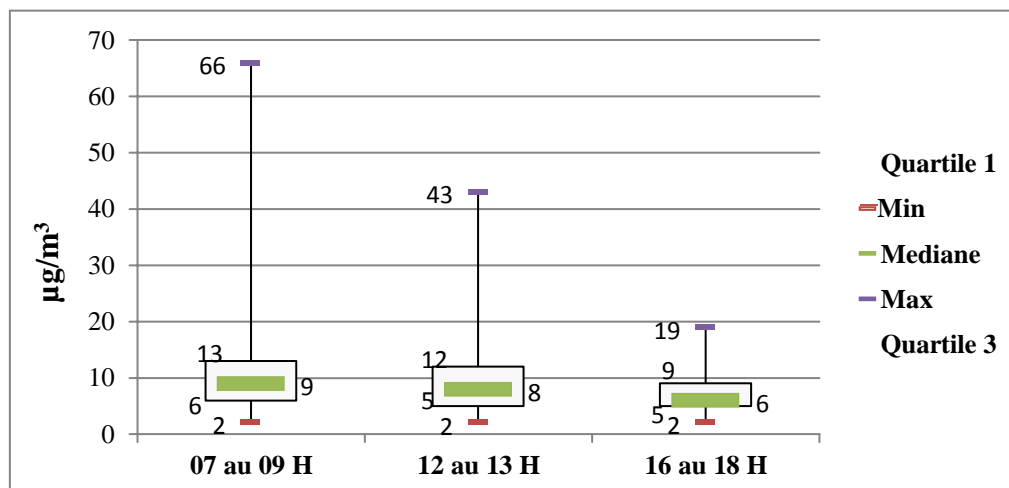


Fig. 43 Boite à moustache des concentrations PM-2,5 en heures de pointes.

D'après les données horaires, 50% des concentrations en PM-1 à l'heure de pointe 07-09 h et 12-13 h sont comprises entre 4 et 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pour une moyenne de 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et une médiane de 6

$\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le maximum est atteint $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ le 10/02 à 8h et 21/02 à 13h. Les pics de concentrations pendant la période 16-18 h sont nettement bas par rapport aux deux autres périodes.

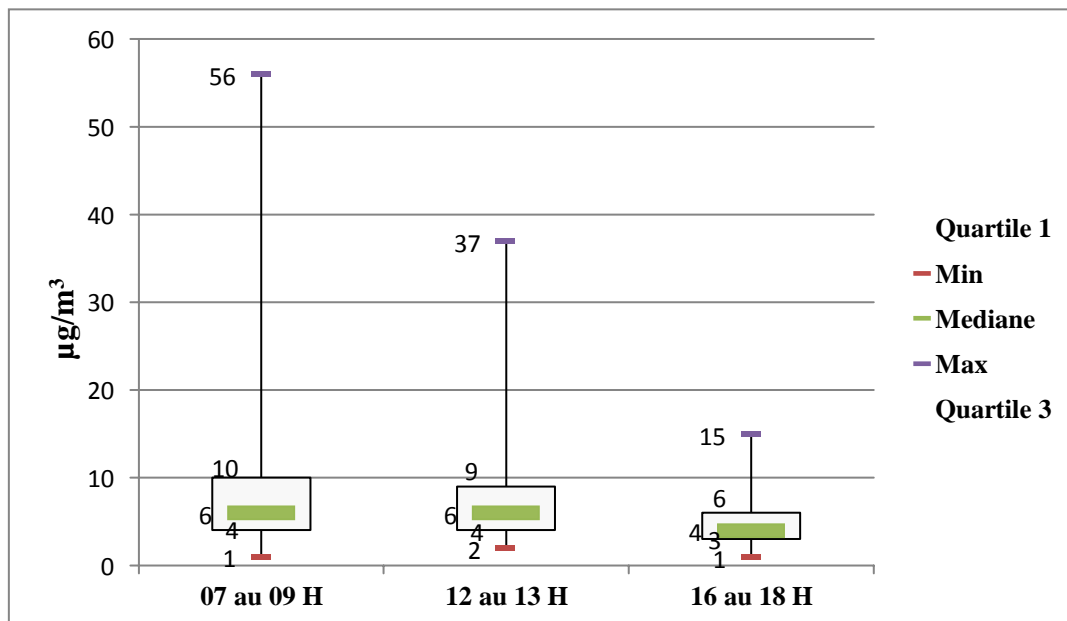


Fig. 44 Boîte à moustache des concentrations PM-1 en heures de pointes.

Les pics de concentrations en PM-10 dépassent la valeur réglementaire $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ atteignant les $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM-10 durant les périodes 07-08h et 12-13h. Ces pics de pollution exposent les riverains à des concentrations chimiques importantes, avec des composés responsables d'une augmentation du stress oxydatif. Ce phénomène de destruction de l'ADN joue un rôle clé dans le développement de nombreuses maladies comme les cancers, les maladies respiratoires, cardiaques et neurodégénératives. Les chercheurs conseillent donc aux automobilistes de modifier les horaires de leur trajet s'ils le peuvent. Cette tendance n'est pas observée pour les PM-2,5 et PM-1, où on remarque une baisse des pics de pollution par rapport aux heures de pointes entre elles au fil de la journée. Ce qui explique qu'on a une source de pollution de PM-10 qui est autre que le parc automobile pour la matinée peut être l'activité du port.

Durant l'heure de pointes 16-18h, on enregistre le taux le plus bas en termes de pollution particulaire. A l'opposé, la durée de 7h à 9h est la durée la plus élevée en terme de concentration de pollution. Elle est deux fois plus forte que durant la matinée, l'exposition change rapidement en fonction du trafic mais aussi à l'action du système de freinage qui est très sollicités et les émissions de particules s'envolent, couplant avec des conditions anticycloniques froides qui limitent la dispersion des particules.

4. Etude des profils diurnes et nocturnes en particules PM-i

La plupart des pics qui sont bien marqués apparaissent, le matin à l'heure de pointe 8-9h et en seconde position avec une concentration moindre entre 11-12h l'après-midi, liés à l'activité économique aux alentours du site de mesure : trajet « travail – domicile ». En dehors de ces intervalles, on a une pollution de fond vu que c'est site urbain qui présente globalement une pollution de 14 et 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-10 en période hivernal et printanière.

Cependant, durant la période de l'étude on enregistre plusieurs pics élevés le 27/03 à 3h, le 31/03 à 1h, le 3/04 à 2h, le 16/04 à 3h et le 22/04 à 3h. Sur les jours cités, on observe un nombre de particules faible, ce qui nous permet de déduire que les particules sont de type grossières.

Pendant le jour, la circulation des voitures engendre des émissions de particules et la remise en suspension, non présentes la nuit lorsque toute activité est arrêtée. Les moyennes horaires diurnes dépassent les 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, voire 158 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM-10, alors que la nuit, les niveaux sont de quelques trentaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hors jour de pollution. Parallèlement a cette situation on observe souvent des nuits avec d'intenses pics de pollution. En Méditerranée orientale, les épisodes de poussière présentent une saisonnalité distincte qui se maximise au printemps en raison du développement des cyclones de Sahara. Ces cyclones sont générés au sud de l'Atlas au Maroc et en Algérie par le contraste thermique entre l'air froid de l'Atlantique et l'air chaud du Sahara et se déplacent vers l'Est le long de la côte nord-africaine, affectant les régions centrale et orientale de la Méditerranée. Le printemps (principalement avril - mai) a été bien reconnu comme étant la période où la charge de poussière sur la Méditerranée orientale était maximale en 2018. Il a été caractérisé par une activité précoce et anormale de la poussière sur la région [47]. Ce qui explique probablement ces pics nocturnes que nous avons observés.

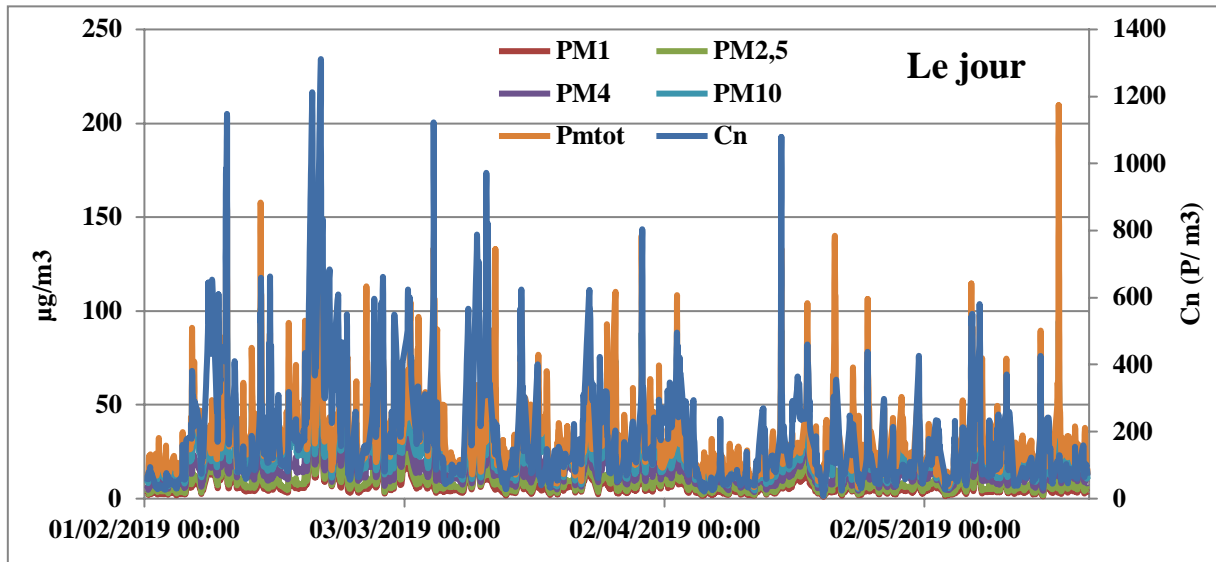


Fig. 45 Concentrations des PM-i et du nombre de particules durant le jour.

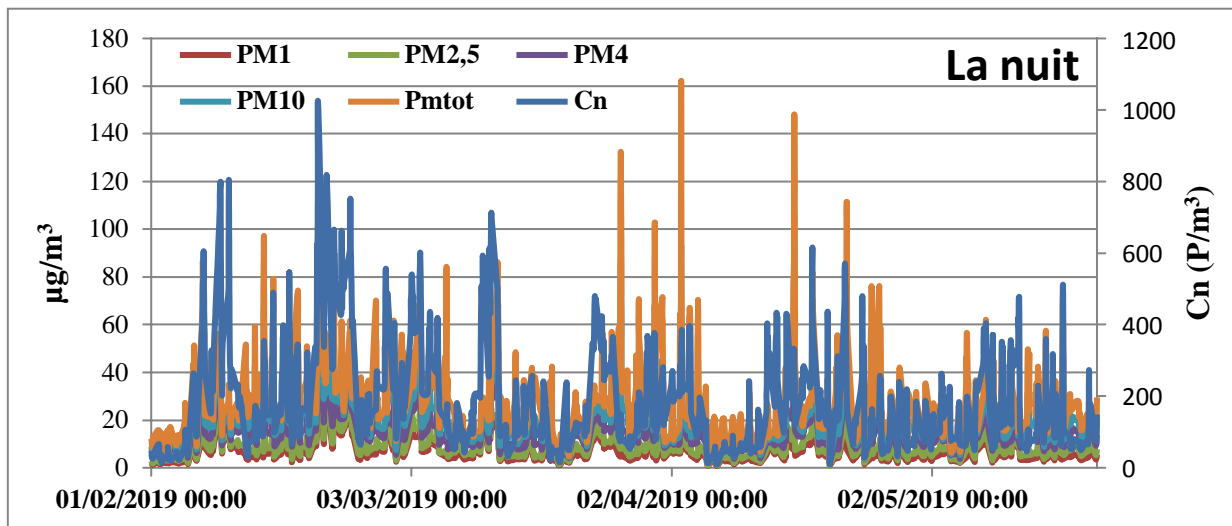


Fig. 46 Concentrations des PM-i du nombre de particules durant la nuit.

Le tableau 9 résume les rapports PM-i (diurne)/ PM-i (nocturne). On constate que les niveaux moyens diurnes et nocturnes sont de même ordre de grandeur. Ce résultat montre de nouveau la complexité des différentes sources qui interviennent dans la pollution par les particules (effet de la brise de terre nocturnes, stagnation des polluants).

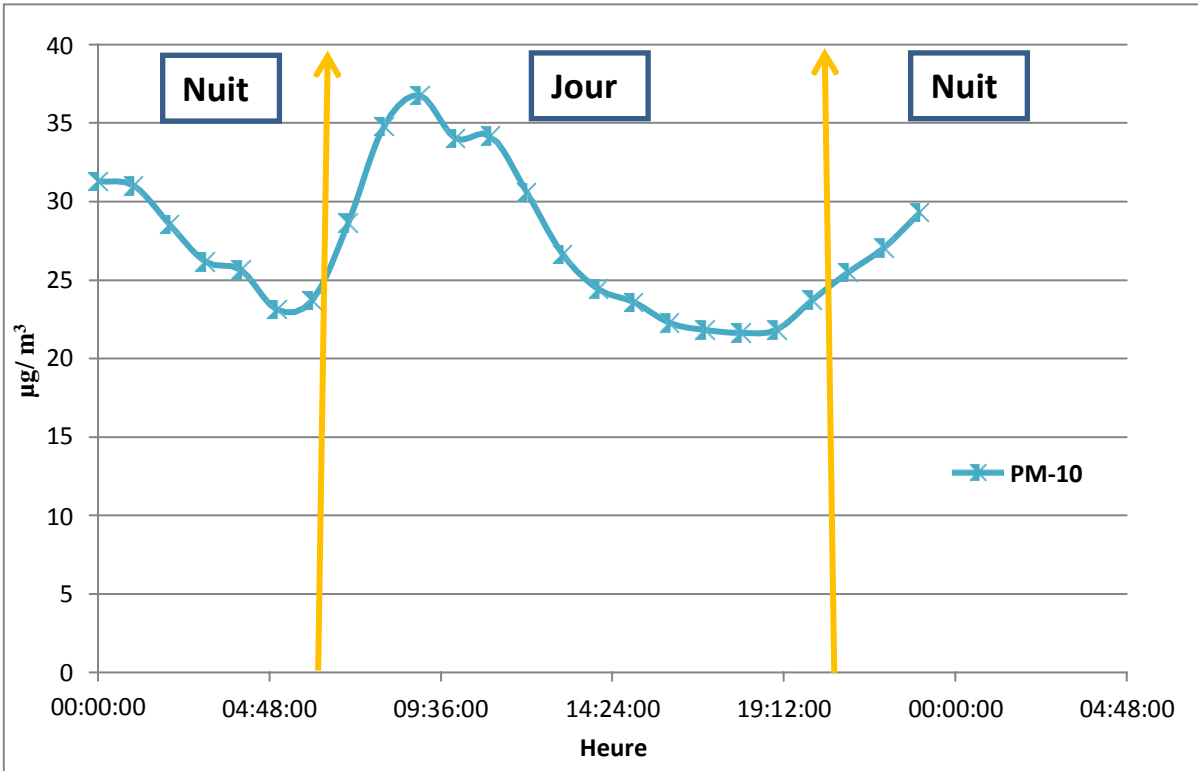


Fig. 47 Profil de variation des PM-10 pendant la journée.

