

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
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 titre
d'ingénieur d'état en Génie de l'Environnement.

**SUIVI EN CONTINU DE LA POLLUTION DE L'AIR PAR LES
DIFFERENTES FRACTIONS DE PMi**

BAAZIZ Mohammed Djalil
FELLAHI Imane

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

Présenté et soutenu publiquement le 19/06/2017

Composition du Jury :

Président	Mme N. BELHANECHÉ	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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
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 titre
d'ingénieur d'état en Génie de l'Environnement.

**SUIVI EN CONTINU DE LA POLLUTION DE L'AIR PAR LES
DIFFERENTES FRACTIONS DE PMi**

BAAZIZ Mohammed Djalil
FELLAHI Imane

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

Présenté et soutenu publiquement le 19/06/2017

Composition du Jury :

Président	Mme N. BELHANECHÉ	Professeur (ENP)
Promoteur	M. H.MERABET	Chercheur (CDER)
Co-promoteur	M. R.KERBACHI	Professeur (ENP)
Examineur	M. Y.KERCHICH	Docteur (U. Médéa)

ملخص

تركز هذه الدراسة على تقييم تلوث الهواء بالجسيمات الدقيقة (PMi) في موقعين مختلفين: موقع شبه الحضري في بلدية بوزريعة وموقع الحضري في بلدية الجزائر وسط. وقد أجريت الدراسة باستخدام جهاز Fidas 200 الذي بدأنا تشغيله لأول مرة في الجزائر، التي حصل عليها مركز تنمية الطاقة المتجددة. وقد بلغ متوسط مستويات PM10 $31.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و $35.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ في بوزريعة و الجزائر وسط على التوالي. وصلت مستويات الجسيمات الدقيقة PM1 قيمة $7.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ببوزريعة و $10.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ بالجزائر وسط. وغالبا ما تجاوزت معايير منظمة الصحة العالمية. ولكن عموما، ومقارنة بالدول الأخرى، مستويات التلوث ليست مثيرة للقلق. ويرتبط التلوث بالانبعاثات الطبيعية والأنشطة البشرية. حالة خاصة من اليوم الخالي من السيارات في الجزائر العاصمة، يظهر تأثير حركة المرور على مستويات التلوث. متابعة ايام من شهر رمضان يدل على التطورات اليومية خاصة مع وجود علاقة في تغير نمط الحياة في هذا الشهر.

الكلمات الدالة: تلوث الهباء الجوي، وتلوث الجسيمات، تعليق الجسيمات الموقع الحضري، موقع شبه الحضري، PM10، PM2.5، PM1، FIDAS 200.

Abstract

This study examines the assessment of air pollution by PMi at two separate sites: a semi-urban site in the Bouzareah commune and an urban site in Algiers-Center. Our study was carried out with the **Fidas 200** analyzer which was started for the first time in Algeria, acquired by the Center for the Development of Renewable Energies.

PM10 levels averaged $31.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $35.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ which were in Bouzaréah and Algiers-center respectively. The very fine particulate matter PM1 reaches values of $7.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Bouzareah and $10.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Algiers. WHO guidelines are often outdated. But overall, and compared to other countries, levels of pollution are not alarming. Pollution is linked to natural emissions and human activities. The particular case of the car-free day in Algiers shows the impact of road traffic on pollution levels. The follow-up of the Ramadhan days shows a particular daily evolution in relation to the change of the way of life in this month.

Keywords: Aerosol pollution, particulate pollution, particulate matter, urban site, sub-urban site, PM10, PM2.5, PM1, FIDAS200.

Résumé

La présente étude porte sur l'évaluation de la pollution de l'air par les PMi en deux sites distincts : un site semi-urbain dans la commune de Bouzaréah et un site urbain à Alger-centre. Notre étude a été effectuée avec l'analyseur **Fidas 200** qu'on a mis en marche pour la première fois en Algérie, acquis par le Centre de Développement des Energies Renouvelables. Les teneurs en PM10 s'élèvent en moyenne à $31,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $35,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ qui étaient à Bouzaréah et Alger-centre respectivement. Les teneurs en particules très fines PM1 atteignent des valeurs de $7.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Bouzaréah et $10.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Alger. Les directives de l'OMS sont souvent dépassées. Mais globalement, et comparés à d'autres pays, les niveaux de pollution ne sont pas alarmants. La pollution est liée aux émissions naturelles et aux activités humaines. Le cas particulier de la journée sans voiture à Alger, montre l'impact du trafic routier sur les niveaux de pollution. Le suivi des journées du Ramadhan montre une évolution journalière particulière en relation avec le changement du mode de vie en ce mois.

Les mots clés : Pollution particulaire, site urbain, site semi-urbain, PM10, PM2.5, PM1, FIDAS 200, Ramadhan, Alger.

Dédicaces

*A ma Chère Mère **CHABHA***

*A mon Père **SAID***

Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines m'ont permis de vivre ce jour.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation

A mes Chères Frères

LOTFI, WALID

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

Mes anges gardiens et mes fidèles compagnons dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse

*A ma **GRAND MERE CHERIE***

Qui m'a accompagné par ses prières, sa douceur, puisse Dieu lui prêter longue vie et beaucoup de santé et de bonheur dans les deux vies.

A mes chers oncles, tantes, leurs époux et Epouses

A mes chers cousins et cousines

À mes amis de toujours :

ZOUAOUI Malika (la queen), **ZEROUGUI MERIEM** (la petite),

DIHIA, KATIA, ainsi que toute ma petite famille de promo GE

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

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

*A mon binôme **DJALIL***

Qui a eu la patience de me supporter durant ce mémoire, merci d'être aussi compréhensif.

IMA NE

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma mère en témoignage de mon affection et mon admiration pour son courage et sa dignité et à qui je ne saurai jamais exprimer toute ma reconnaissance...

A mon père qui m'a tout donné et qui a su de ses précieux conseils m'inspirer le sens de la dignité du courage et du travail, qu'il trouve ici l'accomplissement de tous ses vœux...

*A mes seules et uniques sœurs **ASSIA** et **KAOUTHER** à qui je souhaite beaucoup de réussite.*

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

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DJALIL

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nous avoir donnés la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons, à travers ces quelques lignes, à remercier toutes les personnes qui durant nos 3 mois de pratique ont su nous apporter leur soutien, leur aide et leur amitié. Ces personnes qui ont énormément compté dans notre travail et qui ont permis de faire de notre stage une expérience enrichissante et agréable.

*Ainsi, nous tenons tout d'abord à remercier les membres de notre jury, d'avoir accepté d'assister et évaluer ce travail : merci à **Madame BELHANECHÉ Naima** de nous avoir honorés en acceptant d'être présidente du jury de notre soutenance et à **Monsieur KERCHICH Yacine** d'avoir accepté d'examiner notre mémoire de fin d'études.*

*Un grand Merci à notre **Professeur KERBACHI Rabah** notre co-promoteur et **Monsieur MERABET Hamza** notre promoteur, de nous avoir permis de réaliser ce travail, de nous avoir encadrés durant ces trois mois, et nous avoir toujours soutenus.*

*Nous remercions tous spécialement notre Professeur **Rabah KERBACHI**, pour nous avoir prêté une oreille attentive lorsque cela était nécessaire, pour ses conseils avisés et pour nous avoir transmis sa passion pour le domaine de la pollution de l'air. Nous ne vous serons jamais assez reconnaissants de nous avoir permis, depuis le début de notre cursus, d'explorer une telle thématique, qui deviendra sans aucun doute l'objet de notre carrière.*

*Nous voudrions remercier tout particulièrement notre cher Promoteur **Monsieur MERABET Hamza** qui nous a dirigés tout au long de ces trois mois de pratique. Il a toujours été disponible malgré ses occupations, à l'écoute de nos nombreuses questions, et s'est toujours intéressé à l'avancée de nos travaux. Les nombreuses discussions que nous avons eues ainsi que ses conseils nous ont été très utiles pour atteindre le résultat final de ce travail. Sa capacité d'analyse et son enthousiasme nous ont montré que le monde de la recherche pouvait être un univers passionnant. Enfin, ses nombreuses relectures et corrections de ce mémoire ont été très appréciables. Ce travail lui doit beaucoup. Pour tout cela merci.*

*Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui nous ont été proches au Centre de Développement des Energies Renouvelables représenté par son Directeur le **professeur Noureddine YASSAA** durant ce travail, à savoir le technicien **M. TLEMCANI FAYSAL**, l'ingénieur de laboratoire **M. CHERGUI MOURAD** et le chauffeur **M. BOUSSELAMA Nasreddine** Un grand Merci à vous.*

*Nous devons un remerciement à tous les enseignants de **L'Ecole National Polytechnique** pour leurs qualités scientifiques et pédagogiques.*

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 soutenus et nous ont permis d'arriver là où nous sommes aujourd'hui !

Table de matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction général	12
I Les aérosols atmosphériques	17
I - 2 - 1 Définitions	17
I - 2 - 2 Les différentes sources des matières particulaires PMi.....	17
I - 2 - 3 Caractéristiques physiques des PMi	21
I - 2 - 4 Composition chimique des particules.....	24
I - 2 - 5 Propriété radiatives des aérosols	28
I - 2 - 6 Mode de formation des particules	29
I - 2 - 7 Structure probable de l'aérosol.....	30
I - 2 - 8 Temps de résidence de l'aérosol	31
I - 2 - 9 Facteurs météorologiques influençant la dispersion des polluants :	31
I - 2 - 10 La distribution verticale de l'aérosol.....	35
Impact de la pollution particulaire sur la santé et l'environnement :	36
I - 3 - 1 Impact sanitaire de la pollution particulaire	36
I - 3 - 2 Cheminement des particules dans le système respiratoire en fonction de leur granulométrie	36
I - 3 - 3 La persistance des particules dans l'organisme et les conséquences sur le système immunitaire	38
I - 3 - 4 Evaluation des effets des particules polluantes sur la santé.....	41
I - 3 - 5 Effet à long et à court terme des PMi sur la santé	41
I - 3 - 6 Un impact sanitaire substantiel.....	42
I - 3 - 7 Effet de la pollution particulaire sur l'environnement :.....	44
I - 3 - 8 Impact économique de la pollution de l'air :.....	46
Lutte contre la pollution par les PMi.....	47
I - 4 - 1 Réglementations :.....	47
I - 4 - 2 Directives Européennes	49
I - 4 - 3 Réglementation Algérienne.....	50
I - 4 - 4 Mesures de réduction primaires	50
I - 4 - 5 Mesures de réduction secondaires.....	51
Etats des lieux de la pollution de l'air	60
I - 5 - 1 La pollution mondiale par les particules fines.....	60

I - 5 - 2	La pollution par les particules fines cas de l'Algerie :	63
II.	Méthodologie expérimentales	69
II.1.	Présentation des sites d'études	69
II.1.1.	L'espace semi-urbain de Bouzaréah	69
II.1.2.	L'espace urbain d'Alger Centre	71
II.2.	Méthode de prélèvement et d'analyse des PMi et description de l'analyseur	73
II.2.1.	Présentation de l'appareil et son principe de fonctionnement	73
II.2.2.	Le schéma de la figure 30 décrit les étapes de détection des particules par le FIDAS 200.	77
II.2.3.	Caractéristiques techniques du FIDAS 200	78
II.2.4.	Installation de l'analyseur	80
III.	Résultats et Interprétations	83
III.1.	Teneurs atmosphériques en particules	83
III.2.	Etudes de cas des PMi	89
III.3.	La distribution des particules	96
III.4.	Identification de signatures	99
III.4.1.	Variabilité journalière de la pollution particulaire	99
III.4.2.	Variation hebdomadaire	102
III.4.3.	Influence des facteurs météorologiques sur les teneurs des PMi	103
III.4.4.	Corrélation entre les teneurs massiques des différentes classes des particules	110
I - 5 - 3	Le comptage des particules	114
III.4.5.	Evènement journalier	115
III.4.6.	Occurrences des épisodes de pollution	121
III.4.7.	Comparaison entre les deux sites	124
III.4.8.	Comparaison avec les teneurs de PMi mesurées à Alger dans des études précédentes	125
III.4.9.	Comparaison avec des villes étrangères	126
	Conclusion Générale	129
	Bibliographie	131

Liste des figures

Figure 1. schéma des principales sources de particules atmosphériques [6].	18
Figure 2. Répartition des émissions de particules PM10 et PM2.5 par secteur d'activité en France métropolitaine pour l'année 2005 [6].	19
Figure 3. Caractéristiques physiques des aérosols [6]	21
Figure 4. Distribution en nombre des particules en fonction du diamètre [7]	23
Figure 5. Distributions de la masse de l'aérosol en fonction de la taille [8]	24
Figure 6. Représentation schématiques de la distribution granulométrique des aérosols et de leurs mécanismes de formation et de déposition [8]	30
Figure 7. Schéma probable de l'aérosol [8].	31
Figure 8. Distribution verticale de l'aérosol [8].	35
Figure 9. Mécanisme de dépôt des particules dans le système respiratoire [15]	37
Figure 10. Région de dépôt des particules dans le système respiratoire [15]	37
Figure 11. Mécanismes expliquant les effets sanitaires des particules fines [16].	39
Figure 12. Gain d'espérance de vie pour les personnes de 30 ans et plus dans 25 villes européennes si les niveaux annuels moyens en PM2.5 étaient ramenés à la valeur guide OMS de 10 µg/m [16]	43
Figure 13. Pyramide des effets de la pollution atmosphérique [16]	43
Figure 14. Aperçu synthétique du coût économique de la pollution de l'air [20]	46
Figure 15. Teneur annuelle de PM2.5 au niveau de globe	61
Figure 16. Niveau des PM10 par région de 2008 à 2015 et nombre de décès dus à la pollution de l'air en 2012.	62
Figure 17. Principales causes de mortalité dans le monde [14].	63
Figure 18. Évolution saisonnière des PM10 à ALGER 2001 -2006 (INSP)	65
Figure 19. Moyennes journalières des PM10 du réseau Samasafia d'Alger mois de septembre 2002.	66
Figure 20. Évolution annuelle des PM10 Alger 2002 à 2008.	66
Figure 21. Moyenne annuelle des PM10 Alger 2002 à 2008	67
Figure 22. Fréquence d'occurrence des concentrations des PM10 supérieures à la norme OMS	67
Figure 23. Localisation de la commune de Bouzaréah, au sud-ouest d'Alger	70
Figure 24. Localisation du CDER à Bouzaréah.	70
Figure 25. Localisation de la commune d'Alger-centre, Alger	72
Figure 26. Localisation de l'hôpital de Mustapha Bacha à Alger-centre	72
Figure 27. Analyseur de particules dans l'air utilisé dans le présent travail (FIDAS 200)	74
Figure 28. Schéma détaillé du FIDAS 200 équipé d'une station météorologique et d'un abri	75
Figure 29. Schéma de la cellule de mesure du FIDAS 200.	75
Figure 30. Courbe de calibration de la détection à 90° d'une source de lumière monochromatique (courbe rouge) et d'une lumière polychromatique (courbe noire FIDAS 200)	76
Figure 31. Etape de mesure des particules par le FIDAS 200	77
Figure 32. Traitement des résultats de mesure avec le logiciel PDAnalyze.	79
Figure 33. Installation de l'appareil au site de Bouzaréah	81
Figure 34. Installation de l'appareil au site du Mustapha Bacha	81
Figure 35. Evolution des concentrations instantanées des PMi mesurées dans les sites étudiés	84
Figure 36. Evolution des moyennes journalières des concentrations des PMi mesurées à (Bouzaréah)	84
Figure 37. Evolution des teneurs atmosphériques en PMi mesurées à (Alger-Centre)	85
Figure 38. Rétro trajectoire des masses d'air du 25 Avril 2017 réalisée par le Modèle Hysplit	86
Figure 39. Rétro trajectoire des masses d'air du 22 Mai 2017 réalisée par le Modèle Hysplit	87
Figure 40. Pourcentage de chacune des classes particulières pour les deux sites étudiés	88
Figure 41. Etude de cas des PM10 dans le site semi-urbain de Bouzaréah.	89
Figure 42. Rapport entre les PM10 et PMtot dans le milieu semi-urbain de Bouzaréah	90
Figure 43. Etude de cas des PM10 dans le site urbain de Mustapha Bacha	90
Figure 44. Rapport entre les PM10 et PMtot dans le milieu urbain de Mustapha Bacha.	91

Figure 45. Etude de cas des PM2.5 dans le site semi-urbain de Bouzaréah.....	92
Figure 46. Rapport entre les PM2.5 et PM10 dans le milieu semi-urbain de Bouzaréah.....	92
Figure 47. Etude de cas des PM2.5 dans le site urbain de Mustapha Bacha.....	93
Figure 48. Rapport entre les PM2.5 et PM10 dans le milieu urbain de Mustapha Bacha.....	93
Figure 49. Etude de cas des PM1 et PM4 dans les deux sites étudiés	95
Figure 50. Rapport entre les PM1 et PM10, les PM1 et PM2.5 et entre les PM4 et PM10 dans les deux sites étudiés	96
Figure 52. Distribution du nombre, de la surface et de la masse des particules au site semi-urbain	97
Figure 52. Distribution du nombre, de la surface et de la masse des particules au site de Bouzaréah au site urbain.....	97
Figure 53. Distribution en nombre de particules sources dans le site semi-urbain.....	98
Figure 54. Distribution en nombre de particules sources dans le site urbain	98
Figure 55. Variation diurne (jours ouvrés et weekends) des concentrations des PMi dans le site de Bouzaréah.....	100
Figure 56. Variation diurne (jours ouvrés et weekends) des concentrations des PMi dans le site d'Alger-Centre.....	101
Figure 57. Variation hebdomadaire des concentrations des PMi dans les deux sites étudiés	103
Figure 58. Variation de la pollution particulaire à Bouzaréah en fonction des conditions météorologiques.....	107
Figure 60. Variation de la pollution particulaire à Mustapha Bacha en fonction des conditions météorologiques.....	110
Figure 60. Corrélation entre les PMi à Bouzaréah.....	112
Figure 61. Corrélation entre les PMi à Alger-centre.....	113
Figure 62. Corrélation entre les PMi à Bouzaréah.....	114
Figure 63. Corrélation entre les PMi à Alger centre	115
Figure 64. Evolution des niveaux de PMi durant le jour du 1er Mai 2017	115
Figure 65. Evolution des niveaux de PMi durant le jour de vote	116
Figure 66. Evolution des niveaux de PMi durant la journée de manifestation	117
Figure 67. Evolution des niveaux de PMi durant la journée sans véhicules à Alger-centre	118
Figure 68. Evolution des niveaux de PMi durant les jours de Ramadhan à Alger-centre.....	119
Figure 69. Suivie journalier ramadan.....	120
Figure 70. Evolution des niveaux de PMi durant une journée pluvieuse (27 Mai)	121
Figure 71. Comparaison des niveaux de pollution de l'air dans les deux sites avec les normes recommandées	122
Figure 72. Cartes des rétro trajectoires des masses d'air aux jours de piques enregistrés à Bouzaréah [35].....	123
Figure 73. Cartes des rétro trajectoires des masses d'air aux jours de piques enregistrés à Alger-centre [35].....	123
Figure 74. Comparaison des moyennes de PMi dans les deux sites étudiés	124

Liste des tableaux

Tableau 1. Devenir des particules dans le système respiratoire	40
Tableau 2. Caractéristiques techniques du FIDAS 200.....	78
Tableau 3. Teneurs moyennes et extrêmes journalières des PMi à Bouzaréah et Alger-centre en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	83
Tableau 4. Coefficients de corrélations liant les différentes classes granulométriques à Bouzaréah.	110
Tableau 5. Coefficients de corrélations liant les différentes classes granulométriques à Alger-Centre	111
Tableau 6. Comparaison des niveaux de pollution par les particules de l'air avec d'autres villes du monde	127

Introduction Générale

Introduction général

On l'oublie au quotidien, tant c'est une évidence : l'oxygène que nous respirons est la base de notre vie. Disposer d'un air sain est donc la toute première condition de notre bien-être, la source même de toutes nos activités. C'est donc un enjeu essentiel pour notre vie. Or, en Algérie, la qualité de l'air est de plus en plus en détérioration, vu les sources de pollution naturelles et les activités humaines croissantes. Celle-ci peut dépasser les seuils fixés par la loi Algérienne pour protéger la santé de la population et notamment celle des personnes les plus fragiles. C'est une situation qui doit tous nous interpeller - citoyens, industriels et surtout décideurs ou décideurs - car la pollution de l'air n'est pas inéluctable d'une part, et ne cesse d'impacter l'équilibre climatique qui menace la planète d'autre part.

La pollution atmosphérique liée aux activités humaines n'est pas un phénomène récent. Son origine remonte à l'invention du feu : depuis toujours le chauffage au bois et au charbon est une source majeure de la pollution de l'air dans les espaces fermés. Cette pollution n'a cessé d'évoluer avec les progrès réalisés au cours de l'histoire. C'est ainsi par exemple, que le développement de la métallurgie a conduit à des émissions de plomb dont des traces ont été retrouvées dans les calottes glaciaires. Toutefois, ce n'est que depuis la révolution industrielle du 19ème siècle que l'industrialisation et l'urbanisation à outrance, accompagnées d'émissions non contrôlées de polluants gazeux et particulaires dans l'atmosphère, ont eu des répercussions préoccupantes sur la santé, l'environnement et dernièrement sur le climat.

Le smog de Londres en 1952 et l'identification du phénomène des pluies acides ont été des moments clés de la prise de conscience des effets des activités humaines sur la qualité de l'air, et de leurs conséquences sur la santé humaine. D'autres atteintes ont été constatées sur le bâti et l'écosystème [1].

La qualité de l'air ambiant peut se mesurer par les teneurs de différents polluants par volume d'air. On distingue parmi eux des polluants primaires qui sont directement émis par des sources polluantes fixes ou mobiles et des polluants secondaires qui apparaissent dans l'air du fait de réactions chimiques dont les réactifs ou les précurseurs sont des polluants primaires.