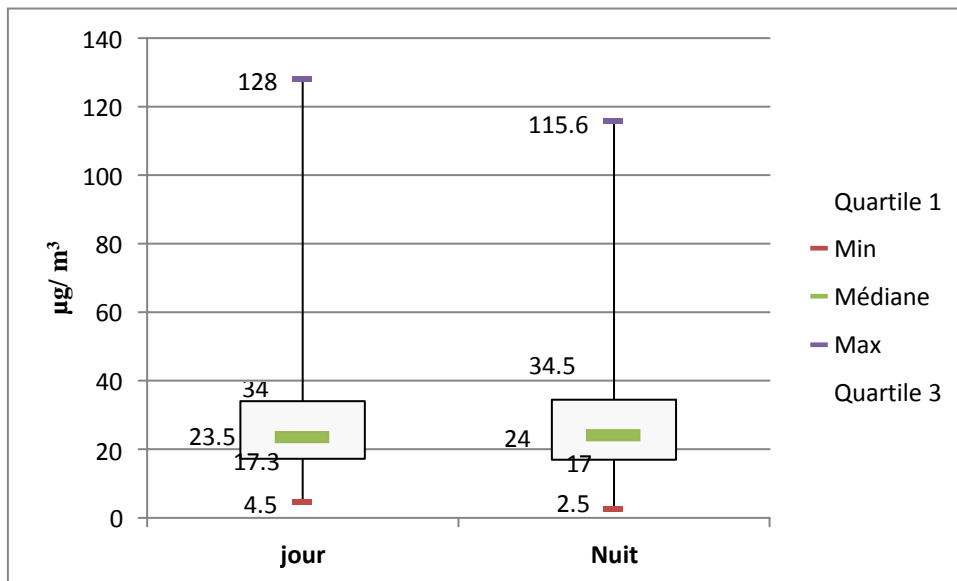


Fig. 48 Boîte à moustache des concentrations PM-10.

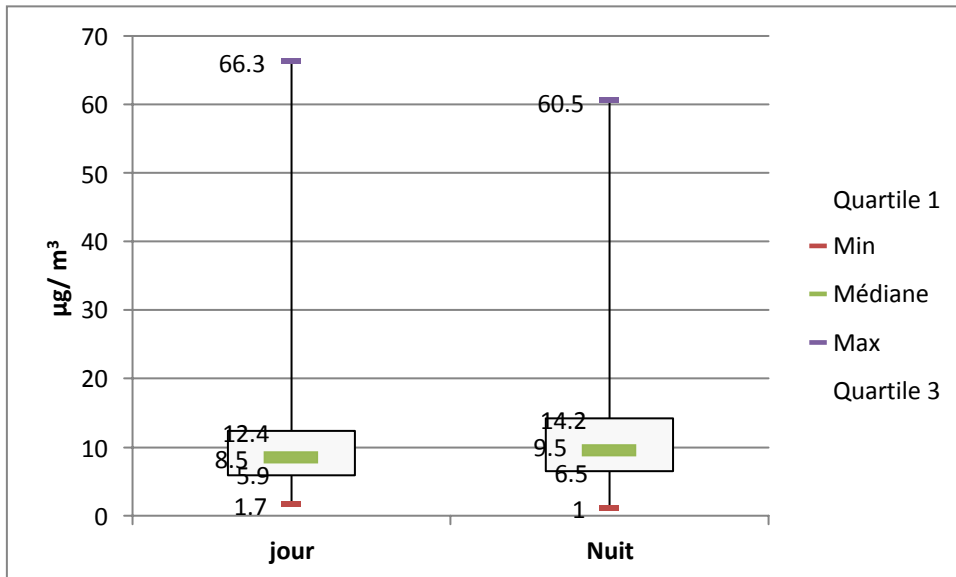


Fig. 49 Boite à moustache des concentrations PM-2,5.

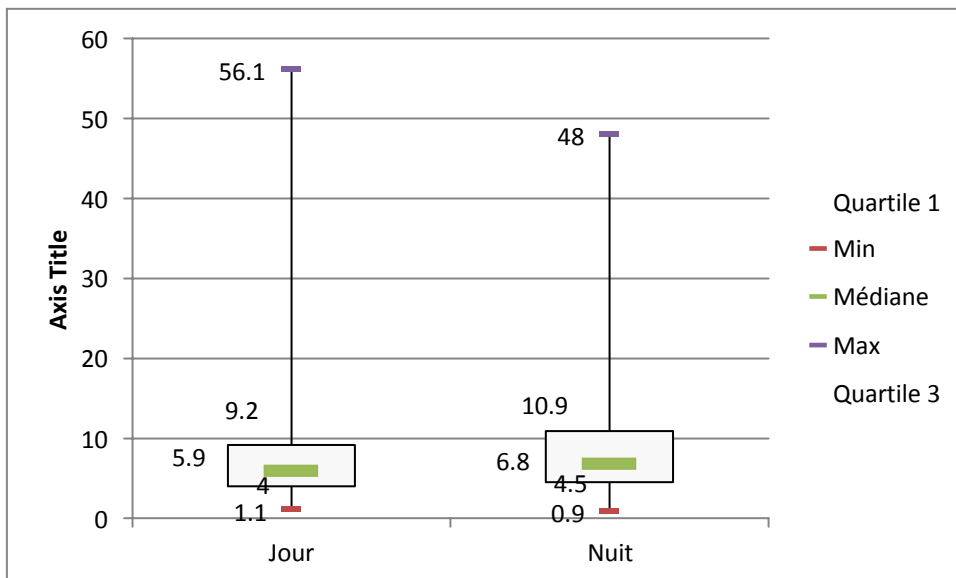


Fig. 50 Boite à moustache des concentrations PM-2,5.

Tableau 9 Rapport des concentrations en PM-i jour/ nuit.

Moyenne	PM-i (Jour)	PM-i (Nuit)	PM-i(Jour)/PMI (Nuit)
PM-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	7,7	8,4	0,92
PM-2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	10,4	11,1	0,94
PM-4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	18,4	19,1	0,96
PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	28,4	27,4	1,04
PM-tot	41,7	37,2	1,12

5. Etude des profils moyens horaires jours ouvrés et weekend en particules PM-i

Les figures 51 et 52 présentent la variation journalière des concentrations de PM-i, durant le week-end (vendredi) et les jours ouvrables. On n'observe pas une différence significative entre les concentrations journalières des jours ouvrables et du week-end. En contradiction avec l'étude déjà faite sur le même site auparavant (Fellahi et Baaziz, 2017), cela peut s'expliquer par les activités du HIRAK (manifestations) depuis le 22 février 2019 et la circulation des camions de police et utilisation des usagers leurs véhicules afin de se diriger vers la grande poste.

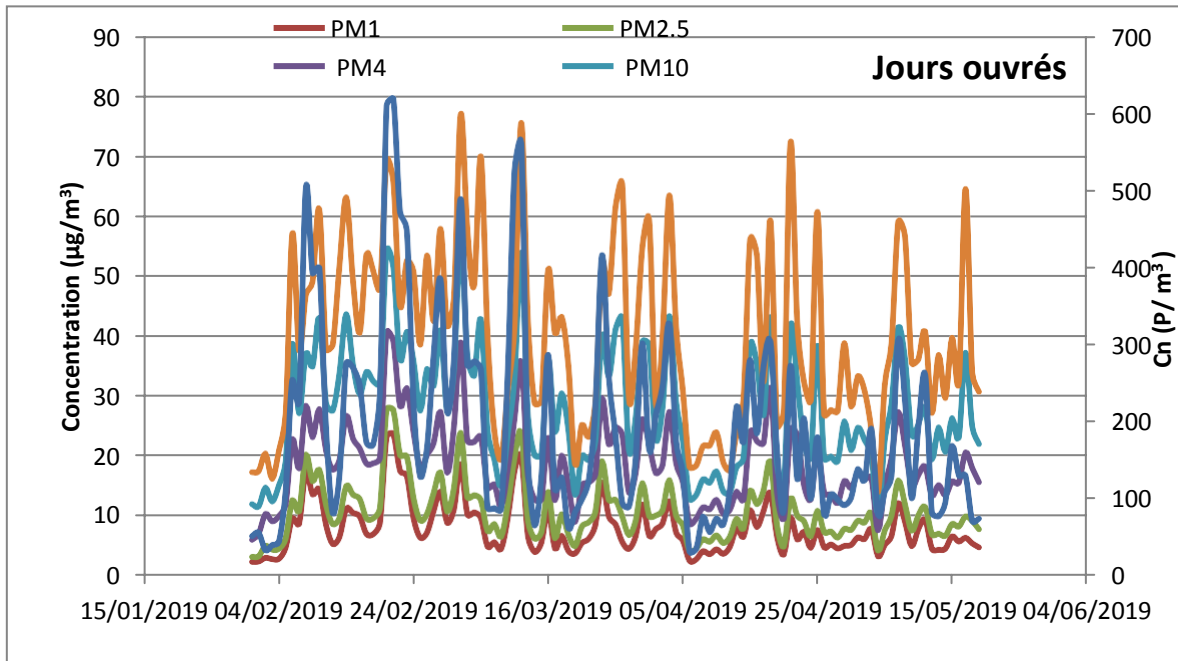


Fig. 51 Concentrations journalières des PM-i nombre de particules durant les jours de semaine.

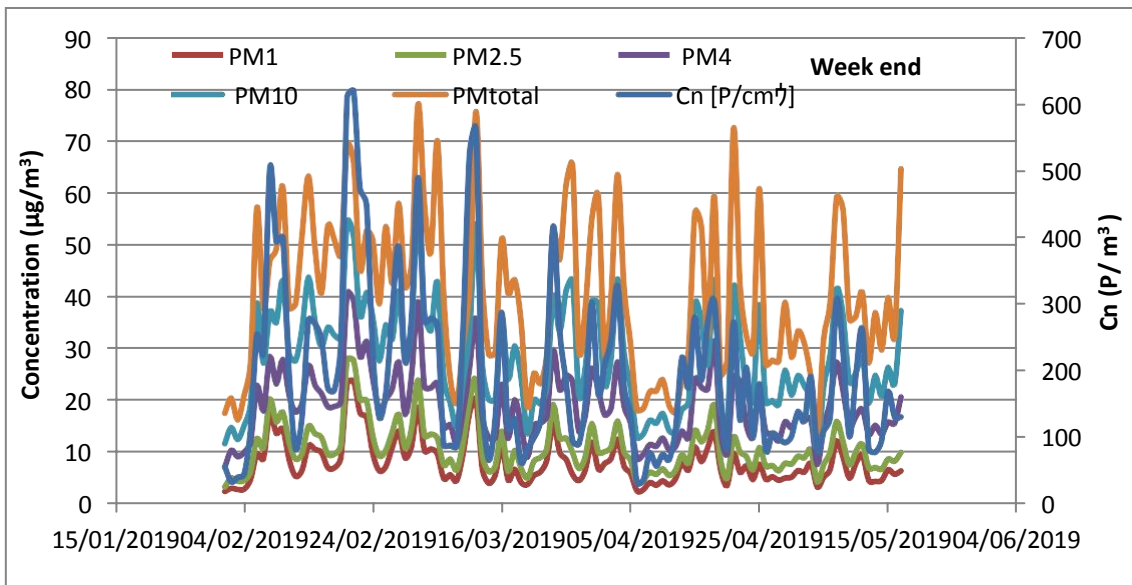


Fig. 52 Concentrations journalières des PM-i et nombre de particules dans l'air durant les Vendredis.

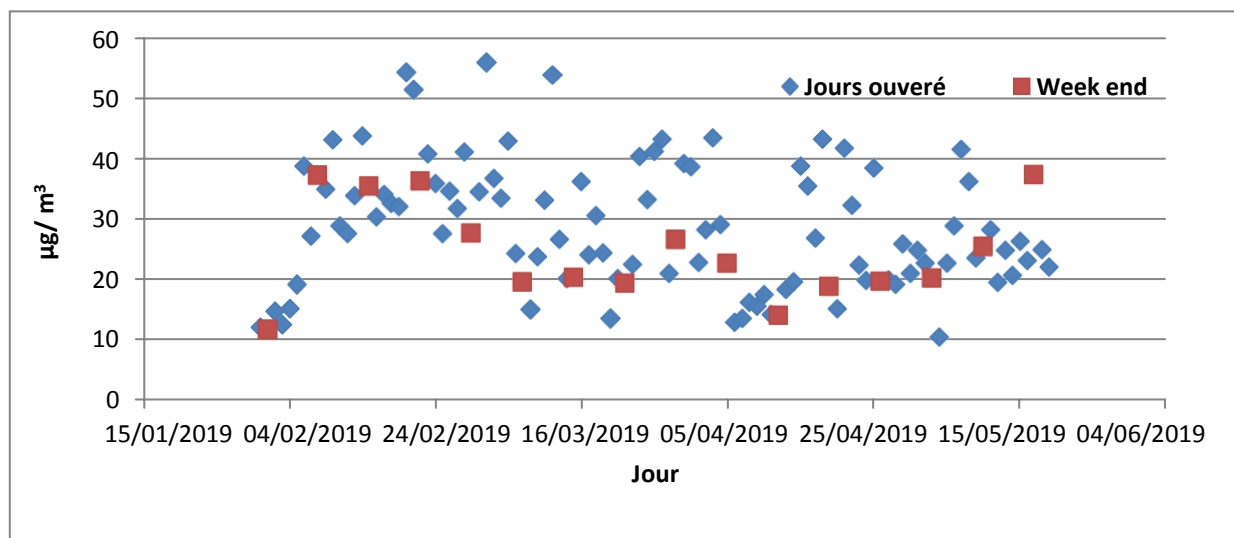


Fig. 53 Concentrations journalières des PM10 dans l'air pendant la durée de l'étude.