Les principaux polluants primaires sont les poussières, le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, les composés organiques volatils (COV) tel le benzène, et différents métaux lourds tels le plomb, le cadmium, le mercure, le nickel, l'arsenic.

Parmi les poussières, on distingue surtout les particules en suspension dans l'air de diamètre inférieur à 10 micromètres (μm) appelées PM10 ou inférieur à $2.5\mu\text{m}$ (PM2.5) 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.

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. Les grosses cheminées industrielles ont été assainies et la généralisation du catalyseur pour les véhicules a été très efficace pour diminuer les émissions polluantes. Ces avancées n'ont cependant pas été suffisantes pour venir à bout du problème. La qualité de l'air dans le monde reste insatisfaisante et constitue toujours un risque sanitaire important pour les populations, et un facteur de dégradation de l'environnement. Ainsi, Plus de 80% des personnes vivant dans les zones urbaines sont exposées à des niveaux de qualité de l'air dépassant les directives fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Alors que toutes les régions du monde sont menacées, les populations des villes des pays à faible revenu sont les plus touchées. L'Algérie fait partie des pays où les taux de pollution de l'air par les particules, et à notre connaissance, il n'existe pas, jusqu'au mois de Mars 2017, de réseau de mesure en continu de la qualité de l'air en Algérie, mis à part quelques appareils installés au CDER à Bouzaréah. Les informations concernant la qualité de l'air en Algérie sont assez rares et se basent sur les données des stations de « SAMASAFIA » qui sont mises à l'arrêt depuis 2009 et quelques données de recherche au niveau des universités et de l'ENP et récemment au CDER.

Enfin, la différence de normes existants entre les normes algériennes ($80\mu\text{g}/\text{m}^3$) et celle de l'OMS ($10\mu\text{g}/\text{m}^3$), nous a conduit à poser la question suivante : le citoyen algérien résiste-il aux effets des PM 8 fois plus que les autres citoyens du monde ?!

L'étude de la pollution particulaire a pris un essor considérable ces dernières années. L'intérêt scientifique grandissant pour les aérosols est motivé avant tout par les craintes quant à leurs effets sur la santé publique et le climat, mis en évidence par de nombreuses études scientifiques.

A l'échelle globale, les aérosols sont au cœur des préoccupations actuelles sur le changement climatique. Les études récentes ont démontré que la présence d'aérosols dans l'atmosphère modifiait de façon importante le bilan radiatif terrestre, soit en réfléchissant le rayonnement solaire vers l'espace ce qui provoque un refroidissement, ou en intervenant indirectement dans la formation des nuages et des précipitations. L'absorption du rayonnement solaire incident par les particules conduit à un réchauffement du système climatique, ce qui se rajoute au forçage radiatif positif dû au gaz à effet de serre [2]

Aux niveaux régional et local, près des grandes agglomérations urbaines et industrielles, les aérosols sont responsables des épisodes de pollution particulaire ayant des répercussions sur la qualité de l'air et la visibilité, et par conséquent sur la santé humaine. De nombreuses études épidémiologiques confirment l'existence d'un lien fort entre les concentrations en aérosol et l'augmentation des maladies respiratoires cardiovasculaires observées ces dernières années [3-5].

Bien que les constituants de l'aérosol soient responsables, leur toxicité et les mécanismes d'action ne sont pas encore clairement identifiés.

Les aérosols ont également une influence sur la chimie atmosphérique. En raison de leurs effets sur le rayonnement, ils modifient les taux de photolyse et par conséquent la production de l'ozone. Ils peuvent jouer un rôle dans la création ou la destruction d'espèces gazeuses par réactions hétérogènes, en catalysant à leur surface des réactions chimiques.

Cette introduction a permis d'illustrer la complexité de la problématique de pollution de l'air par les particules en suspension, à toutes les échelles. Il n'est pas question dans ce travail d'entrer dans tous les détails, ni de décrire particulièrement les phénomènes. L'objet de ce travail est d'évaluer et de suivre en continu la pollution de l'air par les particules en suspensions (PM) au niveau de la ville d'Alger (une zone urbaine), afin retenir l'attention sur les problèmes posés par la pollution de l'air, leur impacts sanitaire et environnemental et d'insister sur l'urgence d'installer à Alger et dans les grands centres urbains des dispositifs de surveillance de la qualité de l'air.

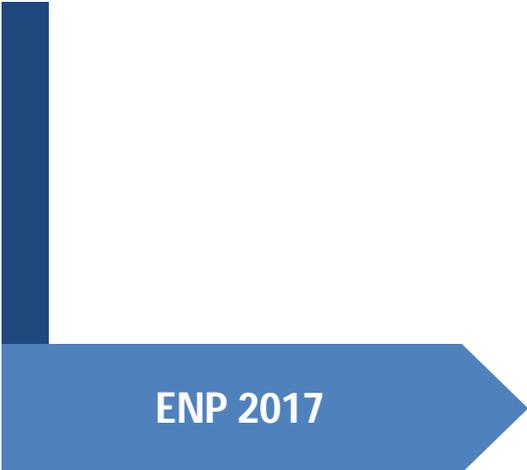
Cette surveillance continue nous permettra de savoir ce que nous respirons pour prendre les mesures de protection de l'environnement et de lutte contre cette pollution et inviter les responsables à prendre les décisions permettant d'améliorer la situation et à commencer par revoir la norme déjà imposée sur les particules fines qui présente un écart par rapport aux normes internationales. Le seul moyen d'agir efficacement consiste dès lors à intervenir dans tous les domaines concernés, de façon coordonnée et avec une perspective de long terme puisqu'il faut le dire clairement : il n'existe pas de baguette magique pour venir à bout de la pollution atmosphérique.

En Algérie, il y a aussi bien de gros pollueurs (cimenteries, centrales électriques, zones industrielles) qu'une multitude de sources diffuses – véhicules, chauffages, chantiers, incinérations sauvages, carrières, etc. – qui sont le reflet des activités de notre société.

Le mémoire s'articule autour de 2 chapitres :

Le premier chapitre (Partie théorique) présente des généralités sur les aérosols, la description physico-chimique, les propriétés physiques, leur formation et interaction, leurs effets sur la santé et le bilan radiatif terrestre et une synthèse des normes et valeurs recommandées au niveau national et international ainsi que les principales techniques préventives et de suivi, ceci nous permettra de nous situer par rapport aux niveaux de pollutions mondiaux.

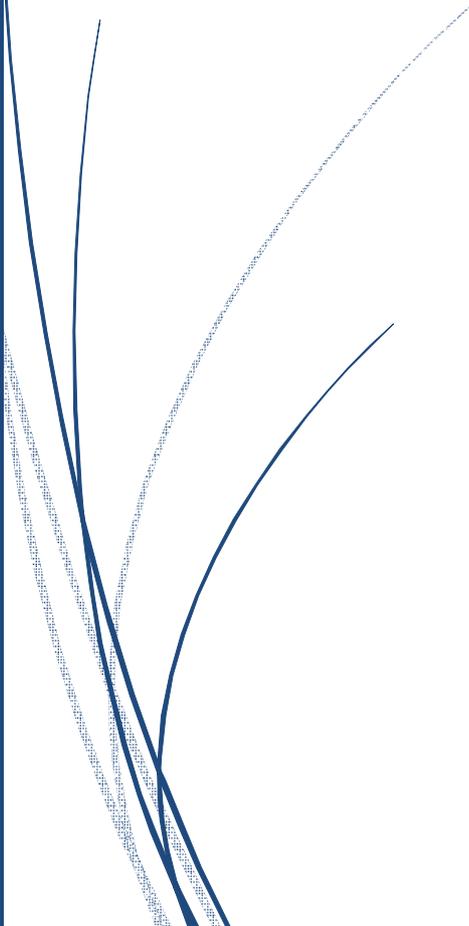
La deuxième partie de ce travail (Résultats et méthodes) sera consacrée, à l'étude sur l'évolution des teneurs en PM dans la zone urbaine d'Alger. Elle se décomposera en deux parties. La première, sera consacrée à la description de la zone étudiée et méthode d'analyse utilisée. Enfin, la dernière partie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

The logo consists of a vertical dark blue bar on the left. A horizontal blue arrow points to the right from the bar, containing the text "ENP 2017" in white.

ENP 2017

Partie 01

Les aérosols atmosphériques



I Les aérosols atmosphériques

I - 2 - 1 Définitions

On appelle pollution atmosphérique toute particule en suspension dans l'air, c'est à dire la phase condensée sous formes liquide ou solide à l'exclusion de celle de liée à l'eau. De nombreuses classifications sont utilisées pour la description des aérosols : en fonction de leur origine (naturelle ou anthropique), de leur nature (inorganique ou organique), de leur histoire (primaire ou secondaire), de leur taille (distribution en nombre et en masse). La taille des particules varie sur un large spectre allant de nanomètre à quelques dizaines de micromètres. Les aérosols de taille supérieures ne sont, en général, plus considérés comme des particules en suspension car ils peuvent sédimenter sous l'effet de l'attraction terrestre. Les aérosols liquides sont généralement de forme sphérique. En revanche, les aérosols solides prennent une forme caractéristique de leurs composants. En pratique, à l'échelle macroscopique de la modélisation, il est courant de se ramener à une forme sphérique.

I - 2 - 2 Les différentes sources des matières particulaires PMi

La complexité des aérosols atmosphériques vient en grande partie du fait qu'il existe une multitude de sources et de procédés de formation, contrairement à la majorité des polluants gazeux. Les aérosols atmosphériques ont trois origines principales, illustrées en figure 1. Ils sont d'une part rejetés directement dans l'atmosphère, on parle alors d'aérosols primaires ; ils peuvent d'autre part résulter de transformations chimiques à partir des polluants gazeux présents dans l'atmosphère, ce sont les aérosols secondaires ; enfin, les aérosols qui se sont déposés au sol peuvent être remis en suspension.

Ces différents modes de formation déterminent la composition chimique de l'aérosol, mais aussi sa taille, et donc ses propriétés physiques et optiques. Ainsi, les sources primaires émettent généralement des particules plus grossières, tandis que les sources secondaires engendrent essentiellement les particules les plus fines [6].

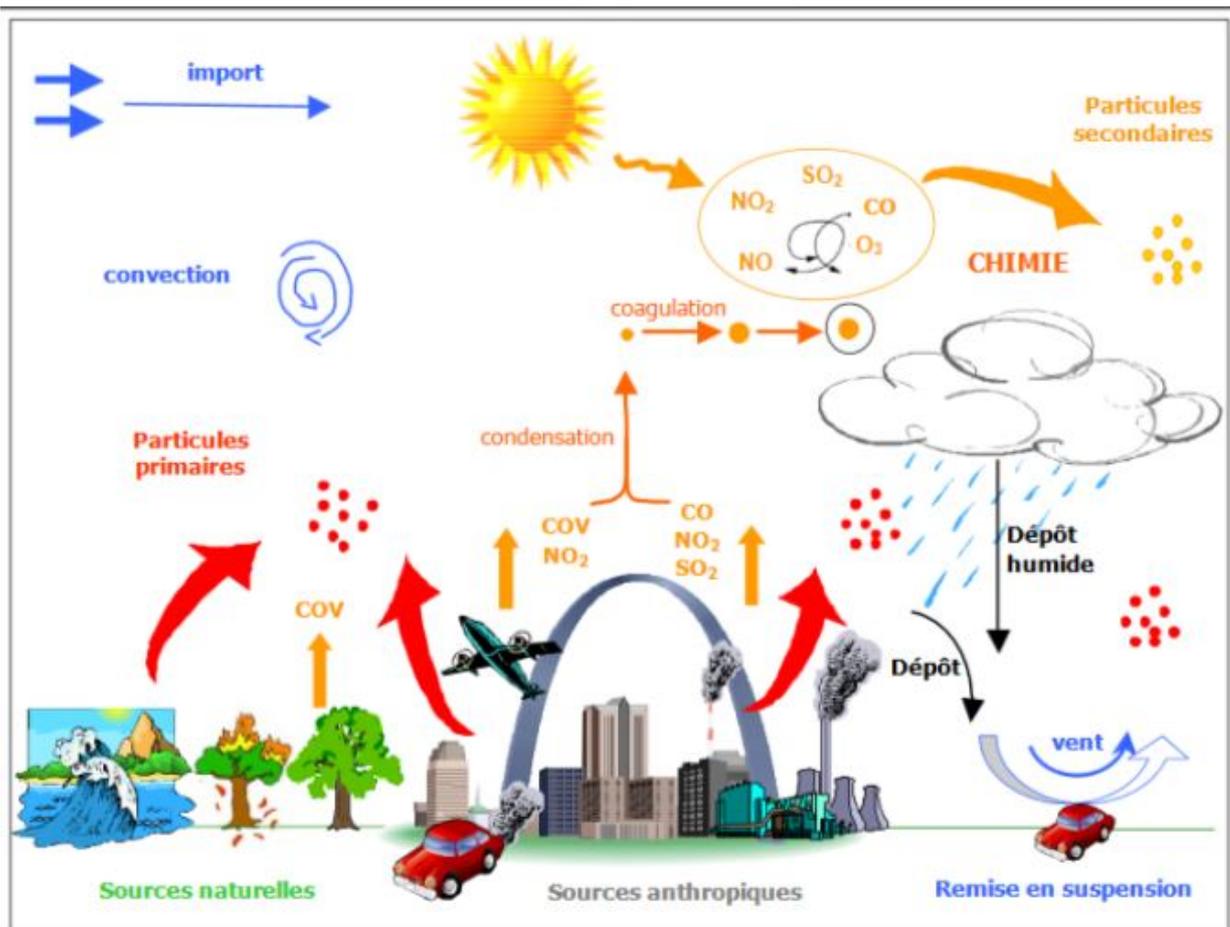


Figure 1. schéma des principales sources de particules atmosphériques [6].

I - 2 - 2 - 1 LES PARTICULES PRIMAIRES

Les particules primaires sont directement émises dans l'atmosphère, d'une part par les activités humaines, mais également par des sources naturelles. La fraction grossière des particules primaires est essentiellement formée par des procédés mécaniques tels que l'érosion. Les plus fines sont émises soit directement sous forme solide, soit sous forme de vapeurs qui se condensent très rapidement pour former des particules très fines.

Les sources naturelles

Il existe trois sources principales d'aérosols primaires naturels.

- La source terrigène : ces particules sont générées par l'érosion des sols sous l'action du vent, notamment dans les régions désertiques.
- La source marine : sous l'action des vagues, des gouttelettes d'eau sont projetées dans l'atmosphère. Après évaporation de l'eau de mer, les sels marins se retrouvent dans l'atmosphère et constituent des aérosols, dont la composition est proche de celle de l'eau de mer.

- La source biogénique : l'aérosol biogénique provient de l'émission directe par les plantes d'hydrocarbures lourds, de pollens, de spores, ainsi que des débris végétaux. De grandes quantités d'aérosols sont également émises lors des éruptions volcaniques, mais cela reste une source épisodique de particules [6].

Les sources anthropiques

Les principales activités humaines responsables de l'émission de particules primaires sont l'agriculture, l'industrie manufacturière (en particulier les chantiers, le BTP et l'exploitation des carrières), le secteur résidentiel/tertiaire (essentiellement la combustion du bois, du charbon et du fioul), les transports, en particulier routier et la transformation d'énergie. La figure 2 illustre à titre d'exemple la répartition des émissions de particules PM10 et PM2.5 en France par les différents secteurs pour l'année 2005. Bien que les émissions primaires constituent la source de particules la plus facile à quantifier, il reste néanmoins de nombreuses incertitudes.

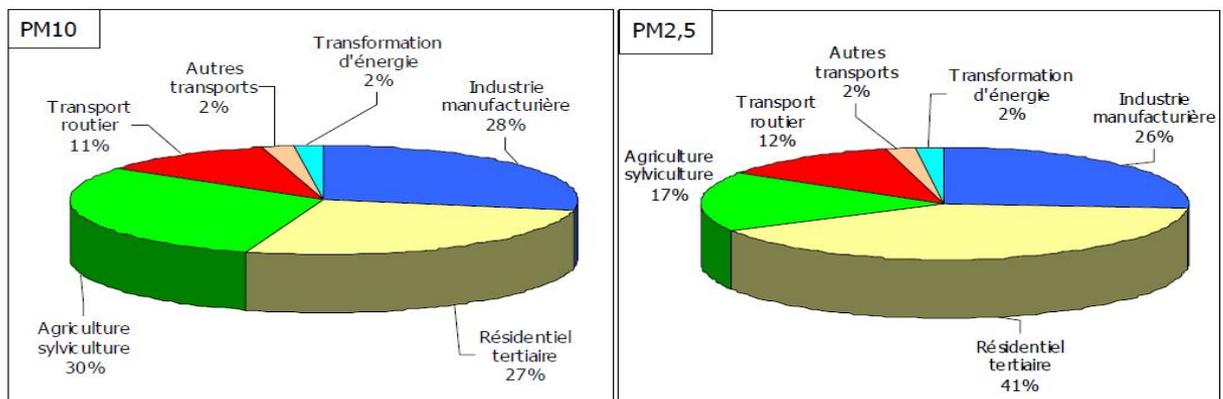


Figure 2. Répartition des émissions de particules PM10 et PM2.5 par secteur d'activité en France métropolitaine pour l'année 2005 [6]

Sur la période 1990-2005, on observe une baisse de 28 % des émissions de PM10 et 33 % des émissions de PM2.5. Cette baisse concerne l'ensemble des secteurs, à l'exception des transports autres que le routier. Elle est engendrée en grande partie par les progrès réalisés dans les techniques de dépoussiérage dans le milieu industriel, en particulier pour la sidérurgie, ainsi qu'à l'amélioration des technologies de combustion de la biomasse. Dans ce secteur, des progrès restent néanmoins à faire, notamment dans la combustion du bois. En effet, l'utilisation du bois pour le chauffage a été fortement encouragée ces dernières années dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique.

Mais c'est une source importante de particules fines (inférieures à 1 μm). En ce qui concerne le transport routier, des progrès ont été réalisés dans les émissions à l'échappement des particules issues de la combustion des carburants, essentiellement diesel, grâce aux normes européennes Euro (cf. chapitre II.2.). Ces améliorations devraient se confirmer dans les années à venir avec le développement des Filtrés à Particules (au détriment des émissions d'espèces gazeuses telles que le dioxyde d'azote). Néanmoins, elles sont en partie compensées par les émissions liées à l'abrasion des véhicules et des routes, qui augmentent en même temps que le trafic routier. Le Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes De la Pollution Atmosphérique (CITEPA) estime en effet que la moitié des émissions de particules PM10 issues du trafic et plus d'un tiers des émissions de PM2.5 proviennent de l'usure des pneus, des plaquettes de frein et des routes. Ces résultats sont confirmés par de nombreuses études. C'est ce qui explique la baisse plus importante sur les émissions de PM2.5 (-33 %) et PM1.0 (-41 %), les particules issues de la combustion étant plus fines que celles générées par abrasion [6].

I - 2 - 2 - 2 LES PARTICULES SECONDAIRES

Les particules secondaires ne sont jamais émises directement dans l'atmosphère. Elles ont une origine physico-chimique : elles résultent de la transformation des polluants gazeux présents dans l'atmosphère, tels que le dioxyde d'azote NO_2 , le dioxyde de soufre (SO_2), l'ammoniac (NH_3) et les Composés Organiques Volatils (COV). Les vapeurs gazeuses émises dans l'atmosphère se condensent et forment des particules de très petite taille, qui grossissent par coagulation ou fixation de la vapeur d'eau. Ceci s'accompagne souvent d'une oxydation photochimique des composés, sous l'action du soleil.

Les trois espèces principales d'aérosols secondaires sont :

- Les sulfates, issus de l'oxydation du SO_2 en acide sulfurique (H_2SO_4) ; on distingue les sulfates marins (sea-sulphate, SS) issus de l'oxydation du diméthylsulfure produit par les vagues, et les sulfates résultant de la conversion et de l'oxydation du SO_2 anthropique émis par l'industrie et les centrales thermiques (non-seasulphates, NSS).
- Les nitrates, résultant de l'oxydation du dioxyde d'azote NO_2 en acide nitrique (HNO_3). Cette réaction peut s'effectuer en phase gazeuse, le nitrate étant alors associé à l'ammonium (NH_4^+). Elle peut aussi s'effectuer dans la fraction grossière lorsque le nitrate est associé à des sels marins (Na^+) ou des poussières calcaires (Ca^{2+}).

- Les composés organiques secondaires, issus de réactions chimiques à partir des COV, émis par les sources anthropiques, mais aussi biogéniques comme les terpènes. Cette source de particules est difficile à quantifier car la génération des particules secondaires met en jeu des mécanismes complexes, mal connus qualitativement et quantitativement. Elle dépend des émissions des polluants gazeux précurseurs, mais aussi des conditions météorologiques. Elle constitue néanmoins une source importante de particules. Elle peut en particulier donner lieu à des transports continentaux de particules et contribuer fortement au nombre de dépassement de la valeur limite journalière. Il a ainsi été observé que la plupart des épisodes de pollution particulaire survenant en période hivernale et printanière étaient liés à une augmentation de la quantité de nitrates [6].

I - 2 - 3 Caractéristiques physiques des PMi

Les aérosols ont un diamètre aérodynamique allant de quelques nanomètres (10^9 m) à plusieurs centaines de microns (10^{-4} m). Selon leur taille, leur coefficient de diffusion et leur vitesse de dépôt sont différents (figure 3).