Les figures 53, 55 et 56 présentent les concentrations moyennes des PM-10 et PM-2,5 durant les jours de la semaine et le week end, ainsi que la boîte à moustache des PM-i durant le vendredi et les jours ouvrés.

Les jours des weekends sont devenus comme ceux de semaine en termes de concentrations en PM-i, 50% des concentrations en PM-10 varient de 7 à 12,9 et de 8,1 à 10,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en jour et nuit respectivement. Les concentrations des PM-1 et PM-2,5 sont légèrement plus élevés en semaine qu'en weekend. Cette équivalence des niveaux de pollution durant les week ends et les jours ouvrables est probablement due à l'intensité des déplacements motorisés des citoyens qui affluent de partout chaque vendredi au centre d'Alger depuis le 22 Février 2019. En d'autres termes, le vendredi n'est plus un jour de repos avec la réduction de toutes les activités humaines

Tableau 10 Présente les rapports des PM-i jours ouvrable par rapport au weekend.

PM-i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM-1	PM-2,5	PM-4	PM-10	PM-tot	C_n (particules / m^3)
Rapport (j ouvrable/ weekend)	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98

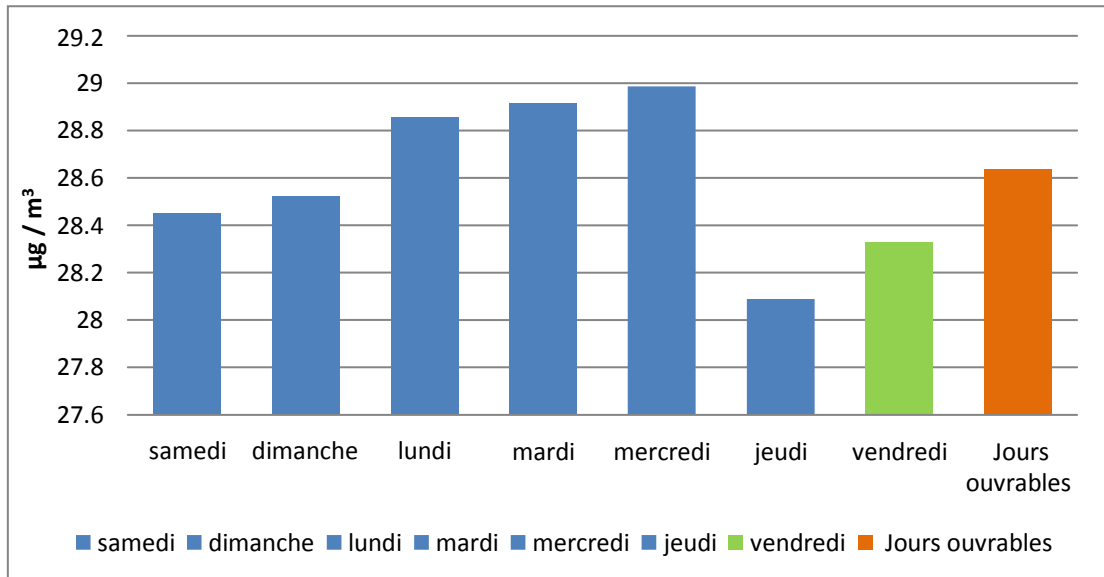


Fig. 54 Concentrations moyennes des PM-10 selon les jours de la semaine.

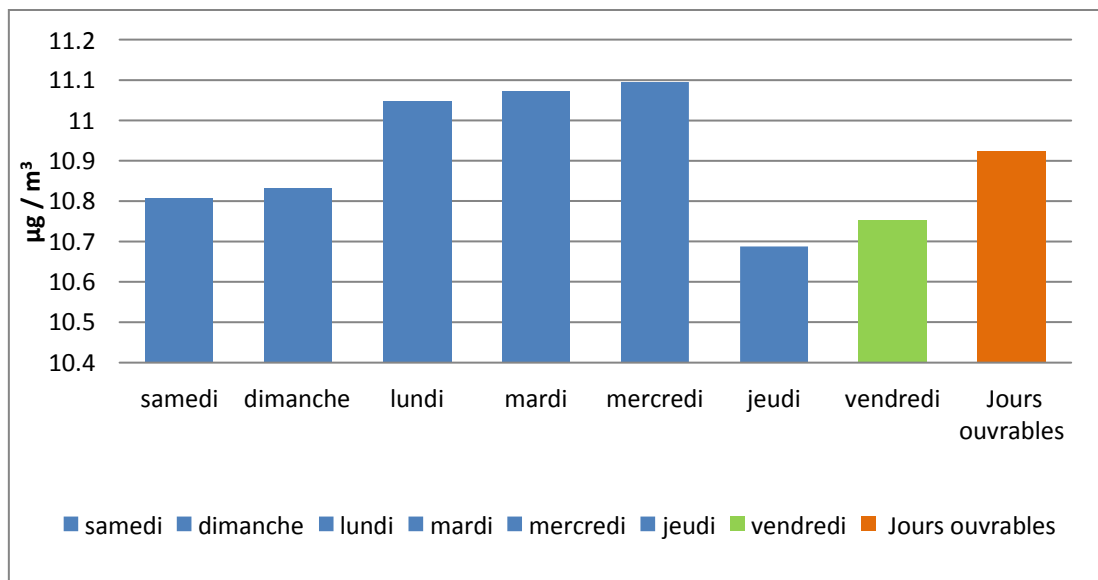


Fig. 55 Concentrations moyennes des PM-2.5 selon les jours de la semaine.

On remarque une légère diminution des concentrations des PM-i durant le vendredi comparé aux jours ouvrables de l'ordre de 2%, ce qui s'explique de la diminution des activités humaines et du transport universitaire durant le vendredi. En situation normale, le vendredi se caractérise par une forte réduction des activités humaines y inclus l'arrêt du transport universitaire ce qui aurait donné une différence significative entre jours ouvrables et vendredi.

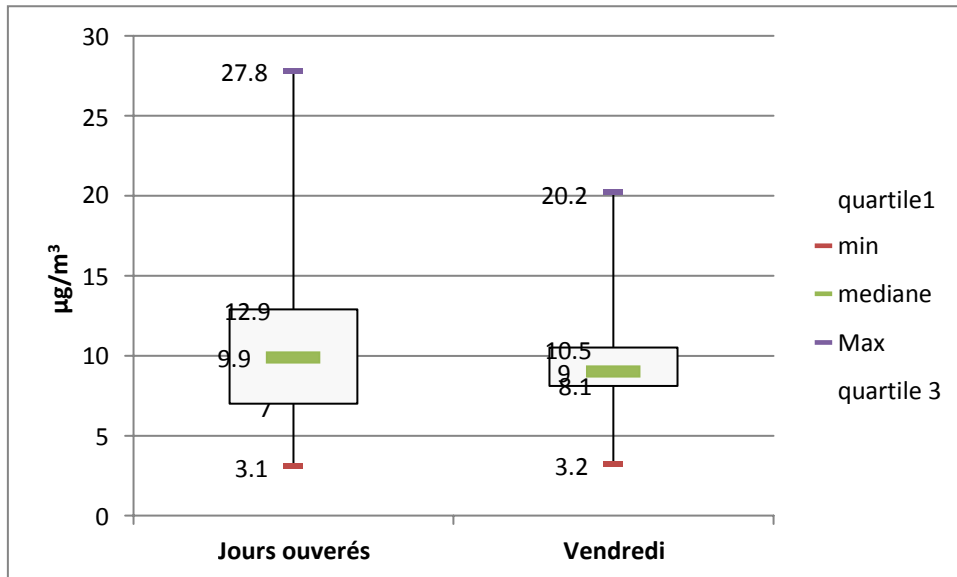


Fig. 56 Boite à moustache des concentrations PM-10.

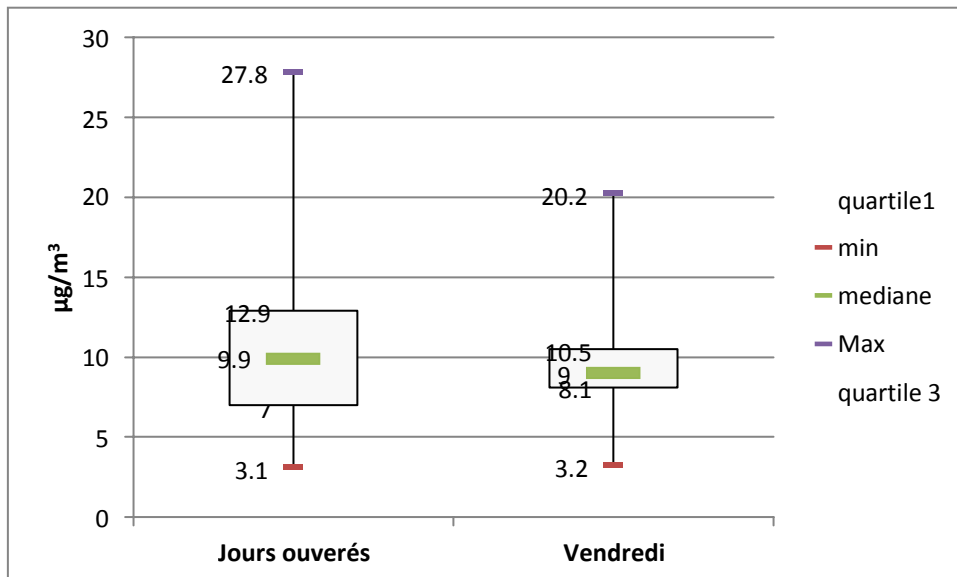


Fig. 57 Boite à moustache des concentrations PM-2,5.

6. Influence des conditions météorologiques

Les données météorologiques sont essentielles pour analyser et mieux comprendre les variations des concentrations et la composition des polluants, car elles conditionnent l'accumulation, la dispersion ou l'entraînement des polluants par lessivage. Les mesures de température et de vitesse de vent sont issues de la station météo de Dar El Beida, du 1 février au 31 avril 2019.

Les figures 58 à 59 illustrent les variations des teneurs en PM-10 et PM-2,5 et les paramètres météorologiques température, vitesse du vent et précipitation

Le niveau des concentrations du 01 au 05/02/2019 était de 10 et 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-10 et PM-tot, respectivement, ce qui coïncide avec une vitesse de vent élevée de 16 m/s et une précipitation de pluie de 22mm. Il y a eu donc dispersion des particules et un lessivage de l'atmosphère.

La période du 07 au 13/04/2019 a enregistré des concentrations de 13 et 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-10 et les PM-tot, respectivement, coïncidant avec une vitesse de vent élevée de 16 m/s qui a fait un abattement de la pollution des jours précédant de 55%.

Des concentrations élevées pour la durée du 01 au 03/03/2019, atteignant une concentration journalière de 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM-10. Une hausse de la température à 30 °C et une vitesse de vent de 15m/s, suggère l'arrivé de masse de vent chaud (vents de sable du Sahara).

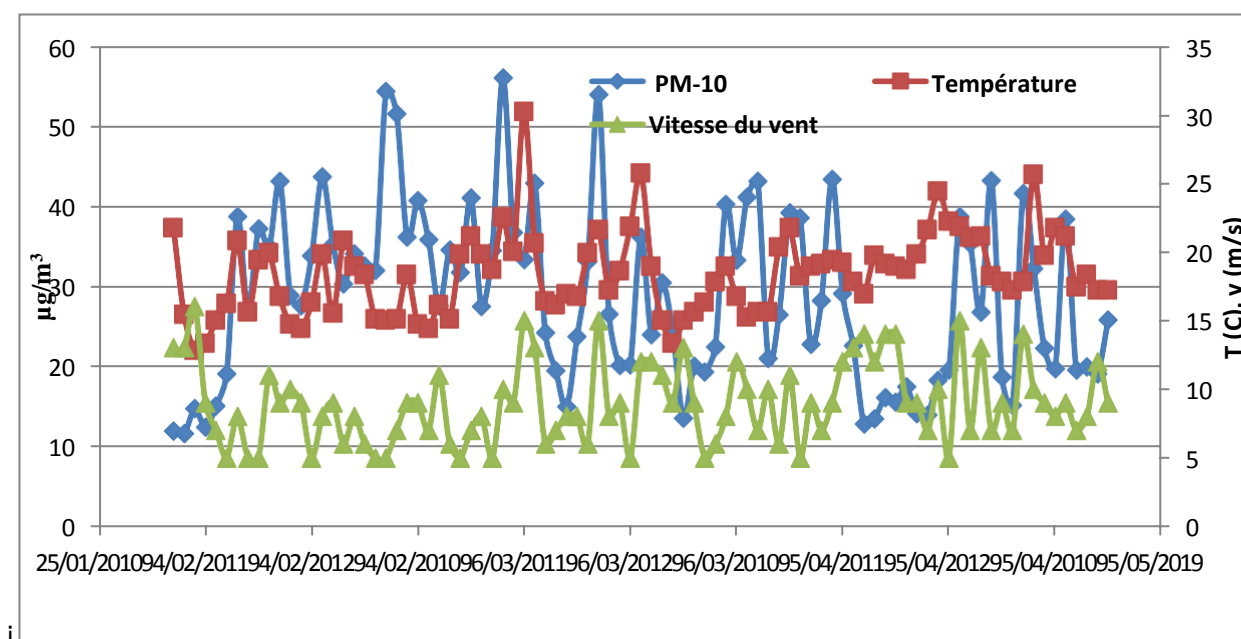


Fig. 58 Evolution des concentrations en PM-10 en fonction de la température et la vitesse du vent.

Les pics de pollution sont principalement causés par des conditions météorologiques particulières, qui ne permettent pas la dispersion des polluants. En effet, le vent permet de disperser les polluants, l'absence de vent favorise donc la concentration des polluants sur leur lieu d'émission. Par contre sa présence n'implique pas l'absence d'une pollution, les vents peuvent ramener avec eux des polluants.