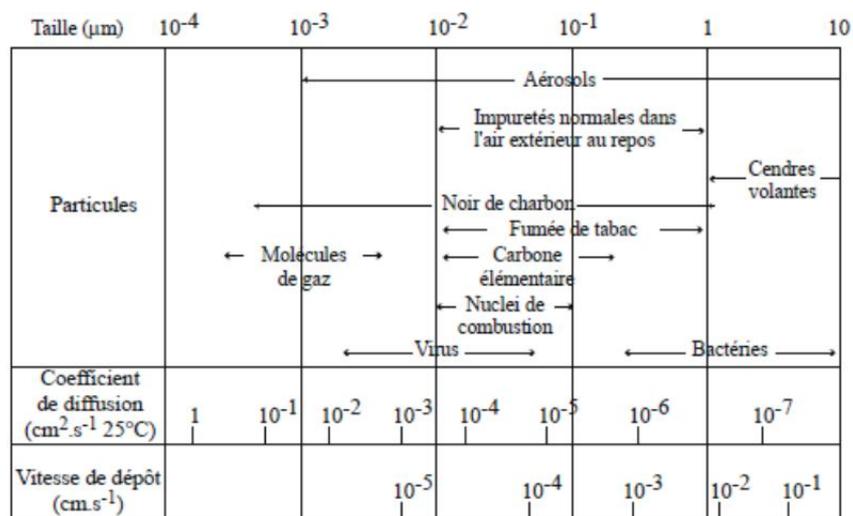


Figure 3. Caractéristiques physiques des aérosols [6]

Différents types d'aérosols sont caractérisés de par leur taille, leur nombre, leur volume ou leur masse. La représentation communément utilisée est une représentation de distribution granulométrique sous forme de courbes log-normales en nombre (N) ou en masse. Au moins trois modes se distinguent généralement dans ce type de représentation (figure 3) :

-Un mode dit **grossier** (mode « coarse » en anglais) représentant les aérosols de diamètre (D_p) supérieur ou égal à $1 \mu\text{m}$, produits majoritairement par des processus mécaniques (soulèvement des poussières désertiques, volcaniques, industrielles ou des embruns marins par le vent) et éliminés essentiellement par sédimentation ;

-Un mode dit **d'accumulation** (mode « accumulation » en anglais) représentant les aérosols dont le diamètre est compris entre $0,1$ et $1 \mu\text{m}$, produits entre autres par coagulation et condensation depuis le mode fin et éliminés par lessivage ou dépôts secs

-Un mode fin dit de **nucléation** (mode « Aitken » en anglais) représentant les aérosols de diamètre inférieur à $0,1 \mu\text{m}$, formés en partie par conversion gaz-particules (nucléation). Leur densité en nombre les conduit à coaguler et condenser pour évoluer vers le mode d'accumulation.

Les modes fins et d'accumulation sont rassemblés dans la catégorie des particules fines alors que le mode grossier correspond aux particules grossières supermicroniques (figure 4) [7].

Les différentes catégories couramment étudiées en chimie atmosphérique en relation avec l'étude de la qualité de l'air sont :

-Les particules de diamètre aérodynamique inférieur à $10 \mu\text{m}$ (appelées PM10)

- Les particules les plus grosses (de diamètre aérodynamique supérieur à $10 \mu\text{m}$), principalement produites par des phénomènes mécaniques (érosion et frottements), leur dépôt est rapide en raison de leur poids. Dans cette catégorie sont rassemblées les particules biologiques (spore, pollen, bactéries...). Ces particules sont retenues au niveau du nez et des voies aériennes supérieures et éventuellement dégluties. L'ensemble des particules qui restent en suspension dans l'air (diamètre jusqu'à environ $60 \mu\text{m}$) sont appelés particules totales en suspension (TSP).

Les PM-10, par contre, pénètrent plus ou moins profondément dans le système respiratoire.

-Les particules de diamètre aérodynamique inférieur à $2,5 \mu\text{m}$ (appelées PM2.5)

Les particules de tailles intermédiaires ou « coarse particles » (de diamètre aérodynamique compris entre $2,5$ et $10 \mu\text{m}$).

Ces particules, d'origine terrestre ou provenant de la combustion des sources mobiles, se déposent au niveau de l'arbre trachéobronchique et sont éliminées par clearance mucociliaire et la toux.

-Les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 1 μm (appelées PM1)

Ces particules issues de la conversion à partir de la phase gazeuse, d'effluents de combustion, de vapeurs organiques ou métalliques recondensées (processus de nucléation, condensation et coagulation), atteignent en plus grand nombre les alvéoles pulmonaires. Les particules Diesel riches en HAP appartiennent également au PM1. Dans cette catégorie, les ions ammoniums et sulfates sont les principaux constituants en masse. Plus la particule est petite, plus le temps de résidence sera important.

Dans cette catégorie, les particules ultrafines regroupent les particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 0,1 μm .

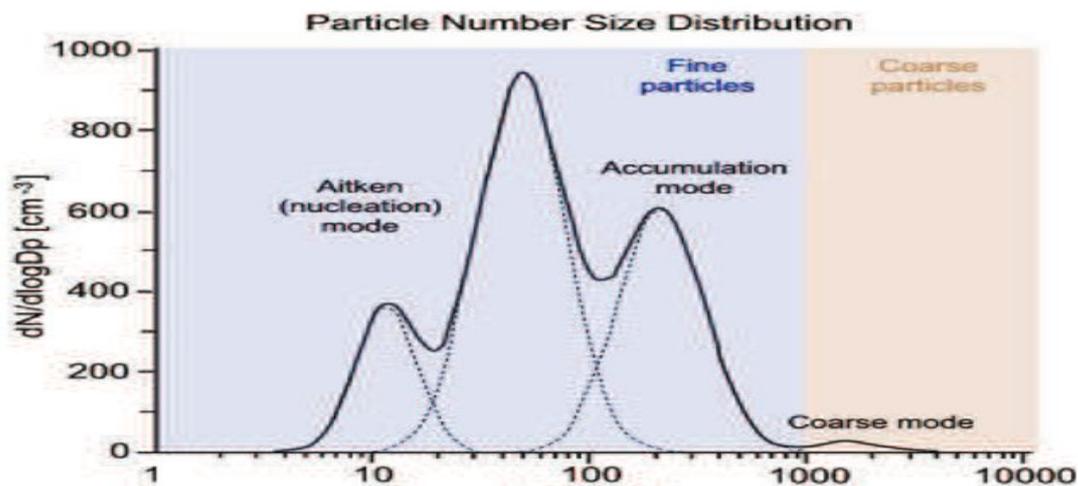


Figure 4. Distribution en nombre des particules en fonction du diamètre [7]

✓ Distribution en taille (μm)

La taille des aérosols dépend de leur origine et des processus d'évolution subis depuis leur émission. Ainsi les aérosols urbains et ruraux n'ont pas les mêmes tailles ni les mêmes formes. La distribution en nombre des aérosols urbains (émis fortement par des sources anthropiques) est généralement dominée par des aérosols de diamètre inférieur à 0,1 μm alors que leur distribution en surface est dominée par un maximum modal pour des diamètres équivalents se situant entre 0,1 et 0,5 μm et leur distribution volumique (ou massique) présente deux modes distincts : le mode fin ($0,1 < D_p < 1 \mu\text{m}$) et le mode grossier ($D_p > 1 \mu\text{m}$). La distribution en nombre des aérosols ruraux lorsqu'ils sont émis essentiellement par des sources naturelles est caractérisée par deux modes à 0,02 et 0,08 μm alors que la distribution massique (ou volumique) est dominée par les particules grossières de diamètre centré vers 7-10 μm .

Les aérosols urbains et ruraux sont influencés par des sources d'émissions différentes mais ces sources d'émissions ne peuvent cependant pas être distinguées juste sur la base de ces propriétés physiques.

✓ **Masse par unité de volume ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)**

On utilise deux types de fonctions pour décrire la relation entre la masse et la taille des aérosols [8].

- Fonction $\Delta M / d\log D_p$ (1)
- Fonction $\log.\Delta M/\Delta D_p$ (2)

Avec :

- ΔD_p : La fourchette entre deux tailles de particules.
- ΔM : Le nombre de particules entre deux tailles consécutives (exemple : nombre de Particules de taille comprise entre 0,4 et 0,5 μm).

La fonction $\log \Delta M/\Delta D_p$ qui représente la distribution granulométrique des particules est illustrée sur la Figure 5, mais les deux types de courbe sont assez analogues. La distribution en masse est souvent bimodale, c'est à dire qu'elle présente deux maximums :

- L'un pour les fines particules.
- L'autre pour les grosses particules.

L'importance relative des deux modes diffère beaucoup d'un site à l'autre.

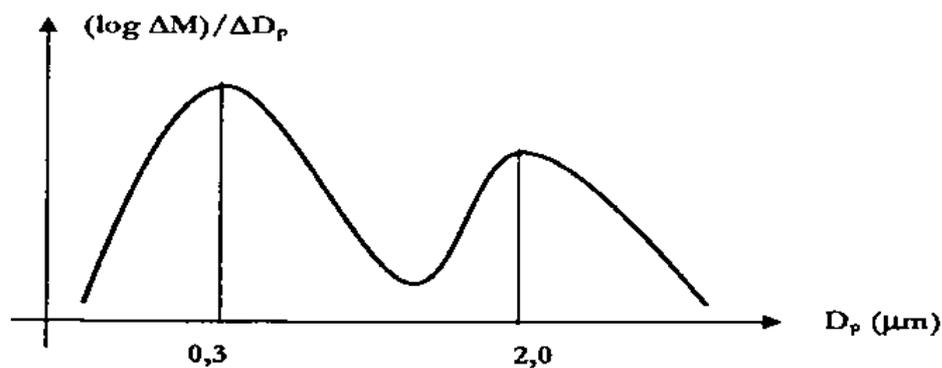


Figure 5. Distributions de la masse de l'aérosol en fonction de la taille [8]

I - 2 - 4 Composition chimique des particules

La matière particulaire contient des composés organiques et minéraux, primaires et secondaires.

Ces différentes fractions sont brièvement discutées ci-dessous :

I - 2 - 4 - 1 Fraction minérale

La fraction minérale de la matière particulaire est formée de composés minéraux primaires et secondaires.

- **Aérosols sulfatés** : Les aérosols sulfatés peuvent être de natures anthropique et naturelle. Les aérosols sulfatés d'origines anthropiques proviennent majoritairement de la combustion des carburants fossiles (72 % du total) et de la combustion de la biomasse (2 %). Les aérosols sulfatés d'origine naturelle proviennent des émissions de sulfure de diméthyl (DMS) émis par le phytoplancton marin (19 %) et du SO₂ émis par les volcans (7 %). Les estimations des émissions globales de SO₂ varient entre 66,8 et 92,4 Tg/an pour les émissions anthropiques et entre 91,7 et 125,5 Tg/an pour les émissions naturelles. Les sulfates secondaires formés par oxydation de SO₂ incluent des composés tels que l'acide sulfurique (H₂SO₄), le bisulfate d'ammonium (NH₄HSO₄) et le sulfate d'ammonium (NH₄)₂SO₄.
- **Poussières minérales** : La poussière minérale généralement constituée de métaux comme l'aluminium, le silicium, le calcium, le fer, le titane, etc. provient de sources anthropiques comme l'agriculture (récolte, labour, etc.), les industries (production de ciment) et le transport routier et de sources naturelles (désert et éruption volcaniques). L'estimation des émissions globales de poussières minérales varie entre 1000-2150 Tg/an avec une contribution anthropique entre 30- 50%.
- **Nitrates et ammonium** : Ils sont principalement de nature anthropique et possèdent un potentiel important pour le forçage radiatif négatif. Les précurseurs sont l'ammoniac et l'acide nitrique. L'ammoniac est émis par l'agriculture (élevage, utilisation des engrais chimiques). L'acide nitrique provient de l'oxydation des oxydes d'azotes (NO_x) qui sont émis des processus de combustion (feux de biomasse, industries, combustion de carburants fossiles). Le nitrate d'ammonium se forme en atmosphère riche en ammoniac. L'acide nitrique peut aussi réagir avec les sels marins et des poussières telluriques pour former du nitrate particulaire.

I - 2 - 4 - 2 Fraction organique

La fraction organique de la matière particulaire est formée aussi de composés organiques primaires et secondaires.

- **Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)**

Les HAP constitués d'au moins 2 cycles aromatiques accolés représentent une classe organique dont certains composés sont considérés cancérigènes et mutagènes. La combustion de combustibles fossiles de l'industrie est la principale activité anthropique responsable de l'introduction des HAP dans l'atmosphère. Le chauffage domestique, l'incinération, les systèmes de production d'énergie ainsi que divers procédés industriels en sont également responsables. Les sources naturelles des HAP comprennent les incendies de forêt, le traitement microbiologique de détrit (par exemple des combustibles fossiles) et les mécanismes de la biosynthèse effectués par les algues, les plantes et les bactéries. Les HAP subissent des réactions chimiques et photochimiques de dégradation dans l'atmosphère, en particulier en présence d'oxydants atmosphériques. Les nitro-HAP (N-HAP) et les oxo-HAP (O-HAP) représentent les produits issus de cette dégradation. Le benzopyrène et le nitro-benzopyrène sont les produits les plus cancérigènes et mutagènes des HAP. Les HAP possèdent des concentrations très variées selon les composés.

- **Alcanes**

Les alcanes sont des hydrocarbures aliphatiques saturés émis dans l'atmosphère par plusieurs sources anthropiques et biogènes. Ceux qui sont présentés dans l'aérosol atmosphérique ont un nombre de carbones allant de 12 à 40 environ. Les alcanes ayant un poids moléculaire élevé avec un nombre de carbones impairs sont émis généralement par les cires végétales naturelles.

- **Aldéhydes et cétones linéaires**

Ils sont émis dans l'atmosphère par le processus de combustion des carburants fossiles et par évaporation des carburants et des solvants. Ils sont également formés à partir de l'oxydation des alcanes et font partie du groupe de composés oxygénés identifiés dans les aérosols. Le n-alcane-2-one ($< C_{20}$) provient majoritairement des activités anthropiques ou des réactions d'oxydation des alcanes. L'absence des alcanals dans certains cas est due au fait qu'une bonne partie des alcanes s'oxydent en donnant des acides (alkanoic acid) et non des aldéhydes (alcanals).

- **Acides gras saturés (alcanoïque) et insaturés (alcenoïque)**

Plusieurs études ont identifié la présence d'acides gras dans les aérosols. Ils sont représentés par des acides alcanoïques, alcenoïques, dicarboxyliques et oxo-carboxyliques. Ces produits sont émis par les cires végétales, les microbes, les spores, les bactéries, le pollen, la combustion des carburants fossiles qui provient du diesel et de l'essence, des débris de pneus, de la cuisson et des feux de forêts.

- **Les substances humiques (Hulis)**

Hulis « humic like substances » est un ensemble de macromolécules représentant entre 10 et 30 % de l'aérosol organique. Ils sont émis par des débris de végétaux et animaux, des sources marines, de la combustion de la biomasse et formés à partir des aérosols organiques secondaires par oligomérisation, condensation, etc. Ils constituent la fraction la plus importante du carbone organique soluble dans l'eau (WSOC). Par ailleurs, la fraction des hulis soluble dans l'eau peut contribuer à 45 % de la masse totale des hulis tandis que la fraction restante est soluble en milieu alcalin. Ils sont constitués d'un mélange complexe de composés aromatiques avec des chaînes aliphatiques contenant des groupements, carboxyles, hydroxyles et carbonyles. Ces composés possèdent un poids moléculaire très élevé allant de quelques centaines à quelques milliers de daltons (un dalton correspond au 1/12e de la masse d'un atome de carbone 12) [9].

- **Carbone de suie (black carbone)**

Le carbone suie appartient à la grande famille des particules, groupe de nature chimique hétérogène, composé d'espèces ioniques (sels), de poussières minérales ou d'espèces carbonées. Deux propriétés principales le caractérisent : c'est un composé constitué de carbone (C) dont la couleur noire absorbe le rayonnement lumineux. Le carbone suie mesuré est un type de particules, produit par les combustions incomplètes de combustibles d'origine fossile et biomassique, débarrassé de sa fraction organique. Ses principales sources sont les moteurs à combustion (diesel essentiellement), la combustion résidentielle de bois et de charbon, les centrales électriques, l'utilisation de fioul lourd ou du charbon, la combustion de déchets agricoles, ainsi que les incendies de forêt et de végétation. Il appartient aux particules fines PM2.5, mais se retrouve principalement dans la partie la plus petite de celles-ci, les PM1. Par ces deux caractéristiques, chimiques et physiques, le carbone suie permet de mieux comprendre les comportements de la pollution particulaire liée aux sources de combustion [10].

I - 2 - 5 Propriété radiatives des aérosols

Les particules peuvent avoir trois effets sur le bilan radiatif de la planète :

- ❖ **Effet direct :**

Les particules, selon leur composition, absorbent ou réémettent la lumière reçue. Il est difficile d'estimer cet effet car les incertitudes sur le nombre, la taille, la composition, la géométrie, la distribution verticale mais aussi le mélange des composants des particules entraîne une énorme incertitude sur les indices de réfraction et donc sur le forçage induit. Un précédent rapport du GIEC (Houghton et al. [2001]) donne, en première estimation, un refroidissement de la surface terrestre, un échaudement de l'atmosphère et un budget négatif au sommet de l'atmosphère qui tend à compenser le réchauffement dû aux gaz à effet de serre. Mais ceci reste une moyenne très globale, et il faut estimer les effets à l'échelle régionale [11].

- ❖ **Effet semi-direct :**

Les aérosols augmentent le rayonnement absorbé dans leur couche de résidence, modifiant le profil vertical de température dont dépendent la circulation atmosphérique et la formation des nuages [11].

❖ Effet indirect :

Les aérosols sont des noyaux de condensation de la vapeur d'eau (CCN, Cloud Condensation Nuclei). Une modification dans leur nombre ou leur composition peut avoir des effets sur la couverture nuageuse, et donc sur le bilan radiatif de la planète. En effet, les aérosols anthropiques étant plus petits que les aérosols terrigènes, les gouttes qui se forment sur ces aérosols sont donc plus petites, ce qui prolonge la durée de vie des nuages. A priori, la couverture nuageuse augmente avec leur nombre, ce qui a un impact sur le bilan radiatif. Cependant, cet effet présente de nombreuses incertitudes car les aérosols entraînent aussi des processus qui ont des effets contraires. D'une part, les rayons solaires atteignant la surface sont diminués, ce qui a pour effet de refroidir la surface, de limiter l'évaporation à la surface des océans et donc la formation de nuages. Dans en même temps, les nuages réémettent et absorbent le rayonnement infrarouge ce qui produit l'effet contraire en réchauffant l'atmosphère et la surface (effet de serre). De plus, si les aérosols sont absorbants, ils augmentent l'évaporation à leur surface, ce qui limite aussi la formation de nuages [11].

I - 2 - 6 Mode de formation des particules

Il existe trois modes principales de formation des particules [8] :

1. Nucléation des gaz :

Le mode principal de formation des aérosols est la nucléation de molécule de gaz formant des amas qui se solidifient ensuite. Ce mécanisme a lieu lorsque la pression de vapeur s'abaisse suffisamment.

2. Condensation des gaz sur l'aérosol :

La condensation est le dépôt de matière gazeuse sous forme de vapeur sur des particules déjà existantes. C'est un mode d'adsorption.

3. Coagulation d'aérosol : les particules se regroupent lors de collisions entre elles. Un choc entre deux particules conduit à la formation d'une particule plus grosse que les deux particules de départ.

La figure 6 résume les modes de formations cités précédemment.

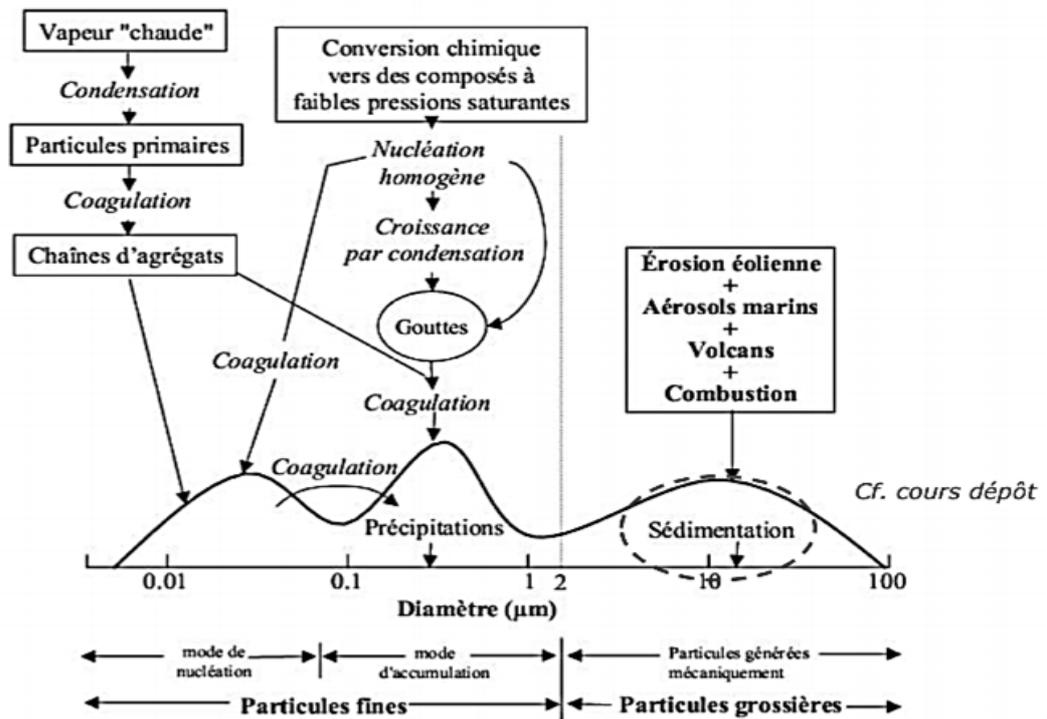


Figure 6. Représentation schématisques de la distribution granulométrique des aérosols et de leurs mécanismes de formation et de dépôt [8]

❖ Interaction avec la vapeur d'eau

Les aérosols captent la vapeur d'eau pour donner des nuages. Dans ce cas on appelle les aérosols des noyaux de condensation des nuages (CCN). La formation des nuages est toujours initialisée par la présence de particules. L'accroissement de la pression de vapeur au contact de la surface d'une goutte et l'abaissement de la pression par augmentation de la concentration du soluté sont deux phénomènes antagonistes conduisant à la formation des gouttes de pluie [8].

I - 2 - 7 Structure probable de l'aérosol

La structure suivante a été proposée mais aucune preuve définitive n'existe.

L'aérosol serait constitué d'un « cœur » formé de carbone suie (carbone type graphite), d'oxydes métalliques et d'aluminosilicates. Autour de ce cœur, Il y aurait une couche de composés organiques fonctionnalisés, plus ou moins mélangés à des électrolytes tels que les sulfates. Ces dépôts de surface seraient recouverts par de l'eau atmosphérique qui viendrait s'adsorber à la surface, conduisant ainsi à une augmentation de la taille de la particule (figure 7) [8].

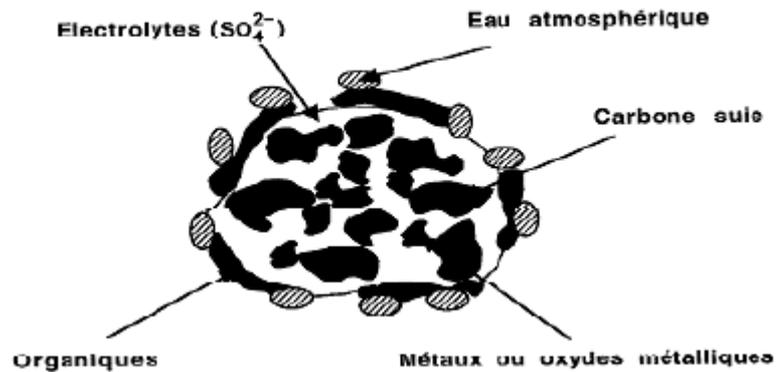


Figure 7. Schéma probable de l'aérosol [8]

I - 2 - 8 Temps de résidence de l'aérosol

Il faut également souligner que le temps de résidence d'une particule dans la basse atmosphère est fortement dépendant de sa taille. En effet les particules ayant une dimension entre 0,1 et 1 μm auront une durée de vie de l'ordre de 10 jours alors que les particules nanométriques et les particules grossières auront un temps de résidence dans l'atmosphère de l'ordre de quelques minutes à quelques heures [12].

La détermination de temps de résidence de l'aérosol nécessite la connaissance des :

1. Modes d'abattement des aérosols

Les aérosols ne restent pas beaucoup dans l'atmosphère car ils se déposent au sol par le phénomène d'abattement qui se présente selon les deux modes suivants

- ✓ Dépôt sec : par gravitation,
- ✓ Dépôt humide : dont on a le lessivage (wash out) où la particule est entraînée vers le sol par les gouttes de pluie et la dissolution (rain out) où la matière chimique est dissoute dans la goutte de pluie directement dans les nuages.

I - 2 - 9 Facteurs météorologiques influençant la dispersion des polluants :

- Le vent

La vitesse du vent augmente avec le gradient de pression entre anticyclone (zone de haute pression) et dépression (zone de basse pression). À la surface de la Terre, les différents obstacles ralentissent la vitesse du vent.

L'épaisseur de cette « *couche de frottement* » varie de 500 à 1 000 mètres. La vitesse du vent augmente donc avec l'altitude. D'autre part, le « *profil* » de vitesse du vent ou ensemble des vitesses moyennes est différent le jour ou la nuit.

Le jour, les courants de convection thermique ramènent rapidement au sol l'air qui se déplace en altitude, renforçant ainsi les vents de surface. Par contre, la nuit, la convection thermique plus faible accentue les vents d'altitude. Le vent a une grande importance dans la diffusion des polluants atmosphériques. Ainsi, avec un vent de force moyenne et de mauvaises conditions de rejet des effluents (cheminée trop basse, vitesse d'éjection des gaz insuffisante, etc.), il peut se produire un phénomène de retombée en panache vers le sol [13].

- **La turbulence :**

La turbulence est l'irrégularité du mouvement du vent. Elle est caractérisée par le croisement des trajectoires des masses d'air et par la superposition d'une fluctuation irrégulière, aléatoire et non reproductible de l'écoulement moyen du vent. Ce facteur est très difficile à traiter mathématiquement. La diffusion tourbillonnaire est le processus de mélange le plus important dans les basses couches de la troposphère. Il provoque la dispersion des polluants dans l'air.

Nous pouvons distinguer deux types de turbulence : la turbulence mécanique (tourbillons créés par la différence de vitesse des masses d'air, ou par le mouvement de l'air qui entre en contact avec des objets), et la turbulence thermique (tourbillons créés par la différence de température des masses d'air) [13].

- **La température des couches atmosphériques**

En montant dans l'atmosphère, une particule de polluant se dilate et se refroidit car elle est soumise à des pressions de plus en plus faibles. Inversement en descendant, elle s'échauffe car elle est soumise à des pressions croissantes qui la compriment. Il en résulte que l'ascension d'un volume d'effluent dépend de la différence entre sa température et celle des couches d'air qu'il traverse, sachant que l'effluent peut, en montant, se refroidir plus ou moins vite que l'air ambiant. Le taux de refroidissement théorique de l'air lorsqu'il est ascendant, déterminé dans des conditions physico-chimiques expérimentales bien définies, est appelé gradient adiabatique. Il est de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour 100 mètres d'élévation quand l'air n'est pas saturé en vapeur d'eau et de $-0,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ s'il est saturé en vapeur d'eau. Ces valeurs sont à comparer à la diminution de la température relevée par une sonde thermique s'élevant dans un air immobile.

En moyenne, on observe un refroidissement de 0,6 °C tous les 100 m, mais dans la réalité, les valeurs varient selon la position de la sonde dans la troposphère. Grâce au relevé de cette sonde thermique, les météorologues tracent la courbe d'état thermique de la masse d'air.

- Conditions météorologiques et pollution urbaine intense

Les principaux épisodes de pollution intense que les grandes métropoles connaissent ou ont connu, sont pour la plupart liés à des accumulations de fortes concentrations de polluants pendant de longues périodes de calme prolongé de l'air, lors de situations d'inversion de température associées à des vents faibles.

Parmi les nombreux exemples, on peut citer :

- Les brouillards de Paris du 10 au 22 décembre 1951, dus aux conditions météorologiques particulières : températures au sol voisines de 0 °C, vents très faibles (2 m/s), inversion de température considérable (+14 °C au sommet de la tour Eiffel !). On enregistra durant cette période une augmentation du nombre des décès.
- Le smog de Londres du 5 au 9 décembre 1952 qui coïncida avec une situation de stabilité comparable.
- Au cours de la vague de froid subie par la France pendant l'hiver 1996-1997, on a observé à plusieurs reprises des situations d'inversion du gradient thermique qui ont provoqué des alertes à la pollution à Paris, Lyon et d'autres grandes villes françaises.
- La région de Los Angeles est bordée d'un côté par la montagne qui empêche l'évacuation de l'air pollué venu de la ville et d'un autre côté par l'océan Pacifique aux eaux fraîches, facteur de stabilité de l'air. Les inversions de températures y sont fréquentes (270 jours par an) et empêchent fréquemment la diffusion des polluants atmosphériques, d'autant plus que les vents sont particulièrement faibles durant ces périodes [13].

• Topographie et diffusion des polluants

D'une manière générale, les phénomènes météorologiques locaux, la topographie et les obstacles sont des éléments qui modifient la circulation des vents et qui peuvent canaliser l'écoulement des polluants dans des directions privilégiées [13].

- **L'influence des régions encaissées**

Les inversions de températures peuvent résulter de circonstances géographiques particulières, comme dans les régions encaissées où l'air froid plus dense des sommets s'écoule, la nuit, vers les fonds de vallées dans lesquels il s'accumule, provoquant des brouillards qui accentuent le refroidissement. Ainsi, il n'est pas rare de mesurer des gradients anormaux de température : il peut alors faire plus chaud sur les sommets qu'au fond de la vallée. Elle entraîne une extrême stabilité des couches d'air inférieures et provoque de fortes concentrations de polluants au sol.

En ville, la configuration « encaissée » des bâtiments, l'étroitesse des rues et un vent réduit peuvent contribuer à la concentration des polluants atmosphériques près du sol. C'est également le cas pour les parkings souterrains, les tunnels...

- **Le rôle des versants montagneux**

Le relief en général exerce une action dynamique sur l'écoulement de l'air. Lorsque le vent heurte un obstacle, son écoulement se trouve perturbé et certains filets d'air contournent la barrière qui leur est opposée, tandis que d'autres tendent à épouser plus ou moins le profil du relief, de sorte qu'une montagne engendre une zone d'ascendance de l'air sur sa face « au vent » suivie d'une zone de subsidence sur sa face « sous le vent ».

- **Les brises de pente**

Les brises de pente sont dues à la différence de température entre le sol incliné d'un relief et l'air libre au même niveau. Le jour, sous l'influence du rayonnement solaire, le sol se réchauffe plus vite que l'air libre. L'air au contact du sol devient plus léger et tend donc à s'élever le long de la pente : c'est la brise montante. La nuit au contraire, l'air se refroidit au contact du sol, devient plus dense et s'écoule le long de la pente : c'est la brise descendante. Plus la vallée sera large et la pente bien exposée au soleil, plus la brise de pente sera accentuée.

- **Les brises de mer et de terre**

Le long des côtes ou des grands lacs, la différence de température entre la terre et l'eau suffit à établir des courants d'air locaux de la mer vers la terre le jour (brise de mer), et de la terre vers la mer la nuit (brise de terre). Sous les latitudes tempérées, les vents côtiers n'apparaissent nettement que l'été car ils sont masqués par le régime général des vents pendant les autres saisons.

Dans certaines agglomérations industrielles littorales comme Dunkerque, les polluants épargnent la ville lorsque le vent souffle de la terre vers la mer ; en revanche, les lieux habités sont particulièrement touchés quand le vent souffle de la mer vers la terre [13].

La brise de campagne

Les bâtiments et les différentes activités au sein d'une agglomération (transport, chauffage...) changent les caractéristiques thermiques de l'air. L'agglomération constitue un îlot de chaleur qui subsiste à la tombée du jour, tandis que la campagne environnante se refroidit. L'air chaud s'élève au-dessus de la ville, provoquant alors une dépression qui attire l'air plus frais des campagnes aux alentours. Les polluants émis à la périphérie de l'agglomération sont alors véhiculés vers le centre-ville où s'installe une atmosphère fortement polluée [8].

I - 2 - 10 La distribution verticale de l'aérosol

Cette distribution verticale de la concentration d'aérosol montre une décroissance régulière avec l'altitude, où elle représente un maximum à la base de la tropopause, suivie d'une légère augmentation à la stratosphère.

Enfin la détermination de ces paramètres et le temps de résidence nécessite l'utilisation des modèles cités dans l'ouvrage [8].

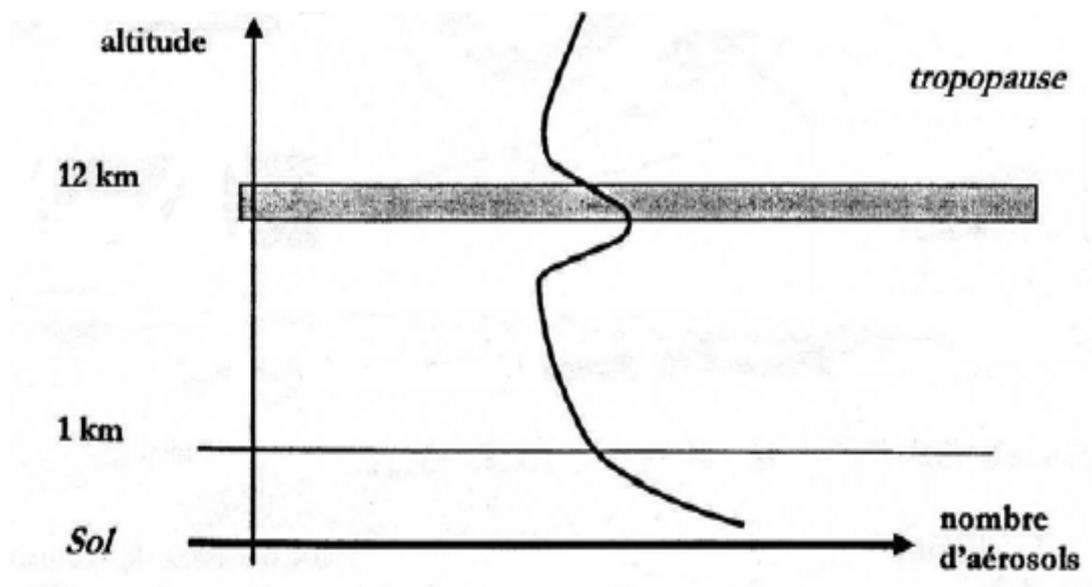


Figure 8. Distribution verticale de l'aérosol [8].

Globalement on considère que le temps de résidence moyenne est de l'ordre de **deux semaines**

Impact de la pollution particulaire sur la santé et l'environnement :

Malgré l'établissement des normes et l'amélioration des réglementations, les niveaux actuels de pollution de l'air représentent encore un risque considérable pour l'environnement et la santé humaine dans le monde. La surveillance particulièrement limitée (pratiquement inexistante en Algérie) des matières particulaires est néanmoins une source de préoccupation. Ce sous- chapitre résume quelques bases factuelles relatives aux effets sanitaires et environnementaux de la pollution de l'air due aux matières particulaires.

I - 3 - 1 Impact sanitaire de la pollution particulaire

L'appareil respiratoire constitue une voie d'exposition privilégiée pour les aérocontaminants, qu'il s'agisse de gaz ou de particules qui peuvent avoir des effets nocifs à court ou long terme. En moyenne, l'homme respire 15 m³ d'air par jour et la qualité des échanges respiratoires est la base du bon fonctionnement des métabolismes cellulaires, donc de la santé de l'homme.

Les maladies respiratoires sont actuellement la troisième cause de mortalité chez l'homme [14]. Le cheminement des PM dans le système respiratoire mène également à la circulation sanguine générale et peut entraîner de ce fait des affections d'autres fonctions physiologiques.

I - 3 - 2 Cheminement des particules dans le système respiratoire en fonction de leur granulométrie

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.

Après inhalation, la fraction inférieure à 10 µm (les particules plus grosses sont plus facilement éliminées par capture dans le nez) se dépose dans la partie supérieure du système respiratoire et les plus petites pénètrent encore plus profondément, où elles se déposent. De là, elles entrent plus facilement et rapidement dans la circulation sanguine.

La figure 9 montre les trois grandes régions de dépôt des particules.

1. La rétention des PMi se fait par 5 mécanismes principaux : La sédimentation, liée à la gravité agissant sur les particules
2. L'impaction inertielle, qui caractérise le comportement des particules massives.
3. L'interception, qui se produit lorsqu'une particule entre en contact avec une surface.
4. La diffusion, liée au mouvement aléatoire des particules très fines.
5. L'attraction électrostatique, lorsque les particules sont chargées.

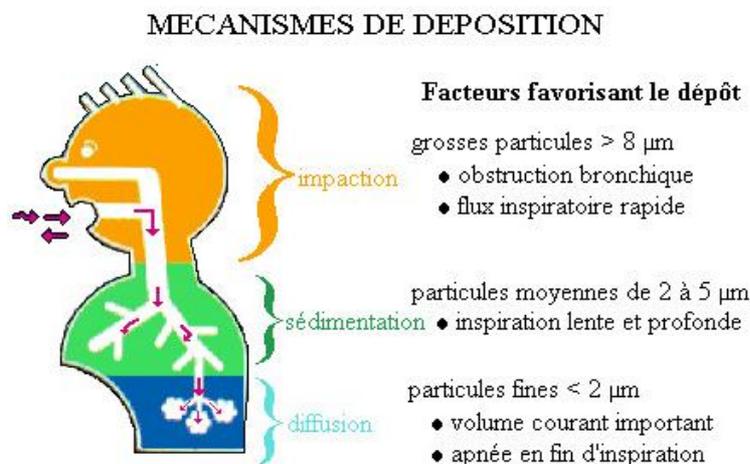


Figure 9. Mécanisme de dépôt des particules dans le système respiratoire [15]

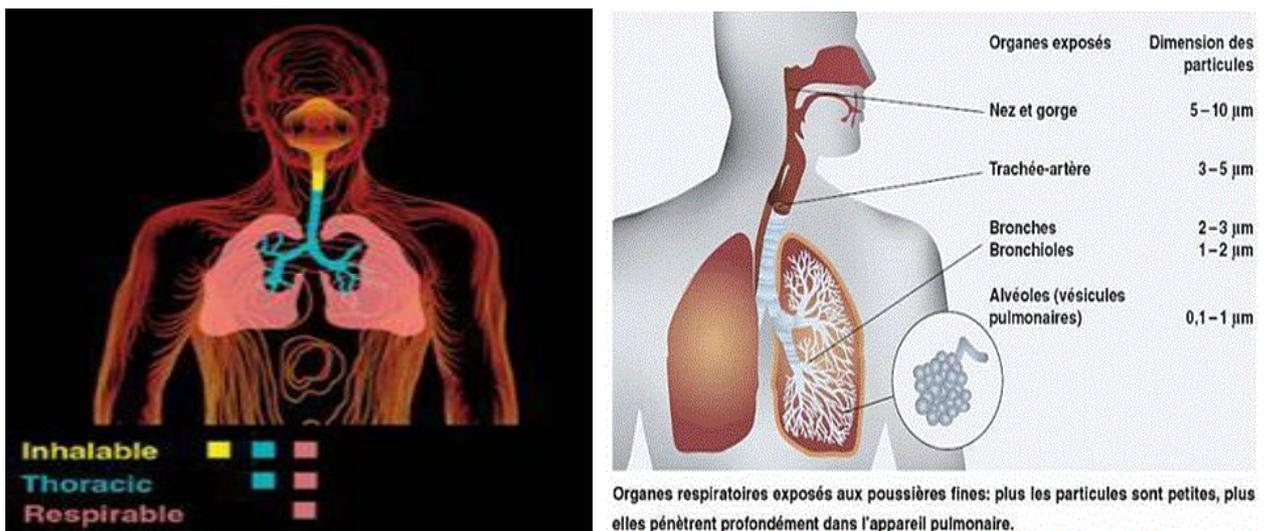


Figure 10. Région de dépôt des particules dans le système respiratoire [15]

La région naso-pharyngée correspond aux voies respiratoires supérieures (partie jaune de la figure 9) où se déposent les particules dites inhalables d'une taille généralement inférieure à 10 μm . Les particules d'une taille inférieure à 10 μm se logent dans la région trachéobronchiale (en bleu). Les particules fines, dites respirables, vont dans les poumons (en rose), voire pour les plus fines qui descendent jusqu'aux bronchioles et alvéoles pulmonaires.

I - 3 - 3 La persistance des particules dans l'organisme et les conséquences sur le système immunitaire

Le temps de séjour des particules dans l'appareil respiratoire dépend de la clairance particulaire*¹.

Au niveau des voies aériennes, la clairance est « mucociliaire et l'élimination des particules, est rapide (en 24h environ). Pour les particules déposées au niveau alvéolaire, la clairance macrophagique est plus lente, la demi-vie des particules peut atteindre des mois et, dans des conditions de surcharge chronique, conduit à l'accumulation » [8]. En d'autres termes, les particules les plus fines ont la capacité d'aller s'enkyster au plus profond des poumons pour y persister, voire ne quasiment plus en ressortir. Enfin, leur vie dans l'organisme va aussi dépendre de leur solubilité. La figure 10 résume les effets des particules sur le corps humain.

* C'est-à-dire la capacité des poumons à éliminer les particules inhalées, elle-même dépendante de la toxicité intrinsèque des particules.