La vitesse du vent est un paramètre important dans l'étude des particules en suspension, car elle est en relation avec la turbulence de l'atmosphère et donc avec la dispersion de poussières. C'est ainsi que les fortes concentrations en particules coïncident le plus souvent avec les faibles vitesses de vent, la dispersion étant alors minimale

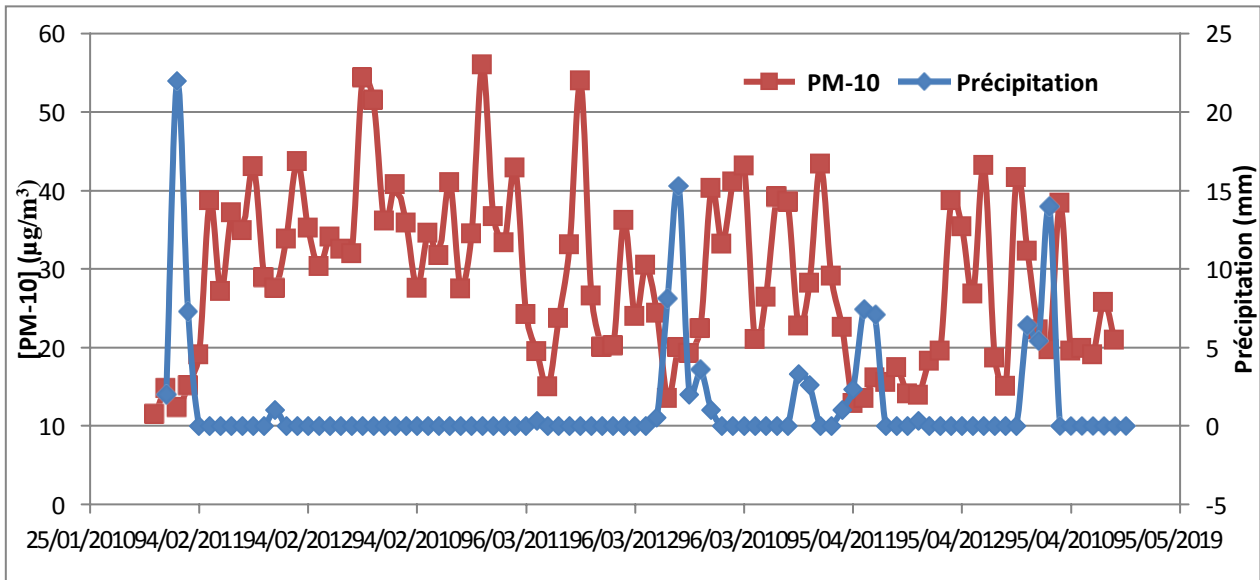


Fig. 59 Variation des PM-10 et des précipitations mesurées à Alger-port.

Globalement, les cinq premiers mois de l'année 2019 a connu une météorologie favorable à une bonne qualité de l'air n'ayant pas entraîné d'épisodes intenses de particules. A l'inverse, en 2017, le niveau en même site urbain (Alger-centre), des situations particulièrement défavorables, couplées à des émissions accrues de particules (vents de sables venant du Sud de l'Algérie) ont conduit à de forts niveaux au printemps avec des moyennes journalières atteignant $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Fellahi et Baaziz, 2017).

7. Corrélations entre les PM-1, PM-2,5 et PM-10

La figure 60 retrace l'allure de l'évolution temporelle des trois classes granulométriques PM-10, PM-2,5 et PM-1 prélevées simultanément. On constate que les PM-10, PM-2,5 et PM-1 suivent une évolution similaire. C'est particulièrement le cas des PM-1 et PM-2,5 qui varient dans le même sens. Cette similitude dans l'évolution suggère que ces particules atmosphériques ont en grande partie la même origine.

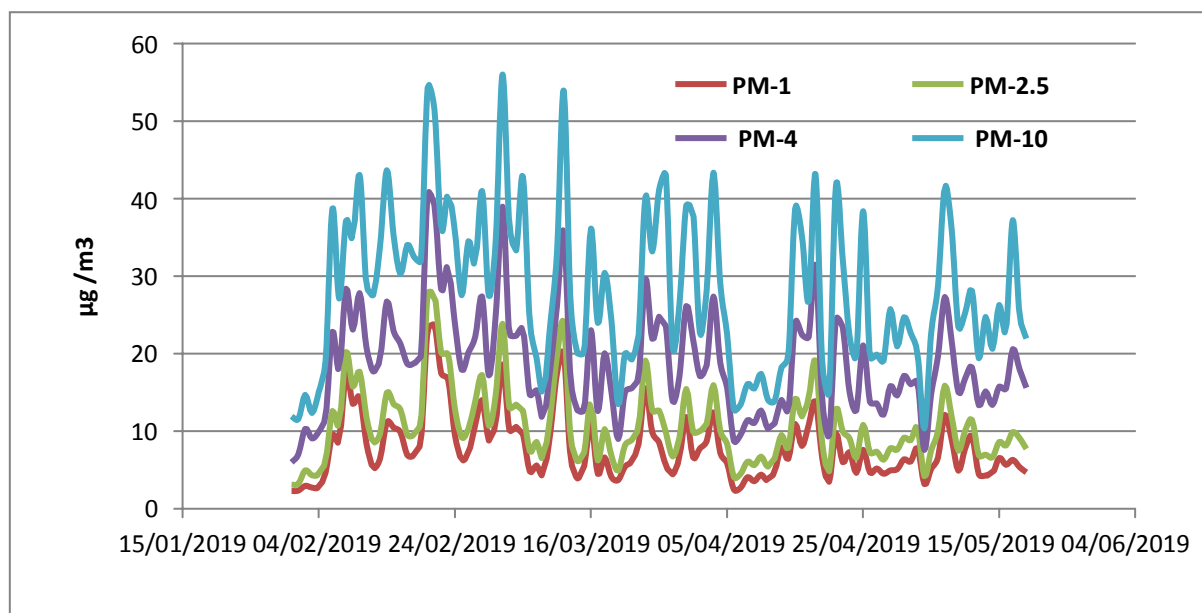


Fig. 60 Évolution des teneurs en PM-1, PM-2,5, PM-4 et PM-10 mesurées à Alger.

Les résultats de l'étude des corrélations mathématiques entre les trois classes de particules sont illustrées en figure 61 sont résumés en tableau 11. Qu'on a une bonne corrélation entre PM-2,5 et PM-1 ($R^2 = 0,9814$).

Tableau 11 Coefficients de corrélations R^2 liant les différentes classes granulométriques à Alger-Centre.

	PM-1	PM-2,5	PM-4	PM-10	PM-tot
PM-1	1				
PM-2,5	0,9814	1			
PM-4	0,8632	0,9364	1		
PM-10	0,6853	0,7687	0,9135	1	
PM-tot	0,5082	0,5865	0,7598	0,9492	1

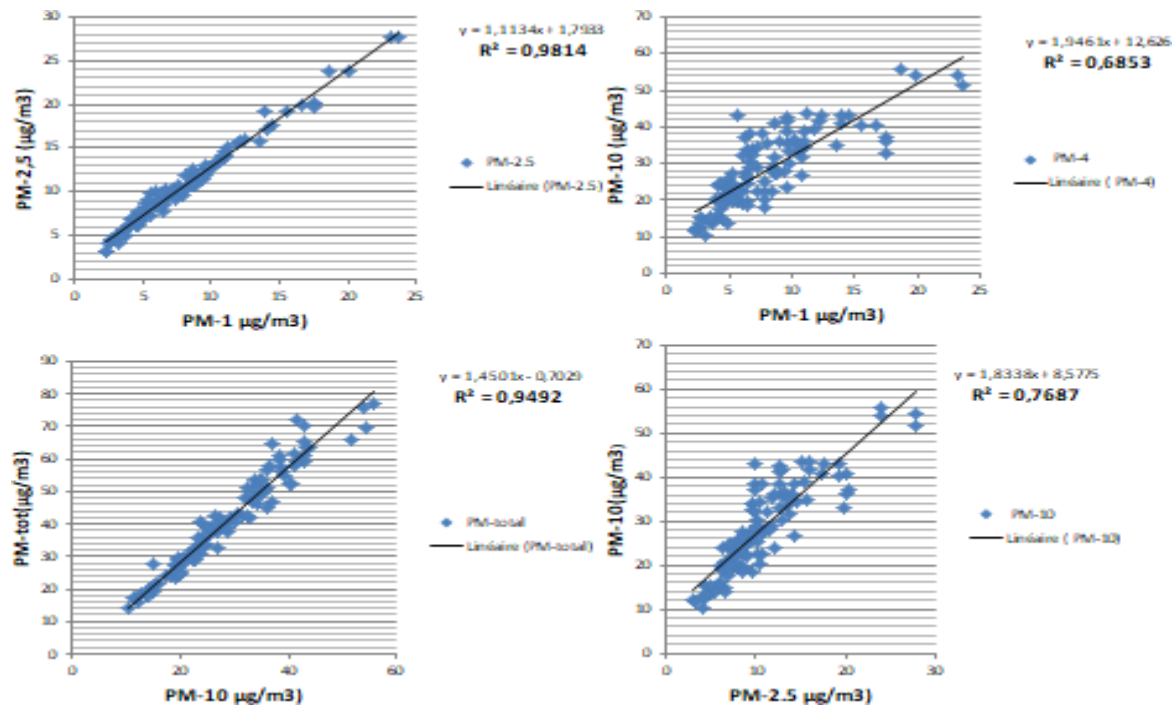


Fig. 61 Corrélation entre PM-i.

Ces résultats montrent qu'on a une bonne corrélation entre les PM-1 et PM-2,5 ($R^2 = 0,9834$). Cette corrélation suggère que les particules fines PM-1 et PM-2,5 sont issues de la même source, en l'occurrence le trafic routier et les particules secondaires qui en découlent (surtout les particules secondaires de nitrates issues de la transformation dans l'atmosphère des NO_x et présentent le même comportement dynamique du point de vue agrégation de particules submicroniques, dispersion et déplacement sous l'action des vents et leur séjour dans l'atmosphère.

Entre les PM-10 d'une part et les PM-1 et PM-2,5 d'autre part, on ne relève pas de corrélation significative ($R^2 = 0,6853$, $R^2 = 0,7687$ respectivement).

Ainsi par exemple, une forte teneur en PM-10 n'induit pas automatiquement une forte teneur en PM-1. Ceci s'explique par le fait qu'une partie importante des PM-10 est constituée de particules grossières qui proviennent de l'érosion des sols.

Ainsi donc, les concentrations en PM-10 ne sont pas étroitement liées aux émissions du trafic routier. Le pourcentage de PM-2,5 dans les PM-10 était de 37% reflétant la prédominance de la fraction grossière des particules liées aux phénomènes d'usure mécanique et de remise en suspension.

Dans notre site de prélèvements, avec des facteurs de corrélations avoisinant 0,9814 pour PM-1/PM-2,5, nous constatons que l'évolution des teneurs en PM-1 est également étroitement liée à l'évolution des teneurs en PM-2,5. Concernant la corrélation PM-1/PM-10, les résultats indiquent

un facteur de corrélation faible de ($R^2=0,6853$). Ce qui confirme la formation des PM-10 est influencé par des sources de pollution autres que celles des particules fines et ultrafines.

De cela, on remarque que l'on obtient une bonne corrélation avec les PM-10 lorsqu'on les compare avec les particules grossières ($R^2 = 0,9492$) contrairement aux PM-2,5, ce qui renforce notre hypothèse des différences des sources des particules fines et les particules grossières mesurées à Alger.

8. Influence du trafic sur les PM-10

L'axe du boulevard Ali Mellah se situe du côté Sud de l'aire d'étude et est considéré comme une source d'émission importante de particules. Il est classé comme voie primaire dans le réseau routier algérien. La figure ci-dessous montre la localisation de cet axe par rapport à l'hôpital. Le poste d'enquête retenu sur cet axe se trouve au niveau de la passerelle tout au milieu de ce tronçon.



Fig. 62 Localisation de l'axe boulevard Ali Mellah.

8.1. Répartition modale du trafic journalier

La répartition modale du trafic journalier est montrée en tableau 12.

Tableau 12 Répartition modale du trafic journalier par sens, Axe boulevard Ali Mellah, sens 1 & 2 [Bureau Etude Trafic Urbain].

	Mode	VL	VU	Poids lourds	Autres (y compris les 2 roues)	Total
Trafic global journalier	1	23288	3120	24	652	27084
	2	13496	2103	48	914	16550
	Sens 1 & 2	36784	5223	72	1555	43634
	%	84,30%	11,97%	0,17%	3%	100,00%

VL= Véhicules légers, VU= véhicules utilitaires,

Ce tableau montre une concentration des Véhicules Légers sur cet axe avec une part de 84,30% du débit global. Cela peut être justifié par la localisation du présent axe dans un milieu urbain et l'accès en force des véhicules légers à l'hôpital. Les Véhicules Utilitaires occupent également une forte proportion pour assurer la livraison urbaine. Il est aussi important de préciser que les véhicules en Algérie comptent une grande partie en diesel (en moyenne nationale, plus du tiers du parc automobile est diesélisé) qui est une source importante d'émission de particules.

Comme le montre le tableau 13, il est clair que le débit de véhicules est plus important durant le jour (de 6h à 22h) avec 84,86%, ce qui explique la différence de pollution entre le jour et la nuit.

Tableau 13 Répartition du trafic journalier par jour de semaine et tranche d'heure, Axe boulevard Ali Mellah, sens 1 & 2 [48].

	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi
De 6h à 22h	11397	10303	10412	11150	11523	11156	10677
Nuit	2033	1867	1540	1539	1551	1265	1766
Moy Veh/H	560	507	498	529	545	518	518
Minimum	10	13	13	11	8	12	13
Maximum	232	221	210	253	251	249	258
De 8 à 9H	875	557	714	977	897	884	814
De 17 à 18H	605	712	552	558	609	611	569
Total Jour	13430	12170	11952	12689	13074	12421	12443

Sur l'axe Ali Mellah à Alger. Le trafic moyen journalier est de 43634 véh/jour. Le profil moyen des jours ouvrés est caractéristique des déplacements domicile-travail, avec deux pics de trafic entre 7h et 9h et entre 16h et 17h. On note par ailleurs qu'il n'y a pas de différence entre les jours du week-end et les jours ouvrables. La nuit, c'est le jeudi et vendredi qu'on a le débit le plus élevé ce qui est tout à fait normal en milieu urbain (sortie et promenades la veille du week-end).