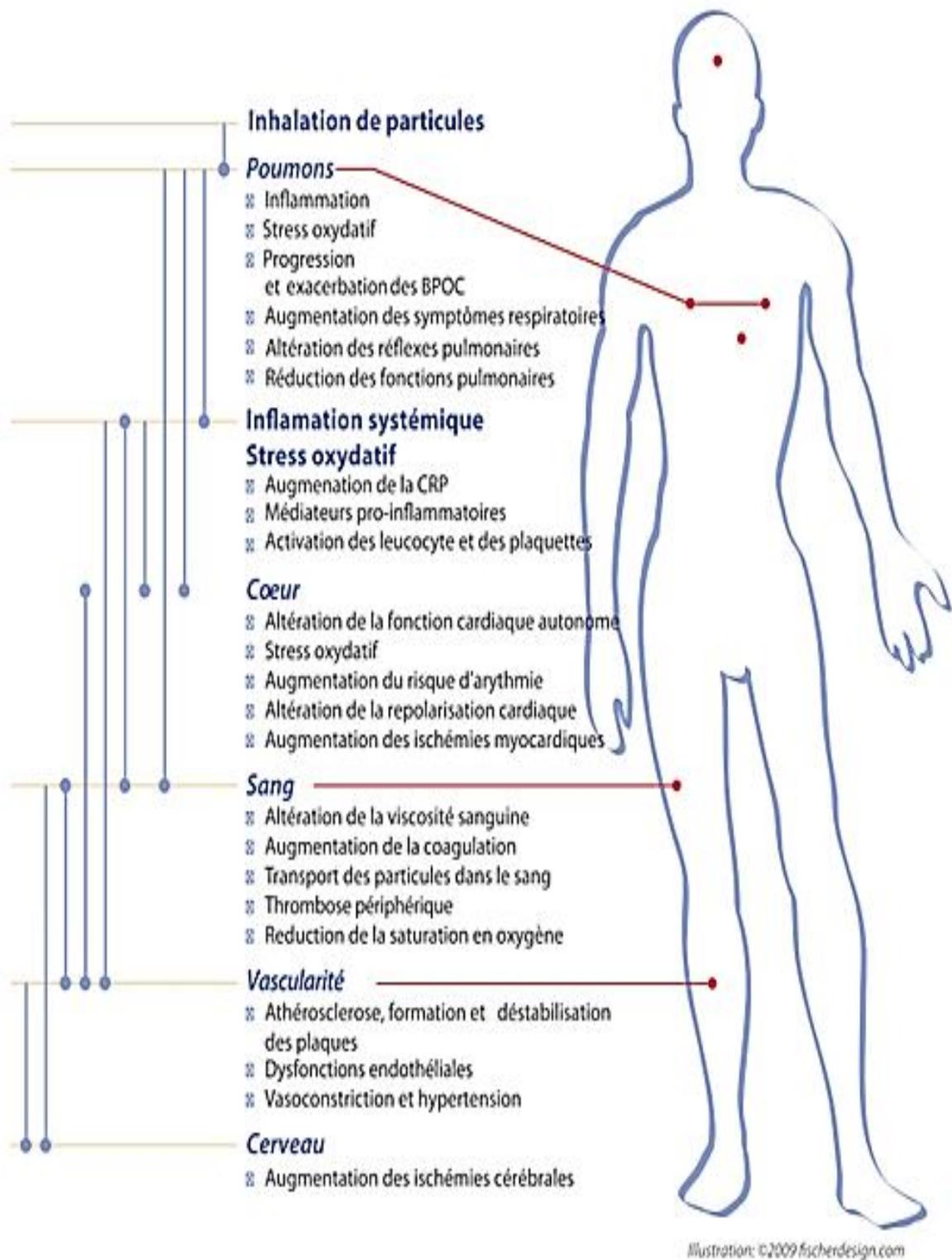
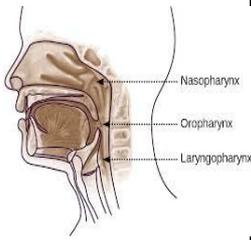
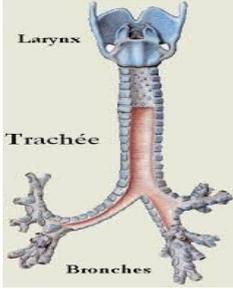
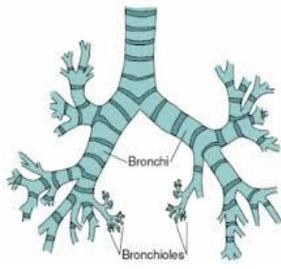
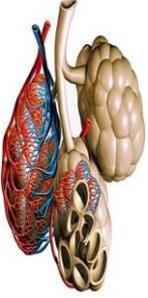


Figure 11. Mécanismes expliquant les effets sanitaires des particules fines [16]

Le tableau ci-dessus résume le devenir des particules dans le système respiratoire

Tableau 1. Devenir des particules dans le système respiratoire

Granulométrie PM	5 -10 μm	3-5 μm	2-3 μm	1-2 μm	Inférieur à 1 μm
Dépôt des PM au niveau système respiratoire	Région nasopharyngée, (voies aériennes supérieures) 	La région trachéobronchiale 	branches 	bronchioles	Alvéoles 
Durée de vie des PM	24 h environ	Des mois			
Mécanisme de rétention des PM par le système	Filtration interception et l'impaction	Impaction /sédimentation		Certaines seront détruites et d'autres retenues alors que d'autres sont véhiculées et diffusées par voie hématogène dans tous les organes	
Capacité de pénétration alvéolaire	Les particules d'un diamètre aérodynamique de 10 μm ont une pénétration alvéolaire de 1,3 %, les particules de 5 μm ont une pénétration de 30 %, celles de 4 μm pénètrent à 50 % et celles de 1 μm sont associées à une pénétration de 97 %. Une partie des petites particules est exhalée.				

I - 3 - 4 Evaluation des effets des particules polluantes sur la santé

Les chercheurs utilisent trois principales approches pour étudier les relations entre santé humaine et polluants atmosphériques

- **Les études épidémiologiques**
 - Analyse de l'effet de la pollution atmosphérique sur la santé,
 - Relation statistique entre le niveau de pollution et l'effet sanitaire,
 - Identification des effets sanitaires chez les populations sensibles.
- **Les études toxicologiques** : permettent d'obtenir une compréhension des phénomènes qui mènent aux effets sanitaires.
 - Études in vitro : Elles sont effectuées avec des cultures cellulaires.
 - Études in vivo.
 - Études cliniques avec des individus.
 - Extrapolation de l'animal à l'homme.

I - 3 - 5 Effet à long et à court terme des PMi sur la santé

Rien ne permet de penser qu'il existe un seuil au-dessous duquel on pourrait s'attendre à ce qu'il n'y ait aucun effet indésirable sur la santé. Toute augmentation du niveau de concentration de particules entraîne une augmentation des effets sanitaires dans les populations exposées [9].

L'importance des effets négatifs pour la santé dépend, outre de la constitution et de la sensibilité de chaque individu, de la composition des particules fines, de leur concentration, du temps d'exposition et de la distribution de taille des particules. Il est désormais établi que l'exposition à court et long terme aux particules fines ambiantes (PM – Particulate Matter) est responsable d'une augmentation de la mortalité et de la morbidité par maladies cardiovasculaires et respiratoires, aussi bien dans les pays développés que dans les pays émergents. La majorité des recherches ont porté sur l'étude des relations causales entre les effets néfastes sur la santé et les particules dites « thoraciques », c'est-à-dire les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm (PM10) et/ou inférieur à 2,5 µm (PM2.5).

- **Les effets à court terme** qui sont les manifestations cliniques, fonctionnelles ou biologiques survenant dans des délais brefs (quelques jours ou semaines) suite aux variations journalières des niveaux ambiants de pollution atmosphérique.

- **Les effets à long terme** qui peuvent survenir après une exposition chronique (plusieurs mois ou années) à la pollution atmosphérique et qui peuvent induire une surmortalité et une réduction de l'espérance de vie. L'exposition à long terme aux particules fines conduit à un risque accru de cancer du poumon et à une augmentation du risque de décès de toutes causes et plus spécifiquement par maladies cardio-respiratoires.

Il a été démontré que l'exposition à certains polluants atmosphériques (notamment les particules) est responsable d'effets dits sans seuil, c'est-à-dire que le risque de mortalité augmente avec l'exposition. Cette augmentation est imputable à la pollution atmosphérique urbaine dans son ensemble. Ainsi, même si les particules ont été mises en cause plus nettement, il est difficile d'attribuer un effet spécifique à un polluant particulier.

I - 3 - 6 Un impact sanitaire substantiel

Le message essentiel apporté par l'épidémiologie est que les niveaux de polluants actuellement observés sont associés à des risques pour la santé. Si l'intensité des effets observés peut paraître faible par rapport à d'autres facteurs de risque (comme le tabac par exemple), la taille de la population exposée est importante et donc le bénéfice associé à une réduction de l'exposition de la population aux polluants serait tout à fait substantiel en termes de santé publique.

Comme le montrent par exemple les résultats récents de l'étude Aphekom, si les niveaux de particules fines PM_{2.5} étaient conformes aux objectifs de qualité de l'OMS de 10 µg/m³ en moyenne annuelle, les habitants de Paris et de la proche couronne gagneraient six mois d'espérance de vie (figure 11) [17].

Par ailleurs, cette estimation d'impact porte sur les décès anticipés, qui sont les conséquences les plus graves des expositions à la pollution atmosphérique. Néanmoins, la pollution atmosphérique est susceptible d'entraîner d'autres manifestations, de sévérité moindre, mais qui concernent une part plus importante de la population (figure 12).

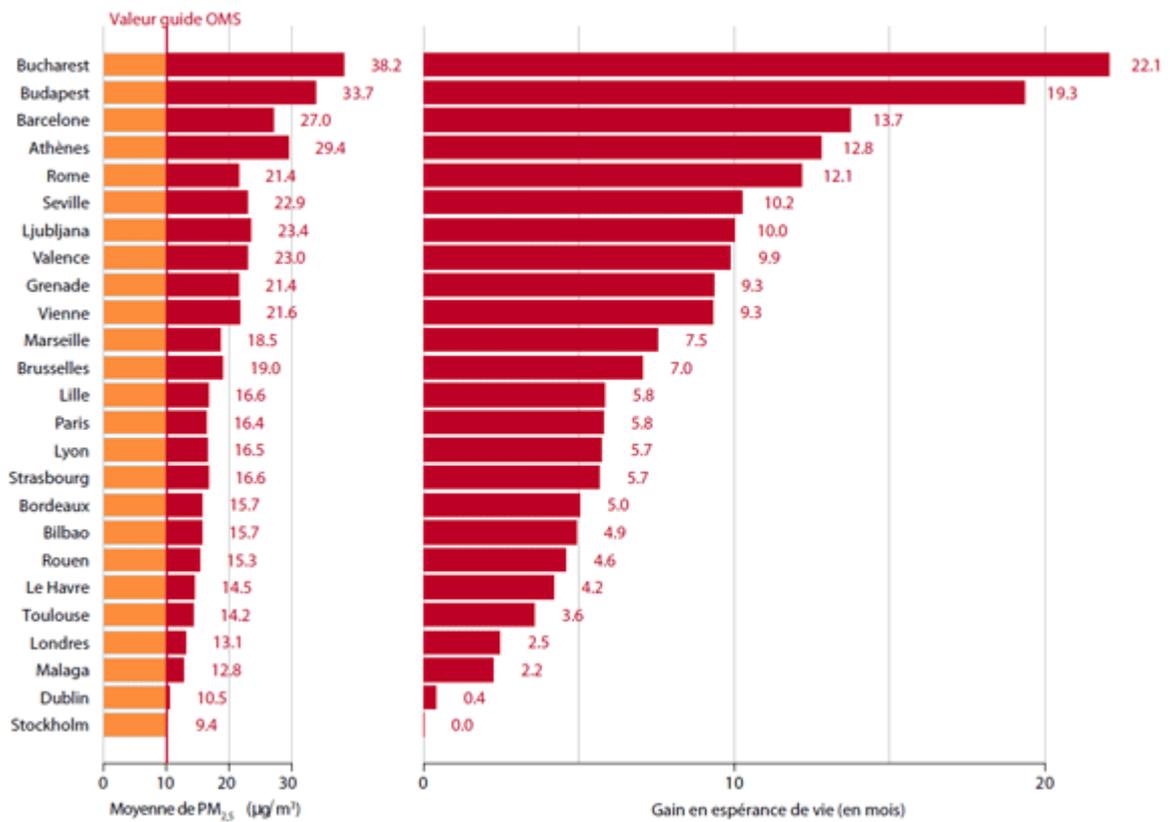


Figure 12. Gain d'espérance de vie pour les personnes de 30 ans et plus dans 25 villes européennes si les niveaux annuels moyens en PM_{2.5} étaient ramenés à la valeur guide OMS de 10 µg/m [16]

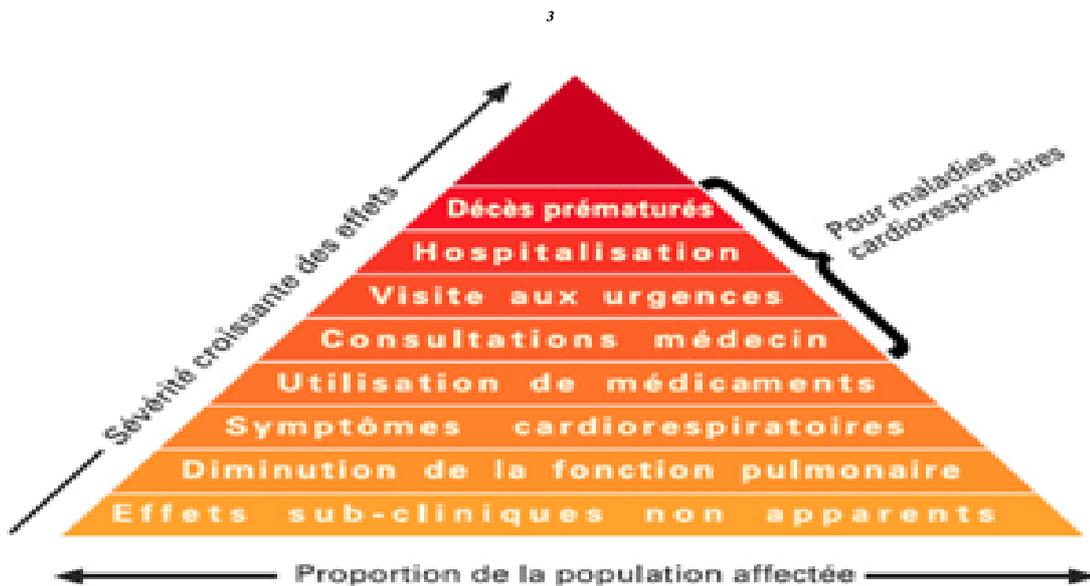


Figure 13. Pyramide des effets de la pollution atmosphérique [16]

I - 3 - 7 Effet de la pollution particulaire sur l'environnement :

En dehors de leur effet sur la santé humaine, les particules interviennent dans de nombreuses problématiques environnementales, dont le changement climatique, la formation d'ozone troposphérique, la réduction de la visibilité, et les régimes hydrologiques [18].

I - 3 - 7 - 1 Effets de la pollution atmosphérique sur le changement climatique

La pollution atmosphérique et les changements climatiques sont les problèmes du 21^{ème} siècle, qui sont liés de plusieurs manières.

La température moyenne de notre planète résulte de l'équilibre entre le flux de rayonnement qui lui parvient du soleil, et le flux de rayonnement infrarouge qu'elle renvoie vers l'espace. L'effet de serre est dû à la présence de certains gaz qui interfèrent avec ce flux infrarouge et l'empêchent partiellement de s'échapper vers l'espace, ce qui provoque un réchauffement de l'atmosphère.

L'effet des particules en termes de changement climatique est plus complexe et emprunte plusieurs voies. Il se traduit par des effets opposés de réchauffement ou de refroidissement de l'atmosphère, notamment selon la composition chimique des particules, certains entraînent un refroidissement net (par exemple, les sulfates et les nitrates), tandis que d'autres conduisent au réchauffement (carbone noire), ces derniers sont dus aux changements des propriétés radiatives de l'aérosol (effet direct).

Ces particules peuvent entraîner des changements dans les précipitations ou la formation de nuages (effet indirect). Ces différents effets sont en général classés en deux grandes catégories [19]

- **Les effets directs :** dans ce cas se sont les propriétés de dispersion et d'absorption du rayonnement solaire incident et infrarouge renvoyés par les particules.

- **Les effets indirects :** les particules interviennent par l'intermédiaire d'autres acteurs de l'équilibre radiatif du globe, et principalement les différentes catégories de nuages.

Le dépôt peut entraîner des modifications de l'albédo de surface (La capacité de la terre à réfléchir le rayonnement du soleil).

Ils sont donc connus sous le nom de polluants climatiques de courte durée (SLCP).

I - 3 - 7 - 2 Pollution particulaire et cycles hydrologiques

Certains des effets décrits auparavant ont des implications, non seulement en termes de réchauffement global, mais également en termes de climatologie et d'hydrologie locales.

L'interaction des particules (notamment les particules de carbone-suie) avec les nuages, peut se traduire par l'inhibition des précipitations et donc une perturbation des régimes hydrologiques.

Ce phénomène a été mis en évidence en Océanie et au-dessus de l'océan Indien, et sur ce dernier site on a pu lui attribuer la baisse de l'intensité des cycles hydrologiques se déroulant au-dessus de cet océan et les effets qui en découlent (modifications du climat de mousson dans la région).

Les particules minérales peuvent avoir également des effets régionaux sur le climat et les précipitations.

Dans la modélisation globale de ces effets effectuée en 2000 par Miller et Tegen, il apparaît que l'Europe est moins concernée que l'Asie du Sud-Est, ou que la moitié sud de l'Afrique.

Enfin, les particules de carbone-suie peuvent avoir un effet d'accélération de la fonte des neiges, en raison de leurs capacités d'absorption des rayonnements solaires.

✓ **Les effets des particules sur la visibilité**

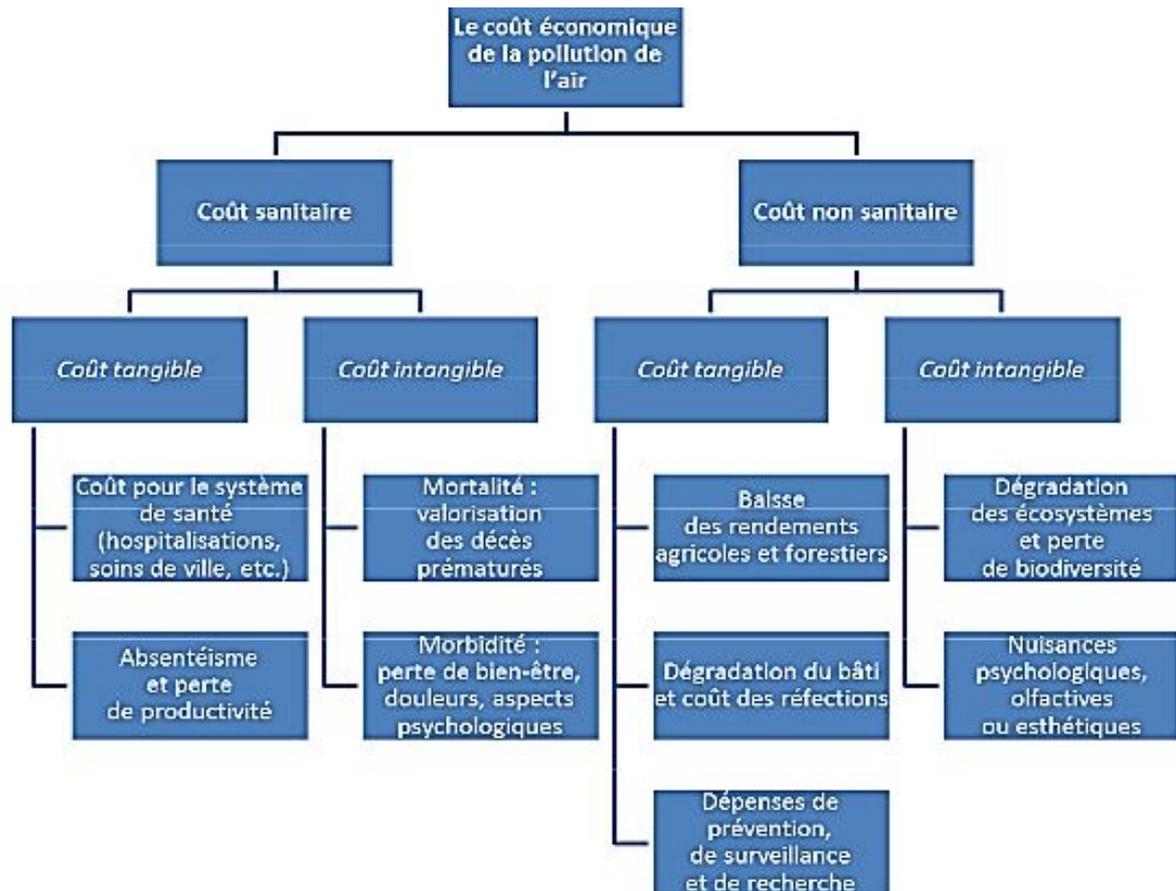
La réduction de la visibilité est une conséquence perceptible par l'œil humain des brouillards de pollution régionaux. Elle est due à la réduction de la distance maximale de vision, à la réduction des contrastes et de la clarté des paysages.

Bien qu'en apparence il s'agisse d'une notion intuitive et subjective, il n'en est rien et la visibilité peut être mesurée de façon simple et objective, par l'intermédiaire du coefficient d'extinction lumineuse de l'atmosphère, qui est un paramètre physique facilement accessible à la mesure.

La mesure de la visibilité est d'ailleurs pratiquée régulièrement depuis de longue date sur les aéroports.

Figure 14. Aperçu synthétique du coût économique de la pollution de l'air [20]

Les particules sont les principaux responsables de ce phénomène, notamment l'aérosol de sulfate et l'aérosol organique. L'humidité de l'atmosphère joue un rôle promoteur de la perte



de visibilité : en milieu humide la taille des aérosols hydrophiles (sulfates...) s'accroît, ce qui augmente leur pouvoir de dispersion des rayonnements lumineux.

I - 3 - 8 Impact économique de la pollution de l'air :

L'évaluation du coût sanitaire de la pollution de l'air comprend deux étapes [20].

1. L'évaluation des impacts sanitaires : dont on a **les évaluations de l'impact sanitaire**

2. (EIS) qui se référant aux études épidémiologiques qui permettent d'établir des relations <<exposition-risque>> (E-R) et **le risque attribuable à l'environnement**,
3. L'évaluation du coût sanitaire de la pollution de l'air : Il s'agit de monétariser les effets sanitaires de la pollution de l'air afin d'apprécier le coût pour la société qu'ils représentent.

Pour cela les études ont généralement recours aux concepts de Valeur de Vie Statistiques (VVS).

La figure 13 représente un aperçu synthétique du coût économique de la pollution de l'air : Les coûts estimés par les études actuelles sont très inférieurs au coût réel de la pollution de l'air incertitudes portant sur [20] :

- ❖ La mesure des effets sanitaires de la pollution de l'air, et en particulier les effets de long terme. Les impacts de certains polluants sur la santé sont encore mal connus ou n'ont été découverts que récemment. Par ailleurs, l'effet cocktail des différents polluants de l'air n'est pas pris en compte dans les différentes études épidémiologiques menées, qui servent de base au calcul du coût économique de la pollution de l'air ;
- ❖ La mesure des effets non sanitaires de la pollution de l'air, qui sont encore très peu documentés.
- ❖ Les calculs de la part des effets sanitaires à la pollution de l'air et leur monétarisation, compte tenu des difficultés méthodologiques propres aux méthodes de valorisation de la mortalité et de la morbidité imputables à la pollution.

Lutte contre la pollution par les PMi

I - 4 - 1 Règlementations :

Les normes de la qualité de l'air sont fixées à l'échelle internationale par des organismes tels que la Communauté Européenne, les Standards Américains et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Dans le cas des particules, seuls les PM10 et les PM2.5 sont normés. Les PM1 ne sont pas encore normés et leur suivi n'est pas obligatoire

Dans plusieurs pays, y compris en Algérie, il existe des lois et textes réglementaires qui rendent **obligatoire la surveillance de la qualité de l'air au niveau local**, tout en définissant des **objectifs de qualité**, des **seuils d'alertes** et **l'obligation d'information de la population**.

De même, il existe dans plusieurs grandes villes européennes :

✓ *Plans Régionaux pour la Qualité de l'Air* qui permettent d'atteindre les objectifs de qualité de l'air et de réduire sa pollution et implicitement ses effets. En général, ils s'appuient sur des inventaires d'émissions, des évaluations de la qualité de l'air, ainsi que des effets sur la santé publique et sur l'environnement. Ces plans sont révisés tous les cinq ans, si les objectifs fixés n'ont pas été atteints.

✓ *Plans de Protection de l'Atmosphère (PPA)* qui ont pour but de faire respecter les valeurs limites et cibles des polluants. Ils permettent aux autorités de prononcer la restriction ou la suspension des activités polluantes et de prescrire des limitations à la circulation des véhicules.

✓ *Plans de Déplacements Urbains (PDU)* qui ont pour but d'assurer un équilibre durable entre le besoin de mobilité et la facilité à son accès, en plus de la protection de la santé humaine et de l'environnement.

En Algérie, d'après la loi sur la Protection de l'Environnement et Du Développement Durable de 2003, Le Wali possède des prorogatifs similaires. C'est d'ailleurs dans ce cadre qu'à Ghazaouet, l'usine de ALZINC a été obligée à maintes reprises d'arrêter sa production en raison de fortes émissions de SO₂.

- ✓ En général, la réglementation fixe divers seuils avec un objectif bien déterminé
 - **Les objectifs de qualité** : fixant un niveau à atteindre à long terme et à le maintenir afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble ;
 - **Les valeurs cibles** : fixant une valeur à atteindre, dans un délai précis, afin de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement ;
 - **Les valeurs limites** : traduisant un niveau à ne pas dépasser, afin de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement ;
 - **Le seuil d'information et de recommandation** : exprime la valeur au-delà de laquelle, l'exposition à la pollution devient un risque pour la santé humaine ;

- **Le seuil d'alerte** : traduisant un niveau au-delà duquel l'exposition des populations présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population et justifiant l'intervention de mesures d'urgence.

I - 4 - 2 Directives Européennes

La législation de l'Union Européenne relative à la qualité de l'air fixe des valeurs limites contraignantes et/ou des valeurs cibles indicatives pour les concentrations admissibles de certains polluants dans l'atmosphère. Lorsqu'il existe un risque que les valeurs limites soient dépassées, il y a lieu de prendre des mesures de réduction de la pollution dans le cadre d'un plan relatif à la qualité de l'air.

La directive de 2008 sur la qualité de l'air permet aux États Membres, dans des conditions strictement définies, de bénéficier d'un délai supplémentaire pour se conformer aux normes de qualité de l'air ; ce délai s'étendait jusqu'à 2011 pour les PM10 et jusqu'en 2015 au plus tard pour le NO₂ et le benzène. Durant la période de prorogation du délai, les valeurs limites continuent de s'appliquer, augmentées d'une marge de dépassement [21].

a) Particules « PM10 »

Objectif de qualité pour la protection de la santé humaine	30 µg/m ³	Moyenne annuelle civile
Valeurs limites pour la protection de la santé humaine	40 µg/m ³	moyenne annuelle civile
	50 µg/m ³	Moyenne journalière à ne pas dépasser plus de trente-cinq fois par année civile
Seuil d'information et de recommandation	50 µg/m ³	Moyenne journalière
Seuil d'alerte (fixé par la France)	80 µg/m ³	Moyenne journalière

b) « PM2.5 »

Objectif de qualité pour la protection de la santé humaine	10 µg/m ³	Moyenne annuelle civile
Valeur cible pour la protection de la santé humaine	20 µg/m ³	Moyenne annuelle civile

Valeur limite pour la protection de la santé humaine	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, à partir du 1 ^{er} Janvier 2015	Moyenne annuelle civile
--	--	-------------------------

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
PM10	50	24 heures
	20	1 an
PM2.5	25	24 heures
	10	1 an

I - 4 - 3 Règlementation Algérienne

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.

Pour les particules fines en suspension Les valeurs limites ainsi que les objectifs de qualité de l’air sont fixés comme suit [22]

Art. 6. Les valeurs limites ainsi que les objectifs de qualité de l’air sont fixés comme suit :

Particules fines en suspension :

a) Objectif de qualité : 50 micro grammes/ Nm^3 ;

b) Valeur limite : 80 micro grammes/ Nm^3 .

Un décret sur les émissions industrielles fixe les limites d’émission à la cheminée ou filtre par exemple pour une cimenterie, il est toléré un facteur d’émission de particules de 30 mg/Nm^3 ; limite qui peut être facilement atteinte par des électro filtres ou filtres à manche.

I - 4 - 4 Mesures de réduction primaires

Les mesures primaires sont des mesures permettant la réduction des émissions de particules à la source contrairement aux mesures secondaires qui permettent de traiter les polluants déjà émis et présents dans les effluents gazeux.

Les émissions de poussières dues à la combustion (en particulier de combustibles solides) sont en grande partie dues à une combustion incomplète. La principale mesure primaire de réduction est donc l'amélioration de la combustion. Cela permet de réduire à la source les émissions de particules mais également l'ensemble des émissions de composés imbrûlés (COV, HAP, CO, etc.). Différentes techniques de combustion permettent d'améliorer la combustion et donc de réduire les émissions de composés imbrûlés.

La technique principale d'amélioration de la combustion est la régulation de la combustion permettant de respecter la règle des 4T (température, teneur en oxygène, turbulence et temps de séjour) et ainsi d'optimiser la combustion.

La qualité de la combustion n'est pas seulement influencée par la technologie de l'appareil brûlant le combustible mais également par un grand nombre de facteurs tels que la qualité du combustible et le type de conduit de cheminée [23].

I - 4 - 5 Mesures de réduction secondaires

Les mesures secondaires réduisent les émissions de particules en traitant avant rejet à la cheminée, les polluants présents dans les effluents gazeux contrairement aux mesures primaires qui réduisent les émissions à la source.

Pour l'élimination des particules dans l'industrie et les installations de combustion, il existe quatre grandes familles de dépoussiéreurs :

- Les dépoussiéreurs mécaniques (séparateurs, cyclones et multi-cyclones) ;
- Les dépoussiéreurs humides (laveurs);
- Les dépoussiéreurs électrostatiques (électrofiltres) ;
- Les dépoussiéreurs à couches filtrantes (filtres à manches).

Dans **les installations de combustion**, les principales techniques utilisées sont :

- Les cyclones et multi-cyclones : pour des faibles puissances (inférieures à 5 MW),
- Les électrofiltres et les filtres à manches : pour des puissances plus élevées (supérieures à 5 MW).

Plusieurs traitements peuvent être mis en cascade sur les installations de grande puissance avec par exemple l'association d'un multi-cyclone et d'un électrofiltre ou d'un multi-cyclone et d'un filtre à manches : le multi-cyclone en amont permettant de limiter la vitesse d'encrassement de l'électrofiltre ou du filtre à manches et de séparer les plus grosses particules.

Cyclones

Dans ce type de dispositif, les gaz poussiéreux à traiter sont mis en rotation à une vitesse aussi rapide que le permettent les limites admissibles de perte de charge et d'abrasion. Les particules sont ainsi projetées sur les parois par la force centrifuge. Ces particules s'agglomèrent et tombent sous l'effet de la pesanteur. L'air épuré remonte au centre du tourbillon par la cheminée centrale du cyclone.

La force de séparation des poussières est proportionnelle à la vitesse et inversement proportionnelle au rayon du cyclone.

Il y a donc intérêt à ce que le rayon de séparation soit le plus petit possible. Plus le rayon du cyclone est petit, plus l'accélération centrifuge est grande et donc meilleure est la séparation. L'association de plusieurs cyclones de faible diamètre (quelques dizaines de centimètres) est généralement privilégiée. Ce type d'installation est appelé multi-cyclone.

Ces dispositifs collectent efficacement les grosses particules mais leur efficacité chute pour les faibles granulométries ainsi que pour de faibles taux d'empoussièrément. Les multi-cyclones sont moins efficaces que les autres techniques de dépolluissage, notamment pour les $PM_{2.5}$.

Séparateurs mécaniques

Il s'agit d'un dispositif mécanique de collecte des poussières. Il fonctionne comme un cyclone mais le procédé de séparation et de collecte des particules s'effectue séparément au moyen d'un séparateur et d'un cyclone collecteur. Le séparateur dispose d'une entrée d'air et de deux sorties, l'une pour l'air dépollué, l'autre pour l'air chargé. L'air chargé est redirigé vers le cyclone, les particules ne quittent donc pas le système dans lequel elles circulent.

L'efficacité de ce procédé est élevée et comparable à celle d'un électrofiltre pour les particules de tailles supérieures à 2,5 μm . Elle chute néanmoins pour les particules de taille inférieure à

1 μm (<50%). Ce dispositif a comme principal intérêt son faible coût d'investissement et d'exploitation.

Cette technique peut être améliorée en induisant un champ électrique au niveau du séparateur. Ce champ permet de séparer plus efficacement les particules fines qui seront attirées sur les surfaces du cyclone en s'agglomérant aux particules de plus grandes dimensions. Selon certains constructeurs, ce type de technologie peut avoir une efficacité de dépoussiérage supérieure à 94 % [19].

Laveurs et venturi

Un laveur est un séparateur dans lequel le gaz contenant les particules solides est mis en contact avec un liquide de lavage. Les particules sont alors adsorbées par la masse du liquide.

Pour améliorer l'efficacité de captation d'un laveur, il est nécessaire d'augmenter la surface de contact entre le liquide et les particules solides en optimisant le mélange ou en obtenant les gouttelettes les plus fines possibles. En effet, pour pouvoir collecter une particule, la gouttelette de liquide doit avoir une taille voisine de celle-ci.

Les systèmes Venturi et autres laveurs sont plus efficaces que les multi-cyclones en particulier pour les granulométries inférieures à 1 μm . En effet, les laveurs et Venturi sont considérés efficaces sur des particules de tailles supérieures à 0,5 μm . Des efficacités plus élevées peuvent être atteintes en associant un multi cyclone et un laveur, mais les coûts d'investissement restreignent le champ d'application de ce dispositif d'épuration à des puissances d'installation élevées.

L'inconvénient majeur des laveurs est le fait qu'ils entraînent un transfert de pollution d'une phase gazeuse à une phase liquide qui doit ensuite être traitée. Ce traitement peut engendrer des coûts opératoires non négligeables, qui avec les importantes consommations d'eau et d'énergie associées à la mise en œuvre du laveur peuvent être des points faibles de ces systèmes.

Pour le dépoussiérage, les laveurs s'avèrent parfois indispensables lorsque les gaz à traiter sont proches de leur saturation en eau, ou lorsque des problèmes de sécurité rendent très difficile leur épuration par voie sèche. Ces dispositifs permettent notamment de traiter les gaz

acides et les métaux sous forme gazeuse. Ils sont particulièrement adaptés aux poussières explosibles et aux gaz inflammables [23].

Un électrofiltre est un dispositif constitué de plaques (électrodes réceptrices) disposées verticalement entre lesquelles se trouvent des fils tendus verticalement (électrodes émissives) alimentés électriquement. Une tension négative appliquée aux électrodes émissives, engendre la formation d'électrons au voisinage de celles-ci, qui ionisent les molécules de gaz. Ces ions sont attirés par les plaques collectrices et chargent les poussières (effet couronne) sur leurs parcours. Ces poussières sont alors attirées par les plaques collectrices et y adhèrent.

Des marteaux frappant régulièrement ces plaques permettent de décrocher les particules par intervalles réguliers. Les poussières sont ainsi collectées pour être évacuées.

Les électrofiltres disposent d'un ou plusieurs champs de captation pour mieux maîtriser le champ électrique tout au long de l'électrofiltre et au fur et à mesure de l'avancement du dépolluissage (généralement au minimum deux et jusqu'à cinq ou six pour obtenir des niveaux de concentrations inférieurs à 10 mg/Nm^3). Chaque champ est constitué de plusieurs électrodes émettrices et de plaques réceptrices positionnées verticalement et de manière alternative. Dans la configuration la plus courante, les gaz poussiéreux circulent horizontalement, et à basse vitesse (environ 1 m.s^{-1}) entre des plaques verticales distantes de 200 à 500 mm.

Les principaux paramètres influençant sur le fonctionnement de l'électrofiltre sont en outre la résistivité des poussières (dans la pratique comprise entre 10^6 et $10^{14} \Omega \text{ cm}$) et la vitesse de passage des gaz.

Pour éviter le frappage permettant de décoller les poussières qui peut induire leur remise en suspension, certains électrofiltres (appelés « électrofiltres humides ») disposent d'un écoulement de liquide le long des plaques collectrices. Cette technique nécessite le traitement du liquide en aval.

La pulvérisation d'une solution spécifique permet en plus de capter certains composés tels que : HCl, HF, SO₂, SO₃, H₂S, NH₃, ... etc. La présence de liquide limite la température de fonctionnement des électrofiltres humides à 100°C maximum au lieu de 350°C pour des électrofiltres secs.

Il existe un grand nombre de configurations qui permettent d'atteindre des efficacités de plus de 99 % pour les particules de taille inférieure à 1 μm (avec notamment la mise en œuvre de 3 à 5 champs). Une bonne configuration peut permettre d'atteindre des performances proches de ce qui peut être obtenu à la sortie de filtres à manches.

L'efficacité de l'électrofiltre dépend en partie de la résistivité des particules. C'est pourquoi, il peut être nécessaire d'injecter au préalable des gaz auxiliaires permettant d'optimiser cette résistivité et ainsi d'améliorer le captage de particules [23].

Filtres à manches

Le filtre à manches est constitué d'un caisson fermé à sa base par une trémie, dans lequel sont suspendues des manches filtrantes ouvertes à une extrémité.

Les gaz chargés de poussières pénètrent dans la partie basse du caisson et rencontrent dans un premier temps un déflecteur qui permet de séparer les grosses particules de poussières des gaz à traiter. Ceux-ci passent ensuite à travers les manches de l'extérieur vers l'intérieur pour être évacués sur la partie haute du filtre. Les poussières qui sont retenues sur l'extérieur du filtre forment une couche appelée gâteau de filtration. Ce gâteau de filtration permet de former un filtre supplémentaire qui augmente la quantité de poussières captées mais augmente également la perte de charge. Il est donc nécessaire de décolmater les manches régulièrement. Les dispositions des appareils sont très nombreuses, ainsi que les techniques de décolmatage. Les vitesses de filtration sont comprises entre 0,6 et 6 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, selon le problème à traiter et le type de filtre.

Les filtres sont de différents types et natures : tissus, feutres aiguilletés, composites et membranaires. Les fibres peuvent être en polyester, acrylique, téflon, inox... etc. Le choix de la nature du filtre dépend des caractéristiques du gaz à traiter.

L'injection de réactif en amont du filtre peut permettre également de capter d'autres polluants gazeux comme le mercure, les dioxine-furanes, les gaz acides, etc. En effet, les réactifs injectés en amont du filtre vont se retrouver piégés avec les poussières dans le gâteau de filtration. Le contact entre les gaz à traiter traversant le gâteau de filtration et les réactifs présents dans le gâteau s'en retrouve alors facilité.

Ce dispositif a des performances très élevées et permet d'obtenir un seuil de rejet constant. Il peut atteindre une efficacité de plus de 99 % même sur les particules de faibles diamètres (1 μm ou moins). Cette technique est considérée comme la plus efficace.

Néanmoins, dans certaines applications, il peut exister un risque d'incendie lié à la présence dans les fumées de particules incandescentes qui peuvent enflammer les manches. Il est donc nécessaire de disposer d'un équipement de détection et d'extinction.

Ce dispositif très efficace est très coûteux par sa mise en place et son entretien. En effet, les manches doivent être remplacées régulièrement et les fortes pertes de charges engendrent des consommations d'électricité pouvant être importantes [23].

Réduction des émissions de particules par les sources mobiles :

Le trafic routier

Les sources mobiles émettent des polluants atmosphériques produits principalement par la combustion de carburant dans leur moteur. Les mesures applicables aux moteurs, qu'elles soient liées à l'efficacité de la combustion et au contrôle des propriétés des carburants, peuvent entraîner une réduction de ces émissions. Des réductions supplémentaires peuvent être obtenues grâce à l'utilisation de dispositifs de traitement aval des gaz d'échappement. L'usure des pièces (pneus, freins) et l'évaporation d'essence provenant du réservoir des véhicules routiers sont les sources les plus fréquentes d'émissions autres que les gaz d'échappement (à savoir sous la forme de particules). Ces émissions sont également prises en compte dans le présent document.

Les sources mobiles comptent pour 40 à 60 % environ dans le total des émissions de NO_x et pour 10 à 30 % dans les quantités totales de particules fines ($\text{PM}_{2.5}$, ou particules $\leq 2,5 \mu\text{m}$ de diamètre) émises dans les différents pays de la région de la CEE (année 2010). Les principales sources d'émissions sont les voitures et camions à moteur diesel, suivis des tracteurs agricoles. Les activités de transport ferroviaire et maritime à propulsion diesel constituent également une source importante d'émissions sur le territoire de certaines Parties à la Convention. Les sources mobiles contribuent pour 20 % environ aux émissions totales de COV dans les différentes parties de la région de la CEE (année 2010). Les principales sources mobiles de COV sont les véhicules légers fonctionnant à l'essence, y compris les deux-roues, suivis des petites machines et des engins agricoles. Les sources mobiles terrestres contribuent

pour moins de 1 % au total des émissions de dioxyde de soufre (SO₂) et pour 1 à 4 % aux émissions totales de NH₃ dans les différentes parties de la région de la CEE (année 2010).

Vu que les sources mobiles contribuent fortement aux émissions de NO_x et de particules, ces deux polluants sont ceux auxquels le présent document d'orientation accorde la plus grande attention. Il est question des COV et du NH₃ uniquement dans le cas de sources mobiles qui en émettent des quantités notables et lorsqu'il existe des techniques économiques et bien établies permettant de réduire les émissions de façon appréciable. Les niveaux d'émission augmentent généralement avec le degré de vétusté des sources mobiles, étant donné que l'efficacité des dispositifs anti-émissions diminue au fil du temps. Par ailleurs, des dysfonctionnements dus à une utilisation malavisée, à l'usure ou à des défaillances aléatoires peuvent également dégrader les équipements antipollution [24].

Les moteurs Diesel et les moteurs essence à injection directe produisent des particules fines, qui étaient quasiment absentes des émissions des voitures à essence traditionnelles à injection indirecte. Il est maintenant démontré que ces particules fines sont toxiques. Depuis l'installation quasi systématique de l'injection directe à rampe commune sur les moteurs Diesel et désormais sur beaucoup de moteurs à essence, les particules qu'ils rejettent sont devenues plus fines et donc plus nocives. Les voitures à essence à injection directe représentaient en effet en 2014 24 % des voitures à essence commercialisées en France (52 % en Allemagne) et sont en augmentation constante de 6 points par an (12 % en 2012, 18 % en 2013, 24 % en 2014).

La réglementation Euro pour les émissions automobiles

Divers systèmes permettent de réduire les émissions polluantes des diesels mais ils ne suffiront plus avec la nouvelle réglementation, très stricte, appelée norme Euro 6. Il n'est pas possible d'installer un filtre à particules mais la réglementation ne concerne que les véhicules récents.

- **La norme Euro 6**

Les moteurs diesels rejettent plus d'oxydes d'azote dont le très nocif dioxyde d'azote. La norme Euro 6 impose une réduction de ces rejets. La limite est maintenant de 80 mg/km (60 pour un moteur essence) alors qu'avec la norme Euro 5, elle était de 180.

La norme antipollution Euro 6 a beaucoup évolué. Elle a vu le jour dans les années 1990 sous un autre nom, et elle va encore évoluer prochainement. Avant elle, la norme Euro 5 avait imposé des limitations d'émissions polluantes, en 2009, pour les véhicules homologués et, en 2011, pour les voitures neuves.

Depuis le 1er septembre 2014, il est obligatoire de respecter la norme antipollution Euro 6 pour tous les modèles homologués. À partir de septembre 2015, cela concernera tous les véhicules neufs.

Un conducteur ne respecte pas la réglementation si son filtre n'est plus efficace. Celui-ci doit être entretenu et remplacé tous les 100 000 km environ.

C'est de plus en plus rare mais à cause d'ennuis mécaniques, certains particuliers et professionnels retirent le FAP. Il peut en effet générer des problèmes quand on utilise un diesel pour des courts trajets essentiellement. Dans ce cas, c'est illégal et cela peut entraîner d'importantes amendes voire l'immobilisation du véhicule [25].

Le filtre à particule a pour fonction de filtrer de fines particules contenues dans le gaz d'échappement des moteurs diesel. Elles sont cancérigènes pour l'homme.

Il se situe dans la ligne d'échappement, généralement après la sortie moteur. Un FAP fonctionne selon 2 cycles. Le premier consiste en la collecte de particules et le second est leur élimination.