La figure 63 représente les principaux résultats pour le trafic automobile et les concentrations en particules PM-10 sur l'axe Ali Mellah. On remarque le même profil d'évolution durant la journée. La corrélation avec les concentrations en particules est élevée ($R= 0,71$). Les niveaux de pollution enregistrés sont représentatifs d'un milieu urbain de fond avec une influence du trafic automobile avec une forte probabilité de respecter l'ensemble des valeurs limites réglementaires. Il n'est pas certain que les niveaux en PM-2,5 respectent l'objectif de qualité en moyenne annuelle. D'un point

de vue sanitaire, ce sont les particules les plus fines qui sont les plus préoccupantes ; or les particules émises par les pots d'échappement sont de très petite taille (notamment pour les particules diesel qui sont responsables de 87 % des particules émises par le trafic) [49].

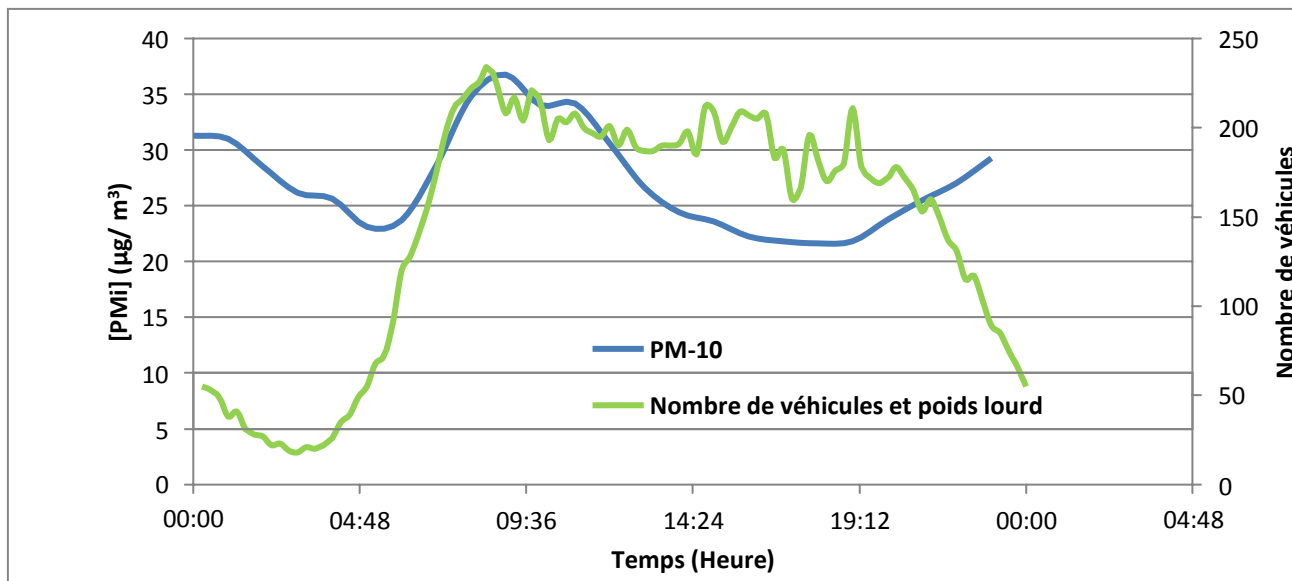


Fig. 63 Variation des PM-10 et nombre de véhicules et poids lourd durant la journée.

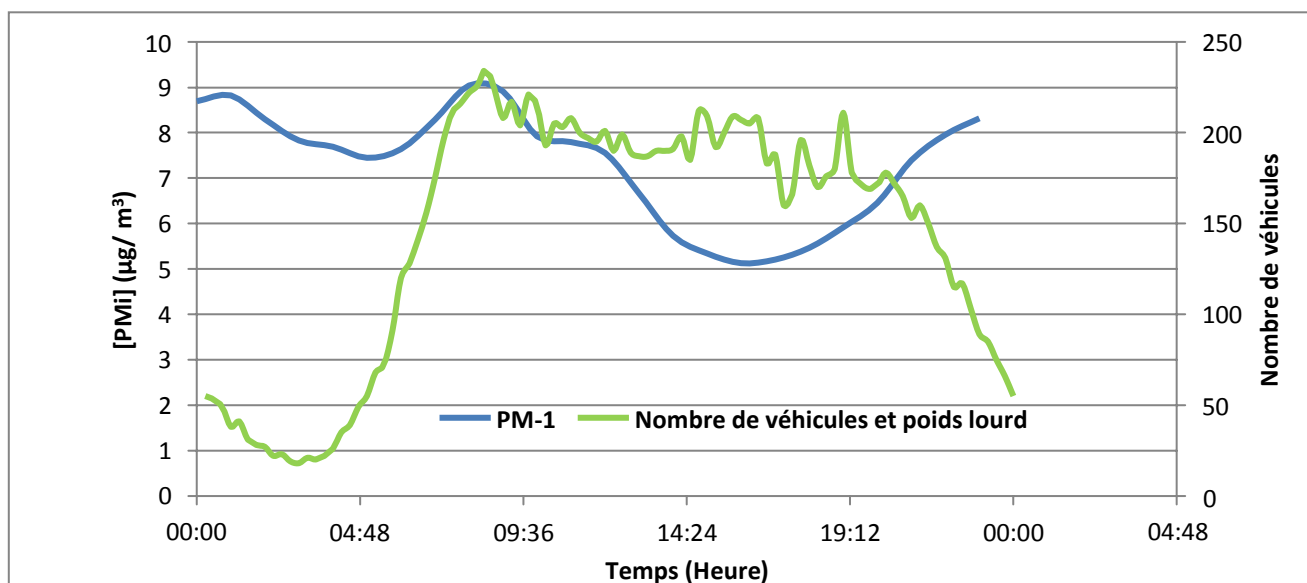


Fig. 64 Variation des PM-1 et nombre de véhicules et poids lourd durant la journée.

9. Etude des concentrations en PM-10 sur des journées atypiques

9.1. Le 1er Mai : la Journée internationale des travailleurs.

Les teneurs en PM-i durant la journée des travailleurs sont très faibles comparativement aux autres journées de mesures. Le maximum de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ le matin entre 8h et 9h (figure 65). En fin de matinée les teneurs diminuent fortement pour atteindre des niveaux ne dépassant pas $6,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-2,5, $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-10 et $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-tot. Ceci montre clairement que la pollution par les particules provient en majorité des activités.

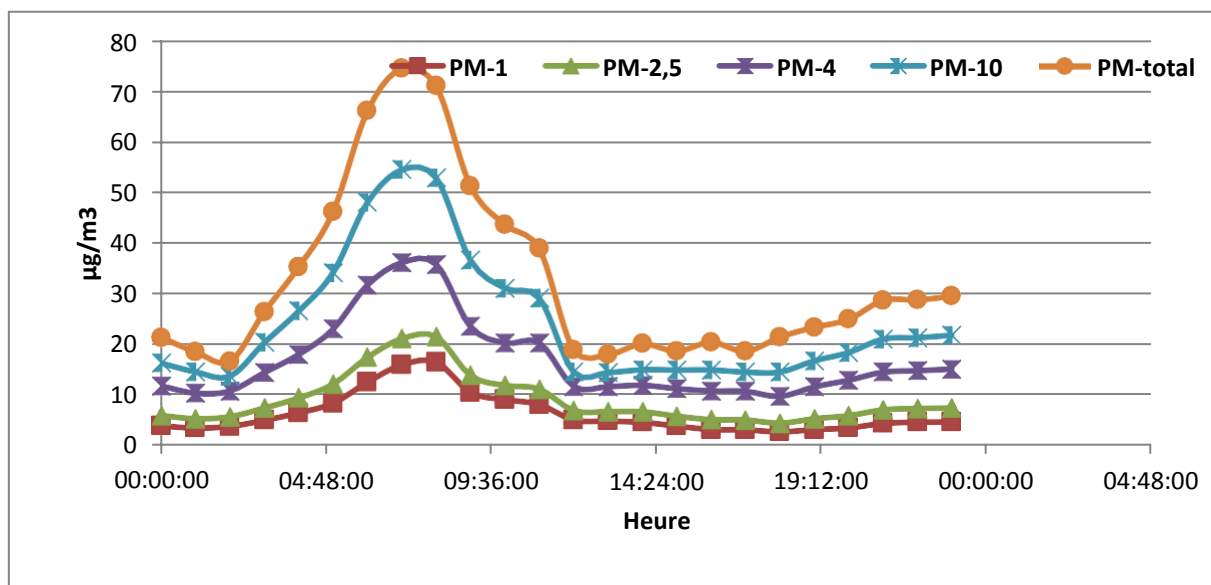


Fig. 65 Evolution des niveaux de PM-i durant le jour du 1er Mai 2019.

9.2. Du 06 au 20 Mai (jours de Ramadans)

Par tradition et par nécessité, le mode de vie durant le Ramadhan change. Les horaires de travail changent, l'activité économique ralentit pendant cette période et certaines activités de jour, sont reportés pour la nuit. Habituellement, c'est la nuit qui connaît le plus d'effervescence. Cette situation conduit implicitement à un changement plus ou moins important dans la quantité des polluants émis dans l'atmosphère et leur évolution temporaire.

Nous enregistrons que les cycles journaliers présentent de faibles teneurs le matin et des niveaux maximum en soirée.

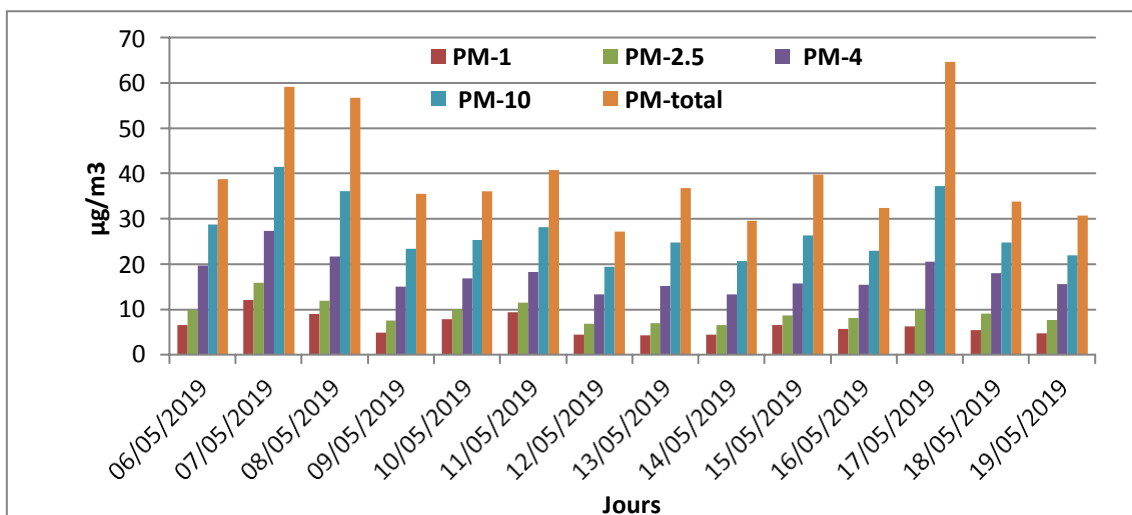


Fig. 66 Evolution des niveaux de PM-i durant le jour du 1er Mai 2019.

On observe également une différence entre le profil des jours ouvrables et du week-end.

Les émissions anthropiques sont censées être plus faibles pendant le week-end vu que la circulation automobile et les activités industrielles sont moins importantes que pendant les jours ouvrables.

On constate en figures 67 et 68 qui représentent l'évolution enregistrée le 06/05 et le 17/05 respectivement, que les profils journaliers sont nettement différents et que pendant les jours ouvrables, la concentration des particules est plus élevée que lors des weekends. Et ces derniers sont plus faibles que les jours normaux de l'année.

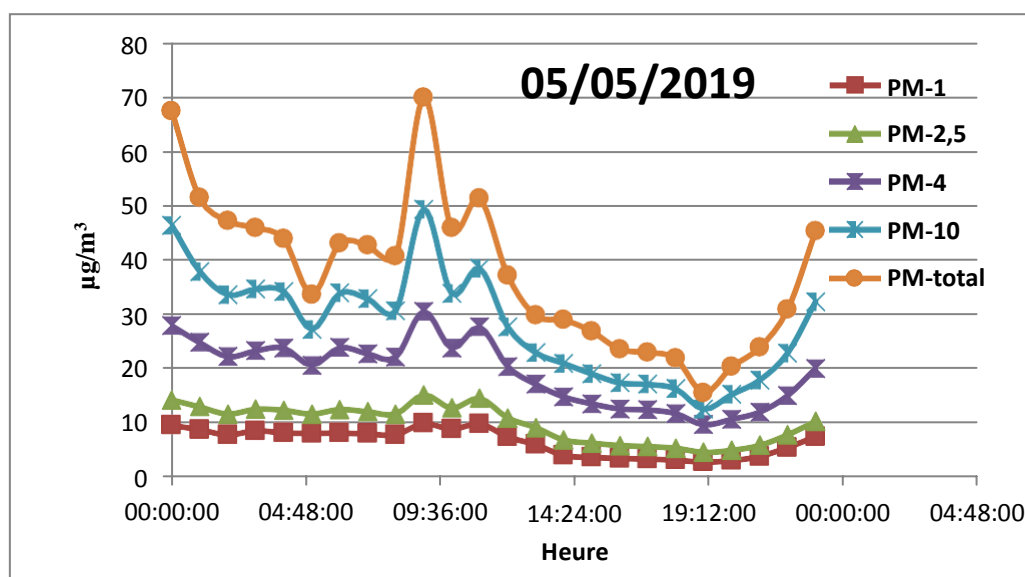


Fig. 67 Variation des moyennes de concentrations des PM-i durant les heures des journées ouvrables pour le 6/5/2019.