1. La filtration

Le filtre capture les particules en suspension dans les gaz d'échappement. Cela conduit à la formation d'une couche de suie sur les parois du filtre. A terme, cette couche provoque une diminution des performances du moteur. Il est donc nécessaire de nettoyer régulièrement le FAP. C'est à ce moment qu'intervient le cycle de régénération.

2. La régénération

Le nettoyage du FAP s'effectue sous la forme de cycles automatiques durant lesquels la température des gaz d'échappements va être fortement augmentée afin de brûler le dépôt de suie. Pour augmenter la température, du gasoil non brûlé est injecté dans un catalyseur intégré au FAP. Ce carburant va s'enflammer et ainsi faire augmenter la température dans la pièce, provoquant la combustion des suies piégées dans le filtre.

Afin d'améliorer ce procédé, certains systèmes injectent un additif qui va permettre d'abaisser le seuil de combustion des suies. Celles-ci vont donc brûler à plus basse température et leur élimination va s'en trouver facilitée. Cet additif devra être rechargé régulièrement, à la manière du gaz réfrigérant pour la clim [26].

Le meilleur moyen de réduction est de basculer vers le GPL ou la voiture électrique

Sur le plan environnemental, les voitures GPL doivent leurs bons résultats au fait qu'elles ne produisent pas de particules et très peu de NOx et si elles émettent en revanche plus de CO que les voitures à essence et Diesel et plus d'hydrocarbures imbrûlés (HC) que les Diesel, ces HC sont moins toxiques. Sur le plan des émissions de CO₂, les véhicules GPL sont comparables au Diesel (si l'on tient compte des émissions du puits à la roue : production du pétrole, transformation, consommation du véhicule).

Le GPL est une « énergie du développement durable », dans le sens où, comme nous l'avons dit précédemment, son couplage avec une énergie renouvelable est facile, ce qui vous permet de réduire considérablement vos besoins en énergie électrique et/ou combustible !

- Des émissions polluantes (NOx, particules...) quasi inexistantes.
- Limite les émissions de CO₂.
- Réduit la pollution sonore de 60% par rapport au moteur Diesel.
- Le GPL permet une combustion propre et augmente donc la longévité du moteur.
- Ne rejette presque aucune particule fine.
- Aucune restriction de circulation en cas de pic de pollution [27].

Les voitures électriques offrent une série d'avantages qui, à nos yeux, les classent devant les moteurs à combustion. Songeons ainsi aux éléments suivants :

- l'absence totale de rejets à l'endroit où elles sont utilisées ;
- le rendement de la motorisation, nettement supérieur à celui d'un moteur à combustion ;
- la possibilité croissante d'utiliser une électricité provenant de sources renouvelables ;
- les avantages de la mobilité électrique dans l'optique de l'indépendance énergétique de notre pays et de l'Europe ;
- la diminution significative des nuisances sonores dues au trafic urbain ;

- et à terme, la possibilité d'incorporer les véhicules électriques aux réseaux électriques intelligents, ce qui leur permettra de devenir bien plus qu'un simple dispositif consommateur d'énergie.

Etats des lieux de la pollution de l'air

I - 5 - 1 La pollution mondiale par les particules fines

À travers le monde, la pollution de l'air par les particules fines cause trois millions de morts chaque année (OMS). Les sources principales de pollution de l'air sont liées principalement à des modes de transport inefficaces, aux combustibles domestiques, aux centrales au charbon et aux activités industrielles.

27 septembre 2016 | GENÈVE - Un nouveau modèle de qualité de l'air mis au point par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) confirme que 92% de la population mondiale vit dans des lieux où les niveaux de qualité de l'air ne respectent pas les limites fixées par l'OMS. Cette version 2016 de la base de données se compose principalement de données sur la qualité de l'air urbain - moyennes annuelles pour les PM10 Et / ou PM2.5. L'OMS a développé des cartographies interactives pour montrer au grand public l'omniprésence de la pollution de l'air par les particules fines dans le monde et mettent en évidence les zones spécifiques au sein des pays ne respectant pas les directives établies par l'OMS [23], [28].

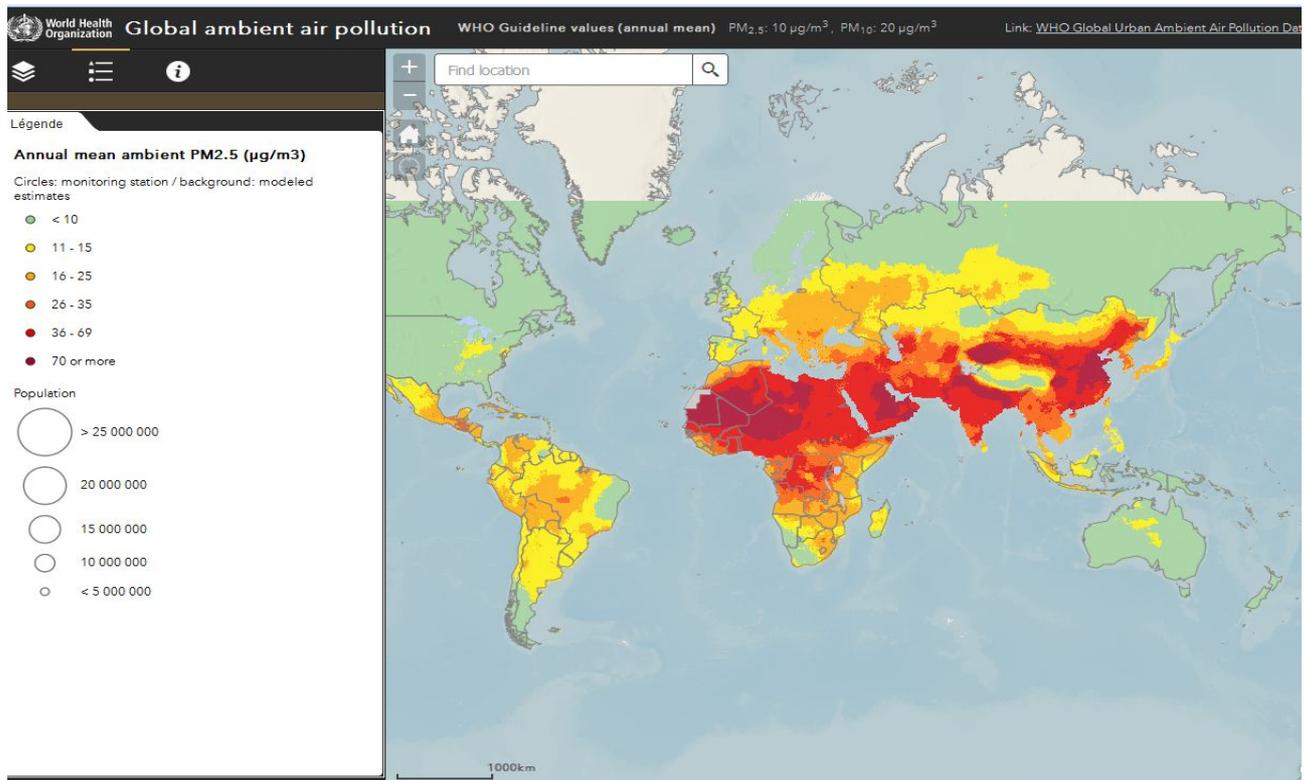


Figure 15. Teneur annuelle de PM2.5 au niveau de globe

Derrière cette cartographie, mise au point par l'OMS en partenariat avec des chercheurs de l'Université de Bath (Royaume-Uni), se cache en réalité une modélisation plus précise de la pollution de l'air aux particules fines (PM2.5) responsable de plus de 6 millions de décès dans le monde.

En rouge, La zone la plus polluée va du Mexique à la Chine, en passant par les pays du Maghreb, les pays du Golfe et l'Inde. C'est dans les pays du nord (Scandinavie, nord de la Russie) et de l'extrême Sud de la planète (Australie, Afrique du Sud, sud de l'Amérique latine) que la pollution de l'air est minimale, avec des taux inférieurs à $10\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Selon la même base de données sur la qualité de l'air urbain, 98% des villes des pays à revenu faible ou intermédiaire de plus de 100 000 habitants ne répondent pas aux directives de l'OMS sur la qualité de l'air. Toutefois, dans les pays à revenu élevé, ce pourcentage diminue à 56%.

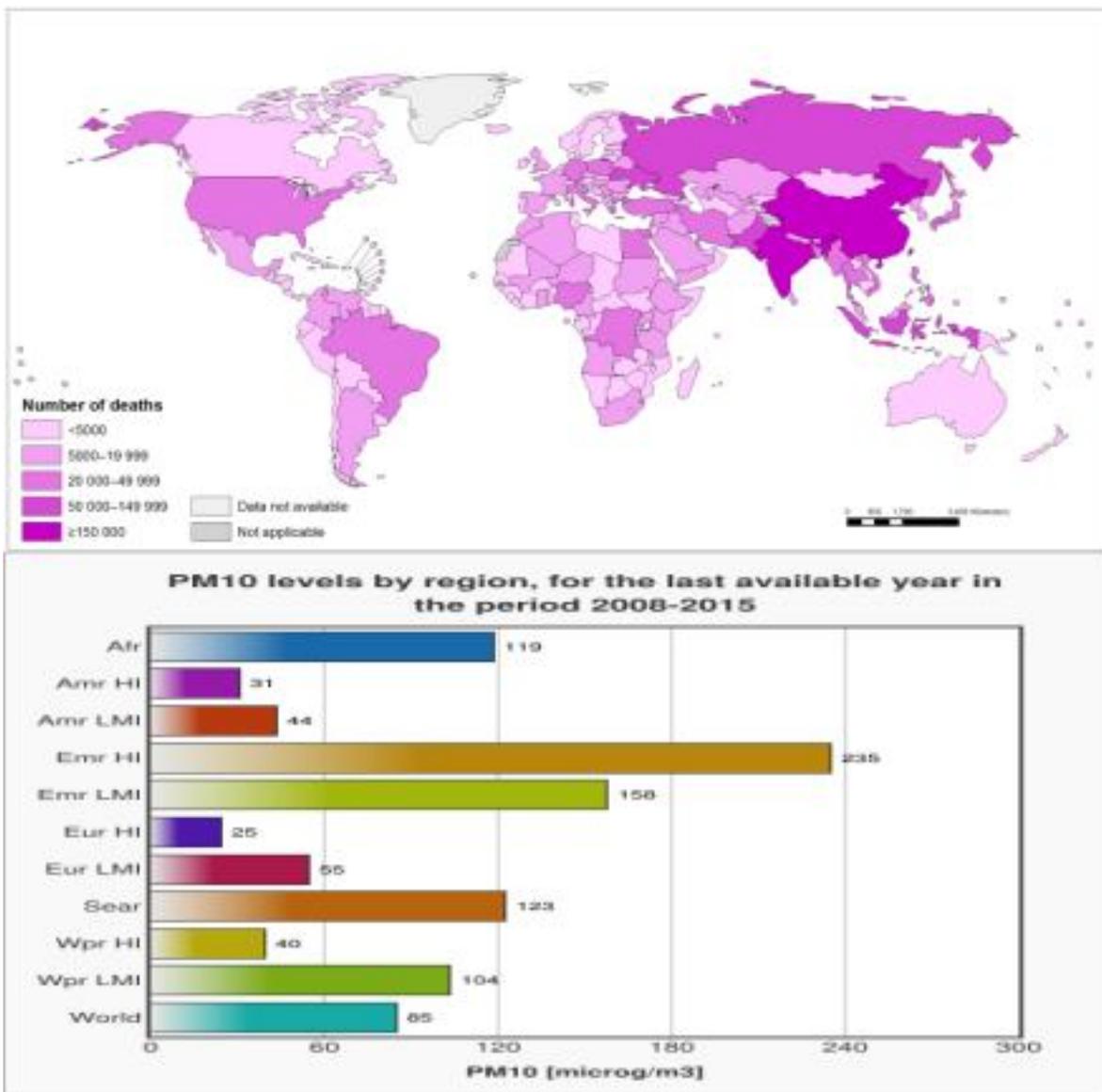


Figure 16. Niveau des PM10 par région de 2008 à 2015 et nombre de décès dus à la pollution de l'air en 2012

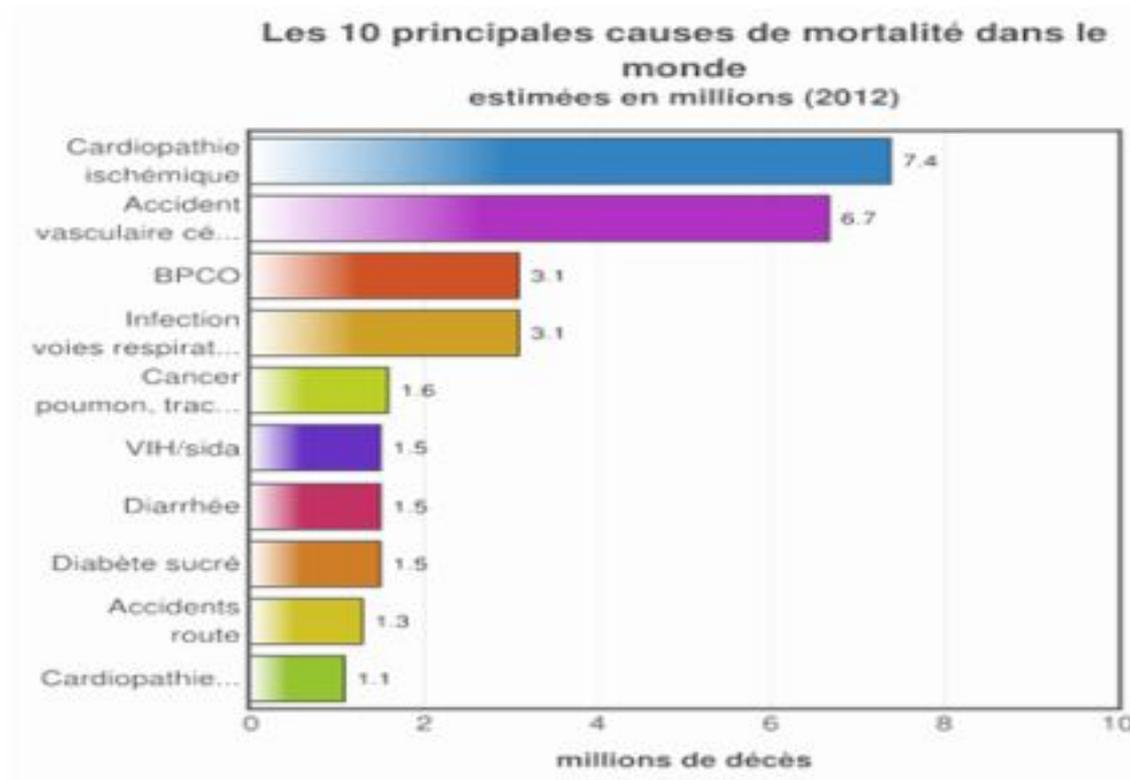


Figure 17. Principales causes de mortalité dans le monde [14]

I - 5 - 2 La pollution par les particules fines cas de l'Algérie :

L'Algérie fait partie des pays qui présentent des taux élevés de pollution de l'air par les particules fines, selon l'étude précédente de l'OMS dans son rapport du 27 Septembre 2016 et qui est bien montré par la cartographie mentionné ci-dessus .

Pour les pays qui ne disposent pas de données fournis par des agences officielles, l'OMS considèrent les valeurs de PM2.5 trouvées dans la littérature scientifiques ou celles fournies par les observations satellitaires et parfois celles obtenues par extrapolation des teneurs de pays voisins.

Pour l'Algérie, l'OMS estime le taux de PM2.5 à $20 \mu\text{g.m}^{-3}$, soit un taux qui dépasse largement la limite de $10 \mu\text{g.m}^{-3}$ recommandée par l'OMS. Ces taux sont supérieurs à ceux retrouvés en France, en Espagne ou en Allemagne mais équivalent à ceux notés en Italie et dans les pays des Balkans. Plus on va vers le sud de l'Algérie, plus la qualité de l'air se dégrade, avec un taux de pollution maximum de $70 \mu\text{g.m}^{-3}$ de PM2.5 ou plus à travers le Sahara – la qualité de l'air étant également influencée par les tempêtes de sable.

Plusieurs études scientifiques menées ces dernières années en divers sites à Alger mentionnent des teneurs allant de 50 à 70 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les PM-10 en sites urbains et environ 30 à 40 $\mu\text{g.m}^{-3}$ en site semi-urbain et rural. Les teneurs en PM2.5 s'élèvent à environ 30 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les sites urbains et un peu moins de 20 $\mu\text{g.m}^{-3}$ en site semi-urbain et rural[29],[30], [31].

D'une manière générale, les informations concernant la qualité de l'air en Algérie ne sont pas nombreuses et surtout ne couvrent pas les régions diversifiées du pays.

Le contrôle de la qualité de l'air dans les villes algériennes, quelles que soient leurs tailles, grande, petite ou moyenne, n'est, visiblement, pas assuré. Les problèmes posés par la pollution de l'air ne semblent pas retenir l'attention, alors que l'impact sur la santé des populations prend des proportions inquiétantes. Dans tous les cas, le contrôle de la pollution de l'air ne bénéficie pas du même intérêt chez les pouvoirs publics que la gestion des déchets ménagers.

Pour s'en convaincre, il suffit de rappeler que Samasafia, premier réseau de surveillance de la qualité de l'air mis en place par le Ministère de l'Environnement, en mai 2002 a établi des rapports officiels sur l'état de l'environnement en Algérie mettant l'accent sur les effets multiples, santé, économie... provoqués chaque année par la pollution atmosphérique dans notre pays. En 2002, déjà, on estimait à 40 % la proportion des visites médicales au niveau des urgences dues à des difficultés respiratoires et à 35 % les décès des enfants dus à cette même cause.

Rien ne permet aujourd'hui de mesurer l'ampleur des dégâts.

Des réseaux de surveillance « Samasafia » ont été installés à Alger d'abord puis par la suite à Annaba, Oran et Skikda, et devant servir à observer la qualité de l'air et, en cas de dépassement des seuils de concentrations de polluants, à alerter les pouvoirs publics qui prendraient les mesures pour protéger les personnes sensibles et limiter les émissions de pollution. Le réseau d'Alger n'a fonctionné correctement sur les 4 stations que durant la période 2002-2006 et est en arrêt définitive depuis 2009 et les autres fonctionnent plus ou moins laborieusement avec de fréquents arrêts pour problème de maintenance.

Les graphiques ci-dessous extrait d'une étude de doctorat sur une base des données de pollution des (PM10) appartenant à l'Institut National de Santé Public installé à Alger et les

études de Samasafia, nous donnent une idée sur l'évolution saisonnière de la pollution de l'air (PM10) à Alger entre 2001 et 2006 [12].

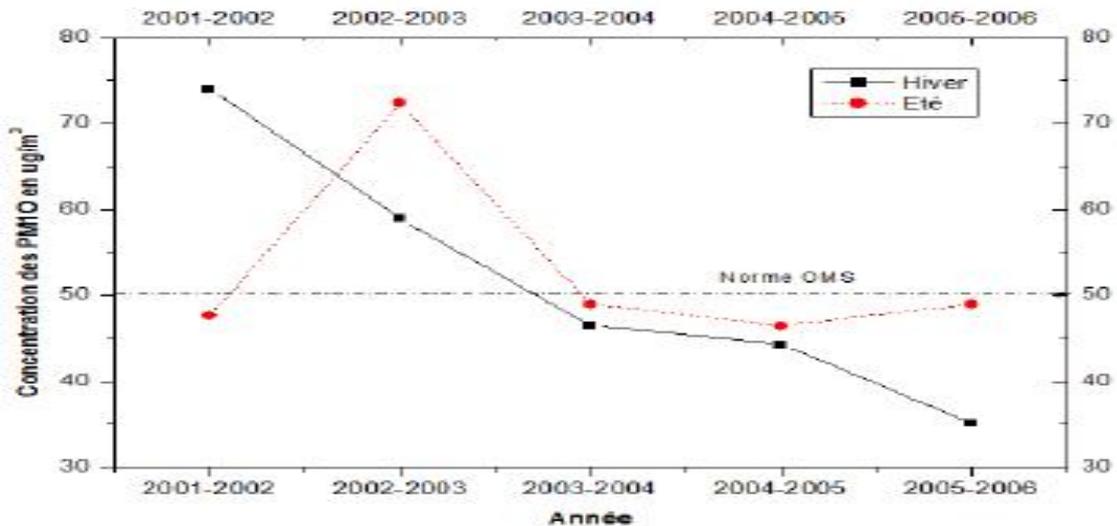


Figure 18. Évolution saisonnière des PM10 à ALGER 2001 -2006 (INSP)

Pour la protection de la santé publique, L'OMS estime que la moyenne annuelle des PM10 ne doit pas dépasser $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette valeur a été également prise comme référence d'objectif de qualité de l'air par la réglementation Algérienne. Cet objectif de qualité n'a été dépassé durant la période étudiée que pour les années 2001-2002 et 2002-2003, avec une moyenne respective de $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La valeur limite algérienne de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ n'a pas été observée durant toute la période d'étude. Les résultats d'une étude, effectuée en 2011 à l'Institut Hydrométéorologique de Formation et de Recherches d'Oran, sur une base de données de pollution (PM10) du réseau Samasafia d'Alger, de 2002 à 2008, sont représentés dans les graphiques ci-dessous.

La figure 18 illustre les variations des moyennes journalières des 4 sites pour le mois de Septembre 2002. La figure 17 quant à elle illustre les variations de la moyenne annuelle des PM10 de 2002 à 2008. On remarque que les concentrations accusent une baisse sensible à partir de 2006 pour les sites de Ben Aknoun, Bab El Oued et Place du 1 Mai. La figure 20, présentant la fréquence d'occurrence des concentrations des PM10 supérieures à la norme OMS ($50 \mu\text{g}/\text{m}$), montre bien l'importance, du nombre de jours dépassant la norme OMS en matière de santé publique, de 2002 à 2006.