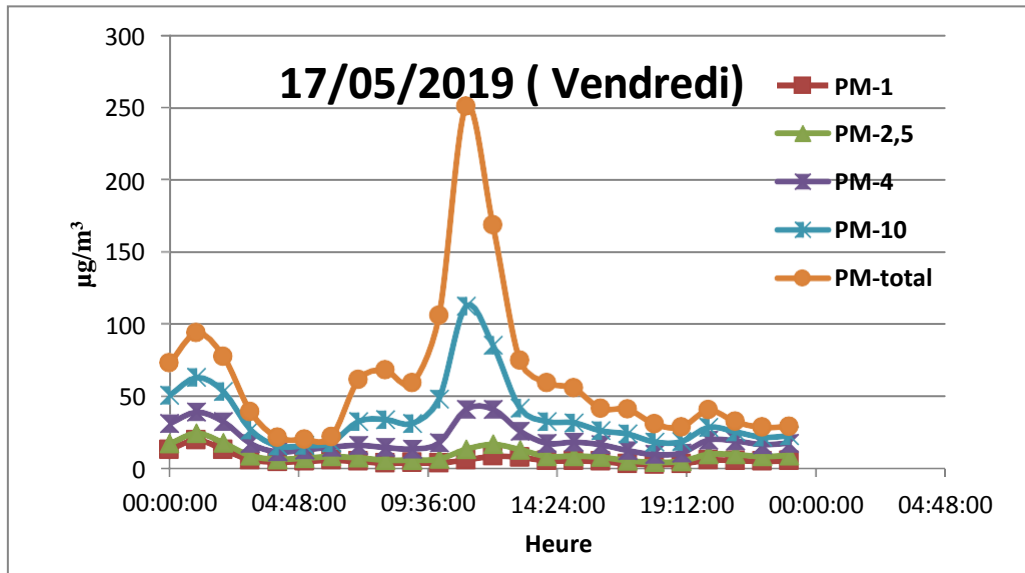


Fig. 68 Variation des moyennes des concentrations en PM-i durant les heures des journées le weekend 17/5/2019.

La figure 69 illustre la comparaison du profil journalier des teneurs horaires moyennes des PM-10 avec le profil des journées du ramadan. Les figures 70 et 71 illustrent celles PM-2,5 et PM-1.

Bien que le nombre de journées du ramadan étudiés est relativement réduit, ces comparaisons montrent le décalage horaire en matinée et également un niveau de pollution plus faible durant le ramadan en particulier en fin d'après midi.

On note également des faibles teneurs enregistrées entre 19 h et 20 h (jusqu'à 18,66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-10) correspondant à la période de l'Iftar où il n'y a pratiquement aucune activité humaine ainsi une teneur de 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 22h et 23h, où, est organisée la prière de Tarawih qui se fait dans les mosquées (figure 69).

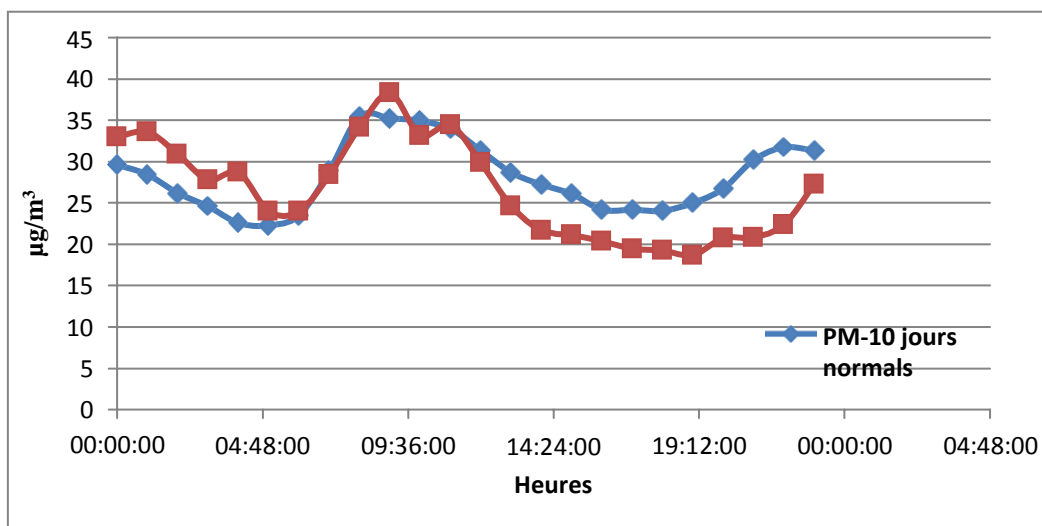


Fig. 69 Comparaison des évolutions des PM-10 avec la période du ramadan.

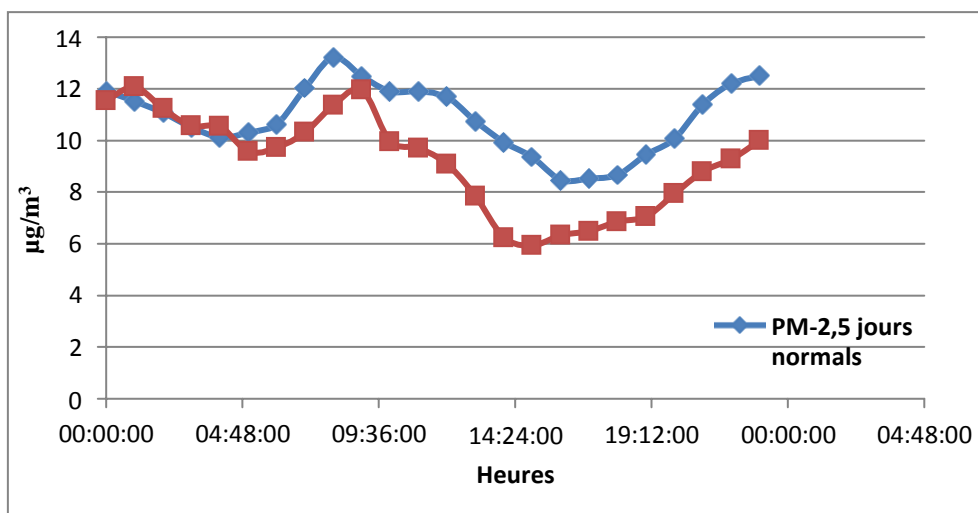


Fig. 70 Comparaison des évolutions des PM-2,5 avec la période du ramadan.

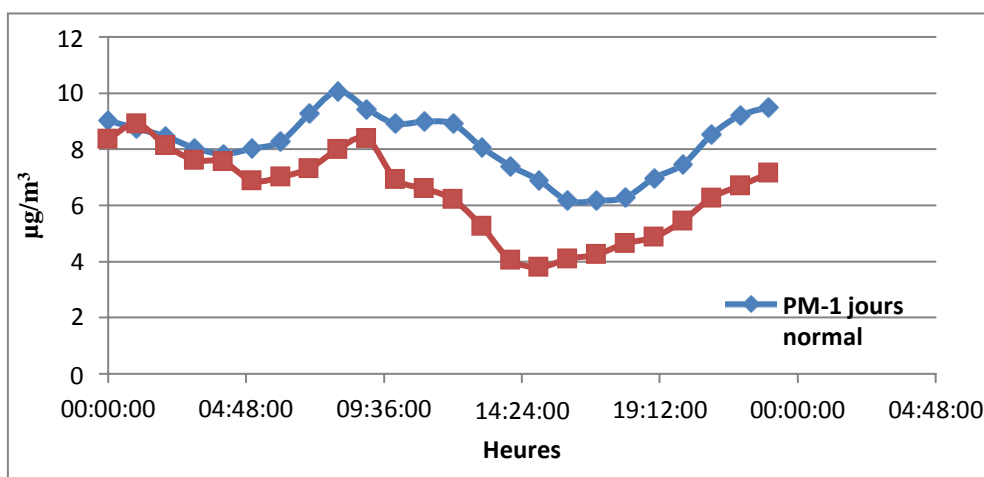


Fig. 71 Comparaison des évolutions des PM-1 avec la période du ramadan.

Tableau 14 Les concentrations des PM-i des jours normaux et durant le ramadan.

PM-i	PM-1	PM-2,5	PM-4	PM-10	PM-total	Cn [P/cm ³]
Jours normale	8,19	10,86	18,84	28,17	39,91	201,7
Jours du ramadan	6,4	9,19	17,19	26,51	38,91	143,4
Rapport PM-i jours(normale)/jours(ramadan)	0,79	0,85	0,91	0,94	0,97	0,71

10. Occurrences des épisodes de pollution :

Dans le but confirmer ce qui a été dit depuis les interprétations que nous avons faites sur les sources de pollution, le début de la partie pratique, il est nécessaire de réaliser une carte météorologique (des sources des vents). En utilisant 480 cartes de rétro trajectoires élaborées en utilisant le modèle Hysplit, nous avons réalisé la carte suivante pour les horaires suivants : 00 :00, 6 :00, 12 :00 et 18 :00. Les résultats des sources des vents sont présentés dans le tableau 15 (voir aussi annexe).

Tableau 15 Sources des vents selon les directions durant la période d'étude.

	NE	NW	E	W	S	L	
00	24	34	3	12	21	9	
%	23,3	33	2,91	11,65	20,38	8,73	
06	17	41	1	23	14	7	
%	16,5	39,8	0,97	22,33	13,59	6,79	
12	16	45	1	22	10	9	
%	15,53	43,68	0,97	21,35	9,7	8,73	
18	14	44	0	18	13	14	
%	13,59	42,71	0	17,47	12,62	13,59	
TOTAL	71	164	5	75	58	39	=412
%	17,23	39,8	1,21	18,2	14,08	9,47	

L : locale

Le tableau montre que les vents dominants sont le NO et à un degré moindre l'Ouest et le NE.

- ❖ 00 :00: les sources prédominantes de vents sont Nord-Ouest avec 34% suivie par le Nord-Est avec 23,3% et du Sud avec un peu plus de 20%. Ce résultat confirme les pics élevés de particules enregistrées la nuit comme présenté auparavant.
- ❖ 06 :00: les sources prédominantes de vents sont Nord-Ouest avec 39,8% ainsi que l'Ouest avec 22,33%. Ces vents entraînent des pics durant les heures de pointe de 7h à 9h dus aux émissions du trafic routier des routes au-dessus de l'hôpital Mustapha Bacha (El Biar, Chevallier...), ainsi que des villes et routes de l'ouest d'Alger.

- ❖ 12 :00: Les sources prédominantes sont Nord-Ouest avec 43,68% et Ouest avec 21,35%, ce qui favorisent l'augmentation des concentrations enregistrées à midi et provenant du centre-ville, du port, Bab-El-Oued et tout le prolongement ouest d'Alger(sources locales et sources lointaines).
- ❖ 18 :00: Les sources de vents à 18h sont dispersées entre le Nord-Ouest avec 42,71%, l'Ouest avec 17,47%, le Nord-Est avec 16,59% et 12,62% pour l'EST. Cette dispersion des sources des vents est responsable de la présence de plusieurs types de particules de différentes tailles et de différentes sources.

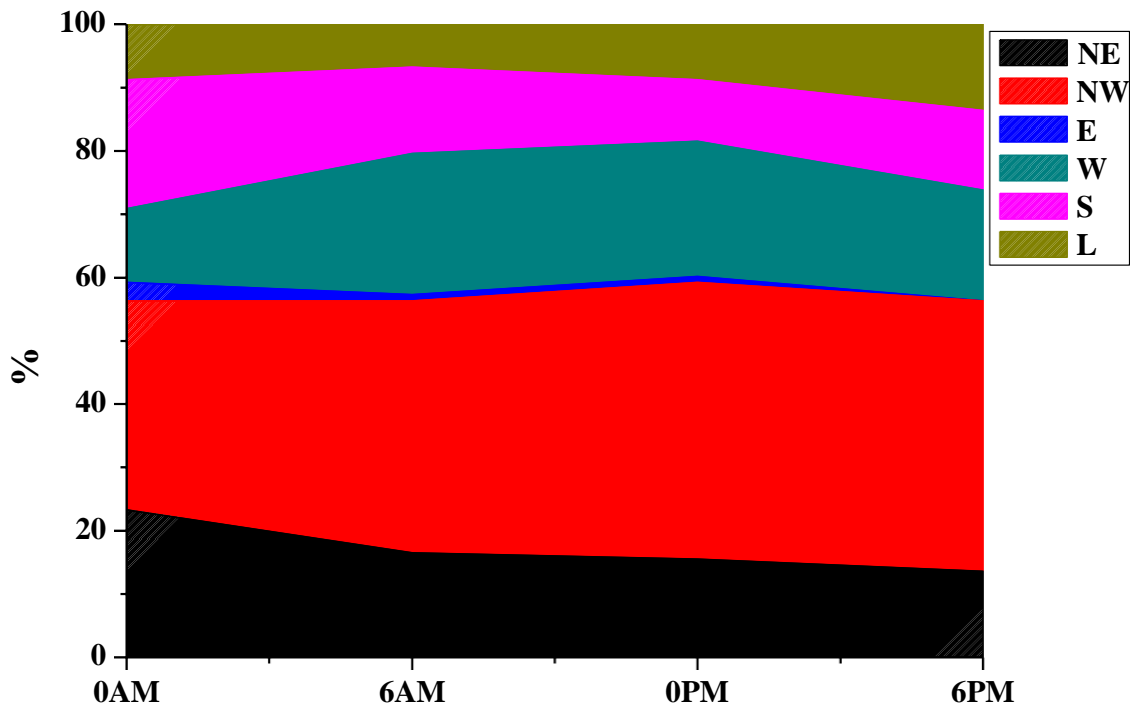


Fig. 72 Carte des sources des vents de la région d'Alger.

Globalement et sur l'ensemble de la période étudiée, on constate que les PM-10 sont associées à des vents dominants du Nord-Ouest avec 39,8% des vents totaux. En effet, les vents du Nord-Ouest sont susceptibles d'entraîner facilement, par resuspension, les poussières de sol vers le site de mesure du fait que cette zone est surélevée par rapport à ce dernier. Le Nord-Ouest est la direction majoritaire qui s'accompagne d'un transport de polluant de la France, l'Espagne et le Portugal.

En second lieu c'est l'Ouest avec 18,2% qui englobe l'ouest du pays et le Maroc et enfin, le Nord-Est avec 17,23% venant de l'Italie et l'Europe centrale et de l'Est d'une manière générale.

Nous remarquons que les moyennes des PM-i à minuit, 6h du matin, midi et 18h sont proches (Tab. 16), ce qui s'explique par la prédominance des sources de vents qui ne sont pas locales. Ce résultat suggère que, le trafic routier local n'est pas le principal responsable des émissions des PM-i.

Tableau 16 Moyennes des PM-i à 0AM, 6AM, 0PM et 6PM de la période d'étude.

	PM-1	PM-2,5	PM-4	PM-10	PM-tot
0AM	7,96	10,65	18,66	28	39,86
6AM	7,98	10,67	18,69	28,05	39,93
0PM	7,98	10,68	18,71	28,08	39,97
6PM	8,01	10,72	18,76	28,15	40,08

The image features a decorative layout with several overlapping shapes. A large, light blue, multi-sided polygon is the central focus, containing the word "Conclusion". To its right, a yellow-outlined rectangle overlaps it. Below the blue polygon, a solid blue square is partially visible. At the bottom of the page, a thick blue horizontal bar spans across, with a grey trapezoidal shape overlapping its right end.

Conclusion

De nombreuses études ont été consacrées aux suivis des concentrations des polluants atmosphériques à travers le monde durant ces dernières années, attribuant une grande importance aux matières particulaires qui sont actuellement reconnues pour avoir un impact majeur sur la santé humaine et les changements climatiques. De nombreuses études épidémiologiques ont associé la pollution atmosphérique, notamment particulaire (PM-10 et PM-2,5), à l'augmentation des taux de mortalité et de morbidité par cause respiratoire et cardiovasculaire et ont montré que l'exposition aux PM-2,5 peut engendrer plusieurs formes de pathologies respiratoires, y compris la bronchite et l'asthme, ainsi que des maladies cardiovasculaires et de cancer du poumon.

En raison de sa localisation sur le bassin méditerranéen, plusieurs facteurs influencent la qualité de l'air en Algérie tels que les tempêtes de poussière provenant du Sahara, le transport à longue distance de polluants provenant de l'Europe, l'enrichissement des masses d'air par des aérosols marins ainsi que le faible niveau de précipitation accompagné d'un rayonnement solaire intense. En plus de ces inévitables sources, la principale source de pollution atmosphérique à Alger demeure le trafic routier étant donné que l'activité industrielle est peu développée. Les émissions dues au trafic routier peuvent être directes suite à la combustion des combustibles fossiles, et indirectes suite à l'usure des pneus et des freins ainsi qu'à la remise en suspension des particules déposées en raison de la turbulence générée par les roues. Les particules issues des freins, des pneus et celles remises en suspension peuvent contenir des substances toxiques et cancérigènes notamment des métaux lourds et des HAP.

Très peu d'études ont été réalisées à Alger sur l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique ou des études épidémiologiques afin de déterminer le lien entre la pollution atmosphérique et la survenue des maladies respiratoires, des morbidités et des mortalités. Selon le rapport de l'OMS 2016, les de décès prématurés causés par les PM-2,5 en Algérie sont d'environ 11400 décès par an [45].

Notre étude avait pour objectif de faire un état des lieux de l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines à Alger, sous influence urbaine, durant la période Février-Mai 2019.

La mesure en continue sur le site d'Alger, permet d'identifier en temps réel les sources à l'origine des dépassements de seuils, et donc d'adapter les actions à mettre en œuvre pour diminuer la pollution par les particules.

A l'issu de ce travail, nous avons pu constater que les concentrations des PM-10 varient de 10,35 à 50,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, contre 3,11 à 27,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM-2,5. Les PM-4 quant à elles, varient de 5,96 à 40,65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les PM-2,5 sont très proche de l'objectif de qualité de l'OMS (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), par contre la moyenne PM-1 est de 7,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui avoisine la valeur annuelle de la norme OMS pour les PM-2,5, la valeur maximale des PM-1 enregistrée atteint 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{jour}$ et 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{heure}$, la

proportion de PM-1 représente environ 70% des émissions de PM-2,5. Cette classe granulométrique est toxique et atteint le sang et les autres organes, ce qui nécessite de la prendre plus au sérieux.

L'évolution fluctuante des niveaux journaliers et mensuels est mise en évidence et est expliquée par l'influence des facteurs météorologiques. Dans ce contexte, on montre que c'est le mois de Mars qui accuse les taux de pollution les plus élevés. On a une diminution des taux de PM-10, cette tendance nous paraît irréaliste du fait que Alger a connu ces dernières années une croissance extraordinaire du parc automobile et que les installations industrielles sont toujours aussi polluantes que durant le passé. Nous avons discuté les raisons susceptibles d'avoir influencé notre étude qui reste très ponctuelle. La diminution des activités humaines dues aux événements qui ont secoué l'Algérie par l'activité des manifestants depuis le 22 février 2019 et le changement des habitudes des personnes durant le Ramadhan peuvent en être les causes.

Ce site urbain subit l'influence des émissions du trafic routier utilisant en grande partie l'essence plombée et le diesel. Ces émissions proviennent des grands axes routiers de la ville. La durée de 7h à 9h est la durée la plus élevée en terme de concentration de pollution. Les cas particuliers, comme l'influence d'incendie, le vendredi, journée du Hirak ou les changements induits par le mois du Ramadhan, ont été examinés. Il en résulte des profils de pollution différents des journées ordinaires.

La carte météorologique (des sources des vents) nous a informés que le vent le plus dominant sur le site d'étude sont Nord-Ouest de près de 40%. L'axe d'Ali Mellah contribue donc à l'augmentation des concentrations en PMi au sein de l'hôpital. Globalement, dans ce site qui héberge des personnes malades et donc très vulnérables, la pollution de l'air par les particules présente un potentiel de nuisance élevé et ce, de part la finesse des particules et du plomb qui leur est associé.

L'impact du trafic routier étant clairement mis en évidence, c'est sur cette source émettrice que des mesures doivent être prises pour réduire les niveaux de pollution par les particules fines.

L'accès gratuit à un air pur est un besoin et un droit fondamental pour tous les citoyens. En Algérie, le problème de la pollution atmosphérique devient une préoccupation majeure de santé

publique, surtout en absence de nouvelles lois sur la qualité de l'air et/ou l'absence d'application des lois existantes qui permettraient de réduire les émissions, et par conséquent d'améliorer la qualité de l'air. Par conséquent, les premières mesures à prendre devraient être tournées vers les moyens de transport, de manière à réduire les émissions atmosphériques liées au trafic routier. De plus, les citoyens devraient adopter une attitude plus respectueuse de l'environnement, de manière à contribuer, à leur niveau, à une amélioration de la qualité de l'air. Parmi les solutions possibles, il apparaît urgent que l'Algérie acquiert des bus roulant au Gaz naturel comprimé (GNV) comme c'est le cas de plusieurs villes en Europe. A notre avis, il n'est pas insensé d'exiger le remplacement de la flotte des bus du transport universitaire par des bus non polluants. Dans le même ordre d'idée, il faut continuer à encourager la bicarburation essence – GPL chez les véhicules légers. Il faudrait également explorer la possibilité de voies réservées aux bus à fins de réduire le temps de trajet et de renforcer la confiance du consommateur dans le service public. C'est une mesure prioritaire, absente en Algérie, qui permettrait la fluidification du trafic et atténuerait donc la pollution atmosphérique.

En fin réviser la réglementation algérienne en ce qui concerne la lutte contre la pollution de l'air par les particules qui s'avère une obligation en particulier les particules très fines comme les PM1 qui sont les plus dangereuses pour la santé humaine et la mise en place d'aides financières pour permettre de parfaire et/ou de mettre en œuvre un ou des programmes de lutte contre la pollution atmosphérique. Cela passe, par exemple, par la promotion de technologies innovantes et non émettrices de gaz à effet de serre telles que les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Mettre en place des programmes scientifiques de recherche et de surveillance de l'environnement. Mettre des études de prévision de la qualité de l'air au niveau national à partir de plusieurs modèles de l'état de l'art permettant de réaliser des prévisions fiables.

Dans les perspectives de ce travail, il serait bien de faire des études toxicologiques, elles demeurent cependant un des maillons essentiels parmi l'ensemble des éléments qui aboutissent à l'évaluation du risque.

Les résultats de ce travail seront poursuivis par M. Merabet Hamza pour finaliser l'étude de l'impact des particules atmosphériques sur la santé humaine en collaboration avec les professeurs du CHU Mustapha Bacha, les effets sur le rayonnement et les énergies renouvelables pour une valorisation sous forme de publication internationale indexée.



Bibliographie

- [1] Fontan, Jacques. *Les pollutions de l'air les connaître pour les combattre*. Vuibert, 2003 [Culture scientifique]. 198.
- [2] Masclet, Pierre. *Pollution atmosphérique causes, conséquences, solution, perspectives*. Ellipses Marketing, 2005 [Technosup]. 211.
- [3] Quénel, Q. (1997). Pics de pollution atmosphérique et santé publique : la place de l'épidémiologie. Récupéré sur Rapport de l'Unité Sant Environnement du Réseau National de Santé Publique: http://www.invs.sante.fr/publications/Pics_Pollu/index.html.
- [4] (HMSO, 1954). Mortality and morbidity during the London smog of December 1952. Reports on Public Health and Medical, London.
- [5] M.Allouche, «Mémoire de Projet Fin d'Etude: pollution de l'air par les particules fines en milieu urbain à Alger,» Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.
- [6] Bourboulon, I. (1997, décembre). Des villes asphyxiées par l'automobile. Le monde diplomatique.
- [7] "Structure de l'atmosphère" science-climat-energie. <science-climat-energie.be>.
- [8] Prospero, Long term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States: Implications for regional air quality, Atmospher, AGU100 (1999).
- [9] Keith Griffin, Azizur Rahman Khan , Amy Ickowitz., Poverty and the Distribution of Land, Journal of Agrarian change (2002).
- [10] Zhonglin Xu. Fundamentals of Air Cleaning Technology and Its Application in Cleanrooms (SPRINGER) China Academy of Building Research Beijing, China, People's Republic,2014.
- [11] Buseck, PR. et Schwartz SE. "Tropospheric Aerosols." Elsevier Ltd 4 (2014): 96-134.
- [12] Oucher. N, «Mémoire de Projet Fin d'Etude: contribution à l'étude, par classe granulométrique, des aérosols particuliers sur un site de proximité a L'ENP,» Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007.
- [13] C. Elichegaray, S. Bouallala, A. Maitre, M. Ba « état et évolution de la Pollution atmosphérique » Revue Française d'Allergologie - Vol. 50 - N° 4 - p. 381-393, 2009.
- [14] Boris Quennehen, Alfons Schwarzenboeck, A. Matsuki, J. F. Burkhart, A. Stohl, Gérard Ancellet, Kathy S. Law, Anthropogenic and forest fire pollution aerosol transported to the Arctic: observations from the POLARCAT-France spring campaign, volume 12, 6437-6454, 2012.

- [15] Kang, M., Ren, L., Ren, H., Zhao, Y., Kawamura, K., Zhang, H., Wei, L., Sun, Y., Wang, Z., Fu, P., Primary biogenic and anthropogenic sources of organic aerosols in Beijing, China: Insights from saccharides and *n*-alkanes, *Environmental Pollution* (2018).
- [16] Kalberer, M., Aerosol Physics and Chemistry, Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Elsevier Ltd (2015).
- [17] Bhuyan P1, Deka P1, Prakash A1, Balachandran S2, Hoque RR3. Chemical characterization and source apportionment of aerosol over mid Brahmaputra Valley, India;234:997-1010; Dec 212017
- [18] Curtius, Joachim. Nucleation of atmospheric aerosol particles, C. R. Physique, Elsevier Ltd (2006).
- [19] P. Le Cloirec, « Procédés de dépollution des émissions gazeuses industrielles » J3921 v2,10 février. 2016.
- [20] H. Seinfeld N. Pandis .Atmospheric chemistry and physics From Air Pollution to Climate Change, Pandis.- 2nd ed. Canada .2006.
- [21] Kerbachi R. : Cours de pollution atmosphérique 5ème année, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005.
- [22] Putaud et al., A European aerosol phenomenology, Elsevier, Atmospheric environment. 44(10). p.1308-1320, (2010).
- [23] P. Masclet1 et H. Cachier L'aérosol atmosphérique. Caractéristiques physico-chimiques , Laboratoire TEPE (Transferts et Effets des Polluants dans l'Environnement), Équipe LESAM (Études des Systèmes Atmosphériques Multiphasiques), ESIGEC – Université de Savoie, 73376 Le Bourget du Lac, France 2 Centre des Faibles Radioactivités CEA, Av. de la Terrasse, 91190 Gif-sur-Yvette, France, ANALYSIS MAGAZINE, 1998, 26, N° 9.
- [24] M.Bendada, «Mémoire de Projet Fin d'Etude: évaluation de la pollution de l'air par les particules fines en site urbain à Alger,» Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2006.
- [25] S. Selhi, «Mémoire de Projet Fin d'Etude: par classe granulométrique, de la pollution de l'air par les particules fines en site semi urbain à Alger. Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007.
- [26] Zhang, Hanyu., Cheng, Shuiyuan., Li; Jianbing., Yao, Sen., Wang, Xiaoqi,. Investigating the aerosol mass and chemical components characteristics and feedback effects on the meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China, Environmental Pollution, Elsevier Ltd (2018).

- [27] Marano F, Aubier ML, Brochard P .Impacts des particules atmosphériques sur la santé : aspects toxicologiques Environnement, Risques & Santé Volume 3, numéro 2, Mars-Avril 2004.
- [28] Yu Jin Kim , In Gyu Song , Kyoung-Nam Kim, Min Sun Kim, Sung-Hoon Chung, Yong-Sung Choi and Chong-Woo Bae “Maternal Exposure to Particulate Matter during Pregnancy and Adverse Birth Outcomes in the Republic of Korea “,MDPI , Int. J. Environ. Res. Public Health, 16, 633.2019.
- [29] Pedersen M, Giorgis-Allemand L, Bernard C, Aguilera I, Andersen AM, Ballester F, Beelen RM, Chatzi L, Cirach M, Danileviciute A, Dedele A, Eijsden Mv, Estarlich M, Fernández-Somoano A, Fernández MF, Forastiere F, Gehring U, Grazuleviciene R, Gruzieva O, Heude B, Hoek G, de Hoogh K, van den Hooven EH, Håberg SE, Jaddoe VW, Klümper C, Korek M, Krämer U, Lerchundi A²¹, Lepeule J, Nafstad P, Nystad W, Patelarou E, Porta D, Postma D, Raaschou-Nielsen O, Rudnai P, Sunyer J, Stephanou E, Sørensen M, Thiering E, Tuffnell D, Varró MJ, Vrijkotte TG, Wijga A, Wilhelm M, Wright J, Nieuwenhuijsen MJ, Pershagen G, Brunekreef B, Kogevinas M, Slama R .Ambient air pollution and low birthweight: a European cohort study (ESCAPE). ScienceDirect . October 15, 2013.
- [30] Richard W. Boubel , Donald L. Fox, D. Bruce Turner, Arthur C. Stern .Fundamentals of Air Pollution fourth edition , Elsevier Inc ; 2008
- [31] Air quality in Europe — report, European Environment Agency, Luxembourg, 2014.
- [32] Dongjie, Shang., Min, Hu., Qingfeng, Guo ., Qi, Zou., Jing, Zheng., Song, Guo., Effects of continental anthropogenic sources on organic aerosols in the coastal atmosphere of East China Dongjie Shang, Environmental Pollution, Elsevier Ltd ;229:350-361(2018).
- [33] William Wilson , Candis Claiborn , Brooke L. Hemming ,Air quality criteria for particulate matter Volume I and II U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA 600/P-99/002aF-bF 2004.
- [34] Frédéric Elie ,Les aérosols atmosphériques et leurs influences sur le climat ; <http://fred.elie.free.fr> - page 1 / 40 ;July 2009.
- [35] Braun-Fahrländer C1, Vuille JC, Sennhauser FH, Neu U, Künzle T, Grize L, Gassner M, Minder C, Schindler C, Varonier HS, Wüthrich B.respiratory health and long term exposure to air pollutants in, suisse school children. SCARPOL Team. Swiss Study on Childhood Allergy and Respiratory Symptoms with Respect to Air Pollution, Climate and Pollen. 1997.
- [36] Tianlei Pi, Hongyan Wu, Xiaotong Li, Does Air Pollution Affect Health and Medical Insurance Cost in the Elderly: An Empirical Evidence from China , Sustainability 2019, 11, 1526 www.mdpi.com/journal/sustainability 7 mars 2019.

- [37] H.Merabet. Pollution atmosphérique par les particules dans la région MENA, Recherche et Développement, 2015.
- [38] André Fougeroux, Solenne Leylavergne, Vincent Guillemar, Olivier Geist, Pauline Gary, Charlotte Cenier, Edith Caumes-Sudre, Christopher Senechal et Bernard Vaissière. Effet de l'activité des insectes pollinisateurs sur la pollinisation et le rendement du tournesol de consommation. Publié par EDP Sciences, Volume 24, Number 6, 2017.
- [39] A, Ghan., C, Catherine., b, Chuang., E, Joyce and Penner b., A parameterization of cloud droplet nucleation part I: single aerosol type Steven, Atmospheric Research, Elsevier (1992).
- [40] Lignes directrices de l'OMS: <https://www.who.int/publications/guidelines/year/fr//,2016>
- [41] Manuel du Fidas 200.
- [42] Md. ArfanAlia, Md. MonirulIslamb, Md. NazrulIslama, MansourAlmazrouia., Investigations of MODIS AOD and cloud properties with CERES sensor based net cloud radiative effect and a NOAA HYSPLIT Model over Bangladesh for the period 2001–2016, Atmospheric Research ,Volume 215, Pages 268-283, Elsevier (2019).
- [43] MODIS, [Online]. Available: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>.
- [44] A.Talbi , Y.Kerchich , R.Kerbachi , M.Boughedaoui , Assessment of annual air pollution levels with PM1, PM2.5, PM10 and associated heavy metals in Algiers, Environmental Pollution 232 (2018) 252e263,Algeria.
- [45] Peng Mao , Jie Li , Lilin Xiong , Rubing Wang , Xiang Wang , Yongtao Tan and Hongyang Li ,CharacterizationofUrbanSubwayMicroenvironment Exposure—A Case of Nanjing in China ,Enviromental Research and Public Health, MDPI, 17 February 2019.
- [46] Fellahi, Baaziz, suivi en continu de la pollution de l'air par les différentes fractions de PMi, Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du titre d'ingénieur d'état en Génie de l'Environnement, 2017.
- [47]D.G.Kaskaoutisa, A.RashkibU. C.Dumkac, A.Mofidid, H.D.Kambezidisa, B.E.Psilogloua, D.Karagiannisa, K.Petrinolia, A.Gavriila. Atmospheric dynamics associated with exceptionally dusty conditions over the eastern Mediterranean and Greece in March 2018.
- [48] Bureau Etude Trafic Urbain.
- [49] LUCAS, La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique in société française de sante publique, p. 58. 1996
- [50] Jemal et al., Cancer statistics, Online ,60(5):277-300, 2010.

[51] Journal officiel de la république Algérienne, Décret 6, 2006.

[52] Carine Milcent, « Évolution de l'organisation du système de santé », Perspectives chinoises [En ligne], 4 |. URL : <http://journals.openedition.org/perspectiveschinoises/7523>. 2016



Annexes

Tableau résumant les données statistiques des rétro trajectoires obtenu par le modèle hysplit

OO h	NE	NW	E	W	S	L
01/02/2019			1			
02/02/2019			1			
03/02/2019		1				
04/02/2019		1				
05/02/2019		1				
06/02/2019		1				
07/02/2019		1				
08/02/2019		1				
09/02/2019		1				
10/02/2019						1
11/02/2019			1			
12/02/2019		1				
13/02/2019		1				
14/02/2019		1				
15/02/2019	1					
16/02/2019	1					
17/02/2019	1					
18/02/2019					1	
19/02/2019					1	
20/02/2019					1	
21/02/2019						1
22/02/2019					1	
23/02/2019						1
24/02/2019		1				
25/02/2019	1					
26/02/2019	1					
27/02/2019	1					
28/02/2019	1					
01/03/2019	1					
02/03/2019	1					
03/03/2019						1
04/03/2019		1				
05/03/2019			1			
06/03/2019			1			
07/03/2019			1			
08/03/2019			1			
09/03/2019			1			
10/03/2019		1				
11/03/2019			1			
12/03/2019		1				

13/03/2019		1				
14/03/2019		1				
15/03/2019		1				
16/03/2019		1				
17/03/2019		1				
18/03/2019						1
19/03/2019		1				
20/03/2019		1				
21/03/2019	1					
22/03/2019	1					
23/03/2019			1			
24/03/2019			1			
25/03/2019					1	
26/03/2019					1	
27/03/2019		1				
28/03/2019	1					
29/03/2019	1					
30/03/2019					1	
31/03/2019					1	
01/04/2019	1					
02/04/2019						1
03/04/2019	1					
04/04/2019					1	
05/04/2019	1					
06/04/2019	1					
07/04/2019			1			
08/04/2019	1					
09/04/2019	1					
10/04/2019	1					
11/04/2019					1	
12/04/2019					1	
13/04/2019					1	
14/04/2019					1	
15/04/2019		1				
16/04/2019						1
17/04/2019						1
18/04/2019		1				
19/04/2019		1				
20/04/2019					1	
21/04/2019	1					
22/04/2019	1					
23/04/2019	1					
24/04/2019					1	
25/04/2019						1
26/04/2019					1	
27/04/2019					1	
28/04/2019					1	

29/04/2019					1	
30/04/2019					1	
01/05/2019		1				
02/05/2019		1				
03/05/2019					1	
04/05/2019	1					
05/05/2019		1				
06/05/2019		1				
07/05/2019		1				
08/05/2019				1		
09/05/2019				1		
10/05/2019		1				
11/05/2019		1				
12/05/2019				1		
13/05/2019		1				
14/05/2019		1				
Total	24	34	3	12	21	9

06 H	NE	NW	E	W	S	L
01/02/2019			1			
02/02/2019			1			
03/02/2019		1				
04/02/2019		1				
05/02/2019		1				
06/02/2019		1				
07/02/2019		1				
08/02/2019		1				
09/02/2019		1				
10/02/2019		1				
11/02/2019			1			
12/02/2019		1				
13/02/2019		1				
14/02/2019		1				
15/02/2019		1				
16/02/2019	1					
17/02/2019	1					
18/02/2019					1	
19/02/2019					1	
20/02/2019					1	
21/02/2019					1	
22/02/2019					1	
23/02/2019						1
24/02/2019	1					
25/02/2019	1					

26/02/2019	1					
27/02/2019	1					
28/02/2019	1					
01/03/2019	1					
02/03/2019	1					
03/03/2019				1		
04/03/2019		1				
05/03/2019					1	
06/03/2019				1		
07/03/2019				1		
08/03/2019				1		
09/03/2019				1		
10/03/2019		1				
11/03/2019					1	
12/03/2019		1				
13/03/2019		1				
14/03/2019		1				
15/03/2019		1				
16/03/2019		1				
17/03/2019					1	
18/03/2019						1
19/03/2019						1
20/03/2019		1				
21/03/2019	1					
22/03/2019	1					
23/03/2019	1					
24/03/2019			1			
25/03/2019					1	
26/03/2019		1				
27/03/2019	1					
28/03/2019	1					
29/03/2019	1					
30/03/2019					1	
31/03/2019					1	
01/04/2019					1	
02/04/2019						1
03/04/2019				1		
04/04/2019				1		
05/04/2019		1				
06/04/2019				1		
07/04/2019		1				
08/04/2019				1		
09/04/2019				1		
10/04/2019				1		
11/04/2019		1				
12/04/2019		1				
13/04/2019		1				

14/04/2019		1				
15/04/2019		1				
16/04/2019		1				
17/04/2019				1		
18/04/2019					1	
19/04/2019	1					
20/04/2019						1
21/04/2019						1
22/04/2019						1
23/04/2019				1		
24/04/2019				1		
25/04/2019				1		
26/04/2019				1		
27/04/2019		1				
28/04/2019		1				
29/04/2019		1				
30/04/2019		1				
01/05/2019		1				
02/05/2019		1				
03/05/2019					1	
04/05/2019		1				
05/05/2019		1				
06/05/2019		1				
07/05/2019		1				
08/05/2019				1		
09/05/2019				1		
10/05/2019				1		
11/05/2019				1		
12/05/2019		1				
13/05/2019		1				
14/05/2019	1					
Total	17	41	1	23	14	7

12H	NE	NW	E	W	S	L
01/02/2019				1		
02/02/2019		1				
03/02/2019		1				
04/02/2019		1				
05/02/2019		1				
06/02/2019		1				
07/02/2019		1				
08/02/2019		1				
09/02/2019		1				
10/02/2019				1		
11/02/2019				1		
12/02/2019		1				
13/02/2019		1				
14/02/2019		1				
15/02/2019		1				
16/02/2019	1					
17/02/2019					1	
18/02/2019					1	
19/02/2019					1	
20/02/2019						1
21/02/2019						1
22/02/2019						1
23/02/2019		1				
24/02/2019	1					
25/02/2019	1					
26/02/2019	1					
27/02/2019	1					
28/02/2019	1					
01/03/2019	1					
02/03/2019				1		
03/03/2019		1				
04/03/2019		1				
05/03/2019				1		
06/03/2019					1	
07/03/2019				1		
08/03/2019				1		
09/03/2019				1		
10/03/2019						1
11/03/2019		1				
12/03/2019		1				
13/03/2019		1				
14/03/2019		1				

15/03/2019		1				
16/03/2019		1				
17/03/2019		1				
18/03/2019		1				
19/03/2019		1				
20/03/2019	1					
21/03/2019	1					
22/03/2019	1					
23/03/2019	1					
24/03/2019			1			
25/03/2019					1	
26/03/2019		1				
27/03/2019						1
28/03/2019	1					
29/03/2019	1					
30/03/2019					1	
31/03/2019					1	
01/04/2019					1	
02/04/2019				1		
03/04/2019				1		
04/04/2019		1				
05/04/2019				1		
06/04/2019		1				
07/04/2019		1				
08/04/2019				1		
09/04/2019		1				
10/04/2019		1				
11/04/2019		1				
12/04/2019		1				
13/04/2019		1				
14/04/2019		1				
15/04/2019		1				
16/04/2019				1		
17/04/2019				1		
18/04/2019					1	
19/04/2019						1
20/04/2019						1
21/04/2019						1
22/04/2019	1					
23/04/2019						1
24/04/2019				1		
25/04/2019				1		
26/04/2019				1		
27/04/2019		1				
28/04/2019		1				
29/04/2019		1				
30/04/2019		1				

01/05/2019		1				
02/05/2019					1	
03/05/2019	1					
04/05/2019		1				
05/05/2019		1				
06/05/2019				1		
07/05/2019				1		
08/05/2019				1		
09/05/2019		1				
10/05/2019				1		
11/05/2019				1		
12/05/2019		1				
13/05/2019		1				
14/05/2019	1					
Total	16	45	1	22	10	9

18 H	NE	NW	E	W	S	L
01/02/2019			1			
02/02/2019		1				
03/02/2019		1				
04/02/2019		1				
05/02/2019		1				
06/02/2019		1				
07/02/2019		1				
08/02/2019		1				
09/02/2019			1			
10/02/2019				1		
11/02/2019		1				
12/02/2019		1				
13/02/2019		1				
14/02/2019	1					
15/02/2019		1				
16/02/2019	1					
17/02/2019				1		
18/02/2019				1		
19/02/2019				1		
20/02/2019				1		
21/02/2019				1		
22/02/2019						1
23/02/2019						1
24/02/2019	1					
25/02/2019	1					
26/02/2019	1					
27/02/2019	1					

28/02/2019	1					
01/03/2019						1
02/03/2019						1
03/03/2019		1				
04/03/2019				1		
05/03/2019				1		
06/03/2019					1	
07/03/2019				1		
08/03/2019		1				
09/03/2019				1		
10/03/2019		1				
11/03/2019		1				
12/03/2019		1				
13/03/2019		1				
14/03/2019		1				
15/03/2019		1				
16/03/2019		1				
17/03/2019		1				
18/03/2019		1				
19/03/2019		1				
20/03/2019		1				
21/03/2019	1					
22/03/2019	1					
23/03/2019	1					
24/03/2019						1
25/03/2019					1	
26/03/2019		1				
27/03/2019	1					
28/03/2019	1					
29/03/2019	1					
30/03/2019					1	
31/03/2019					1	
01/04/2019						1
02/04/2019				1		
03/04/2019				1		
04/04/2019						1
05/04/2019		1				
06/04/2019		1				
07/04/2019		1				
08/04/2019				1		
09/04/2019		1				1
10/04/2019		1				
11/04/2019		1				
12/04/2019		1				
13/04/2019		1				
14/04/2019				1		
15/04/2019		1				

16/04/2019						1
17/04/2019					1	
18/04/2019	1					
19/04/2019						1
20/04/2019						1
21/04/2019						1
22/04/2019						1
23/04/2019				1		
24/04/2019		1				
25/04/2019				1		
26/04/2019		1				
27/04/2019		1				
28/04/2019		1				
29/04/2019		1				
30/04/2019		1				
01/05/2019		1				
02/05/2019					1	
03/05/2019					1	
04/05/2019		1				
05/05/2019						1
06/05/2019				1		
07/05/2019				1		
08/05/2019				1		
09/05/2019				1		
10/05/2019				1		
11/05/2019				1		
12/05/2019		1				
13/05/2019		1				
14/05/2019	1					
Total	14	44	0	18	13	14