Considérant la norme annuelle recommandée par L'OMS, à savoir $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (World Bank Group, 1998), et en analysant les résultats des études effectuées en Algérie sur la pollution particulaire, on note que dans la majorité des cas, pour toutes les études confondues sur la pollution par les particules, les niveaux de concentration demeurent au-deçà de cette norme. Les taux relevés dépassent largement les normes en vigueur en matière de santé publique, du moins dans les grandes agglomérations telles que la capitale.

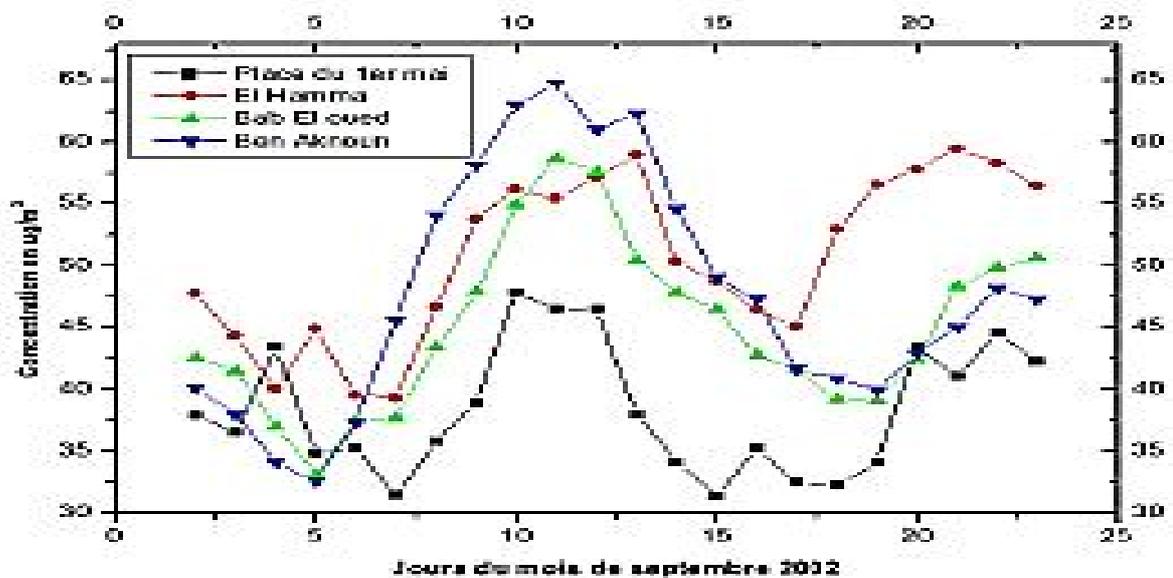


Figure 19. Moyennes journalières des PM10 du réseau Samasafia d'Alger mois de septembre 2002

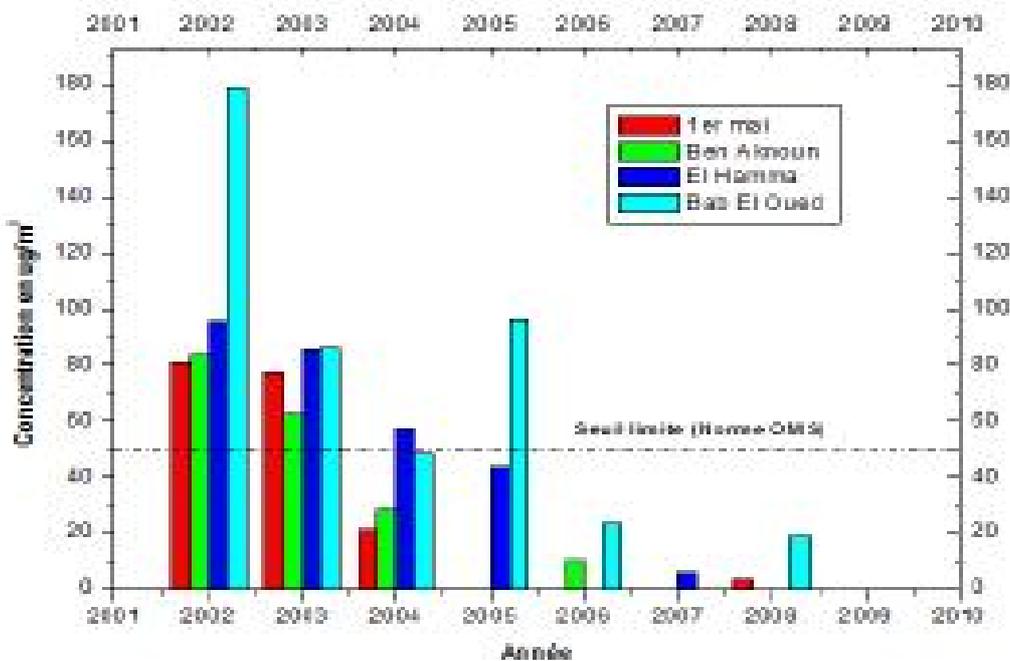


Figure 20. Évolution annuelle des PM10 Alger 2002 à 2008

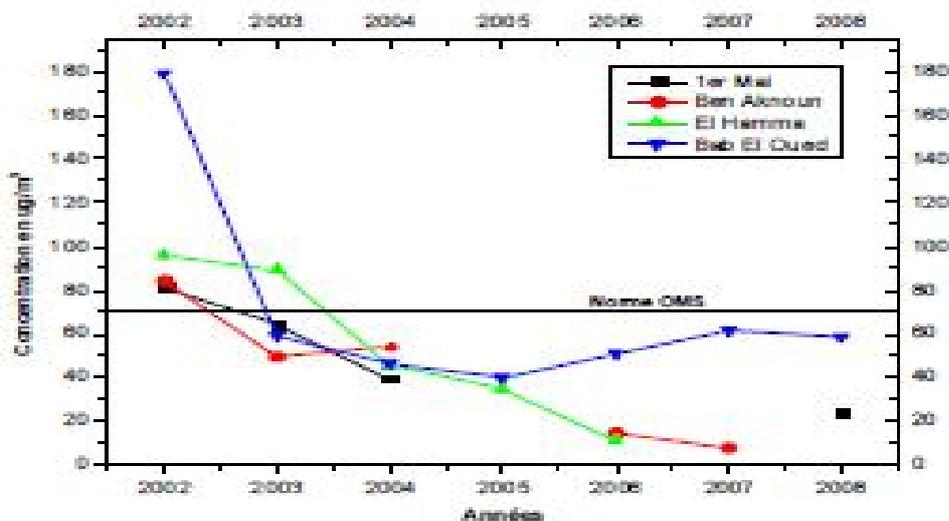


Figure 21. Moyenne annuelle des PM10 Alger 2002 à 2008

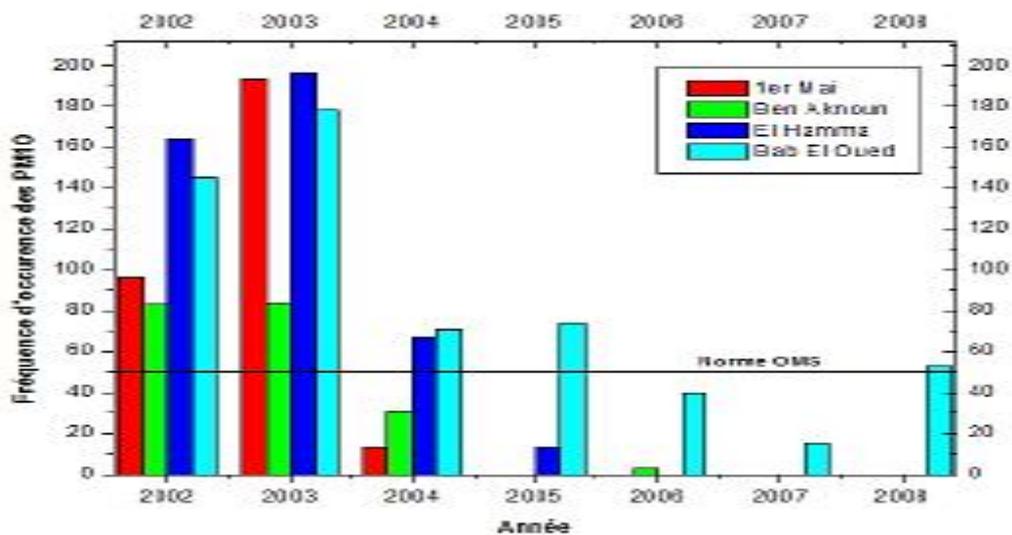


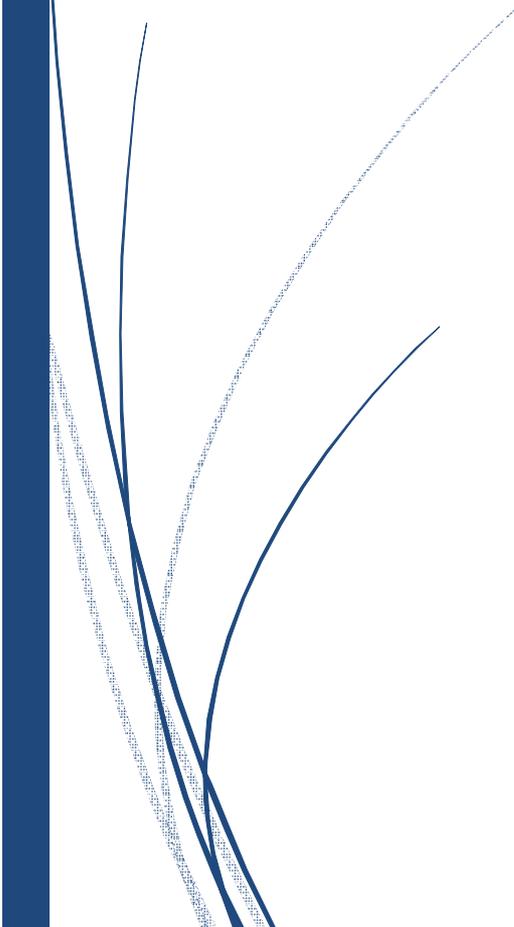
Figure 22. Fréquence d'occurrence des concentrations des PM10 supérieures à la norme OMS

The logo consists of a dark blue vertical bar on the left and a blue arrow pointing to the right, containing the text "ENP 2017" in white.

ENP 2017

Partie 02

Matériels et méthodes



II. Méthodologie expérimentales

La présente une description des sites de mesure des PM₁₀, PM₄, PM_{2.5}, PM₁, PM_{totales} (PM_{tot}), PM_{respirables}, PM_{thoraciques}, PM_{alvéolaires} ainsi que le nombre de particules par cm³ obtenus par l'appareil de mesure FIDAS 200 (PALAS).

Les mesures ont eu lieu en saison sèche (pas de pluie) à Bouzaréah, un site semi-urbain, du 13 au 27 Avril 2017, puis au centre-ville d'Alger au sein de l'hôpital Mustapha Bacha (Commune de Sidi Mhamed) du 29 Avril au 2 Juin, qui est considéré comme un site urbain en collaboration avec le Centre de Développement des Energies Renouvelable (CDER) département bioénergie et environnement.

Dans la première partie de ce chapitre, sont décrits les deux sites de mesures étudiés. Par la suite, nous décrivons la technique de prélèvement et l'analyseur utilisé.

II.1. Présentation des sites d'études**II.1.1. L'espace semi-urbain de Bouzaréah****➤ Coordonnées géographiques et données démographiques**

La commune de Bouzaréah occupe une superficie de 22 km² et avec une population de 102 670 habitants (en 2016), à savoir une densité de 4667 hab/km². Les coordonnées de la ville selon Google Maps sont : latitude 36° 47' 24" Nord et longitude est 3° 1' 4" Est. Le suivi des particules en suspension se fait au CDER (Centre de Développement des Energies Renouvelables) qui se situe dans le village Céleste dont les coordonnées sont : Latitude : 36.797093 N et Longitude : 3.033055 E. Nous illustrons en figure 23 et 24 la localisation de la commune de Bouzaréah, au sud-ouest d'Alger et celle du CDER.



Figure 23. Localisation de la commune de Bouzaréah, au sud-ouest d'Alger

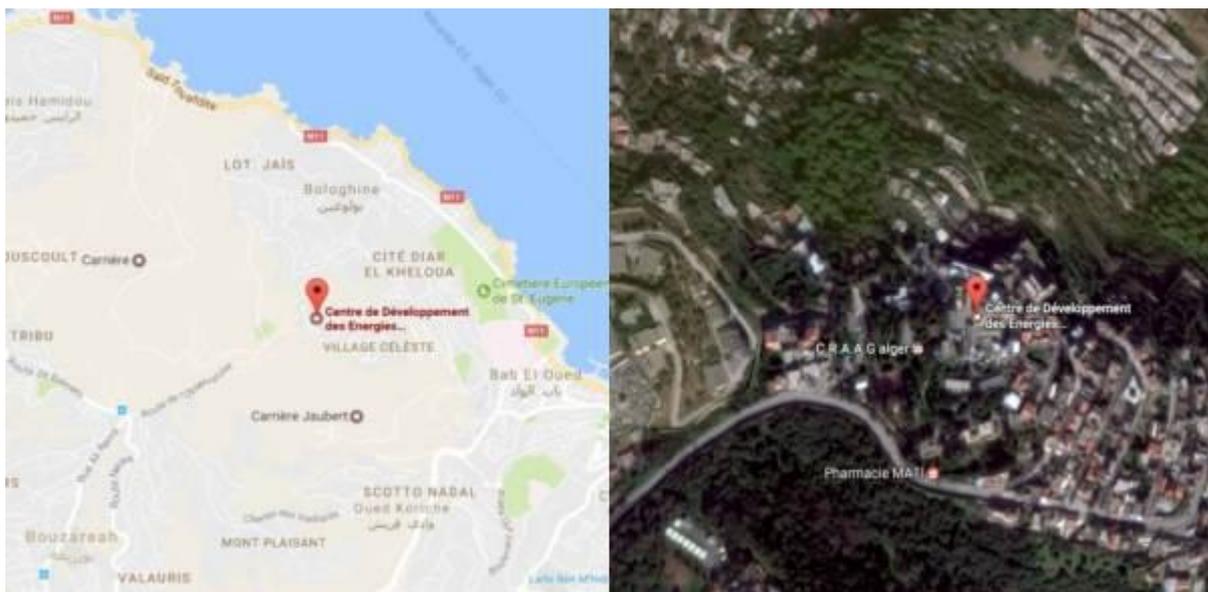


Figure 24. Localisation du CDER à Bouzaréah

Le site de prélèvement au sein du CDER est situé à plus d'un Km de la RN11 (au nord et le chemin de Wilaya (Sidi Ben Nour) qui mène vers Beb El Oued.

- Sources d'émission des particules

En dehors du parc automobile, quelques sources au voisinage de la ville sont comptées comme étant potentiellement émettrices des particules, parmi elles :

-  Le port d'Alger qui est à 3.27 km de l'endroit de l'implantation,
-  La cimenterie SCAL à Rais-Hamidou qui est à 2.5 Km,
-  La carrière de Bab El Oued à environ 1 km à l'Est du CDER,
-  La route nationale N11 qui est environ à 1.36 km de CDER,
-  La zone industrielle d'Oued Smar à environ 15 km,
-  L'aéroport d'Alger à environ 20 km,
-  L'usine de Tabac à Beb El Oued.

Du point de vue ventilation naturelle, le site de Bouzaréah qui est le point le plus élevé d'Alger est très bien ventilé.

II.1.2. L'espace urbain d'Alger Centre

- Coordonnées géographiques et données démographiques

Pour Alger centre, 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 24 et 25) sont obtenues grâce à Google Maps. L'endroit est situé à une latitude de 36.7724841 N et une longitude de 3.0551159 E.

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



Figure 25. Localisation de la commune d'Alger-centre, Alger

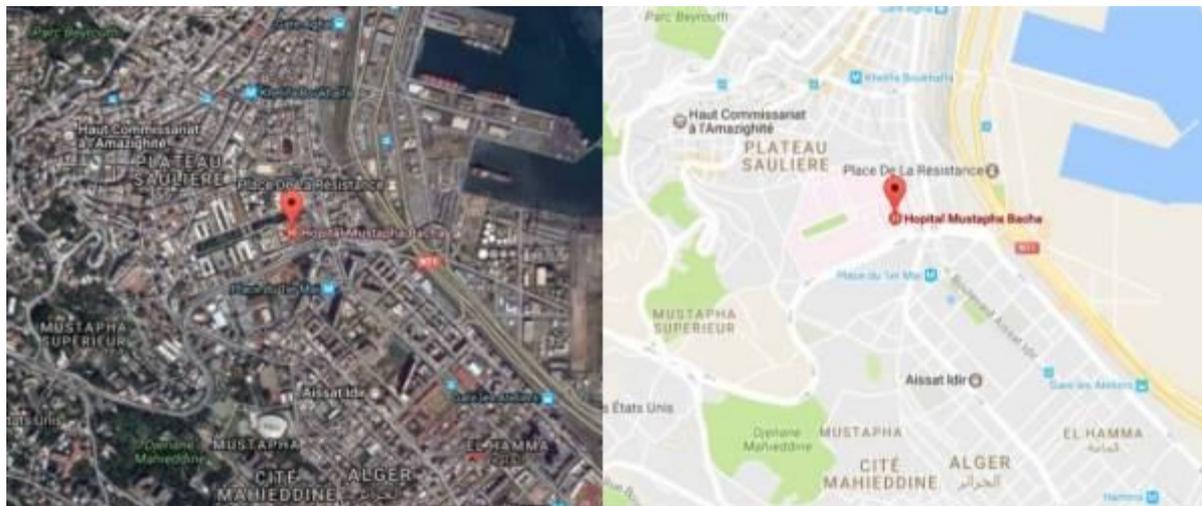


Figure 26. Localisation de l'hôpital de Mustapha Bacha à Alger-centre

- Sources d'émission des particules

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

- ✚ L'incinérateur intégré dans l'hôpital proche de l'implantation de 80 m,
- ✚ Le trafic routier du grand carrefour de la Place du 1er 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 qui est à 2.8 km de l'hôpital,
- ✚ La station de dessalement d'El-Hamma qui est à 5 km de l'hôpital,
- ✚ La centrale thermique d'El-Hamma à 5 km de l'hôpital
- ✚ La cimenterie SCAL à Raïs Hamidou de distance de 19.9 km,
- ✚ La raffinerie d'Alger (RAG1) située à Baraki à 37.32 km de la commune,
- ✚ La zone industrielle d'Oued Smar à environ 15km.
- ✚ L'aéroport international d'Alger (Houari Boumediene) à environ 20km.

II.2. Méthode de prélèvement et d'analyse des PMi et description de l'analyseur

II.2.1. Présentation de l'appareil et son principe de fonctionnement

L'analyseur utilisé, Le FIDAS, est un spectromètre optique de très haute résolution permettant de classifier les aérosols atmosphériques en plusieurs classes de tailles. Le FIDAS mesure en temps réel les fractions conventionnelles PM-10, PM-4.0, PM-2.5 et PM-1.0. De plus, il mémorise à chaque seconde le nombre de particules dans chacun des 256 canaux de mesure.

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

❖ Principe de fonctionnement

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

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

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

Après son conditionnement, le flux d'air pénètre la cellule de mesure. Ce flux d'air passe par le volume optique, dans lequel les aérosols de l'échantillon vont diffuser la lumière, avant de ressortir de la cellule de mesure.

Sous la cellule de mesure se trouve un porte-filtre acceptant des médias ronds de diamètre 47 ou 50 mm. Ce porte-filtre permet une éventuelle analyse gravimétrique ou chimique de l'aérosol collecté, à posteriori (**Figure 27**).



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

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

La Figure 28. Présente un schéma détaillé du FIDAS 200 équipé d'une station météorologique et d'un abri.

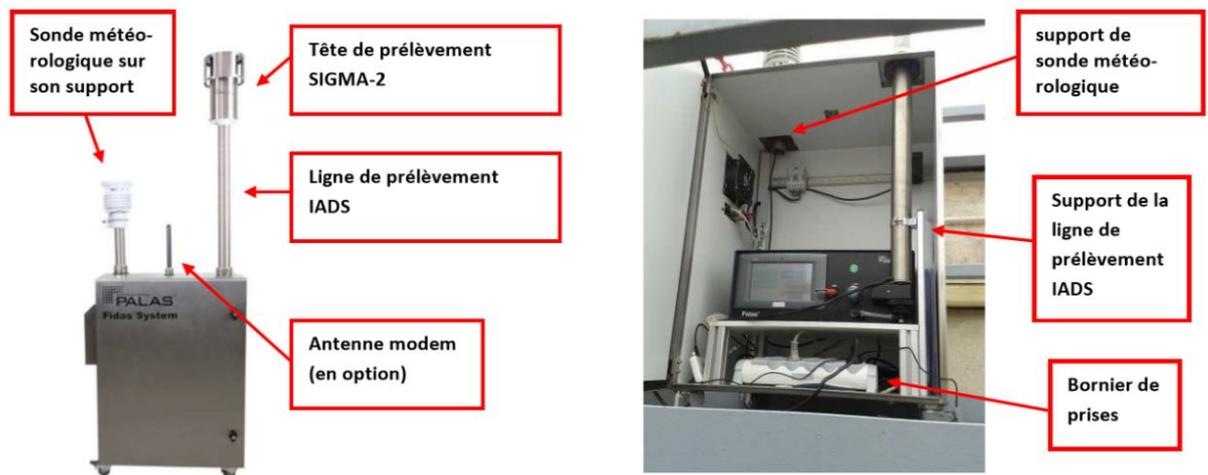


Figure 28. Schéma détaillé du FIDAS 200 équipé d'une station météorologique et d'un abri

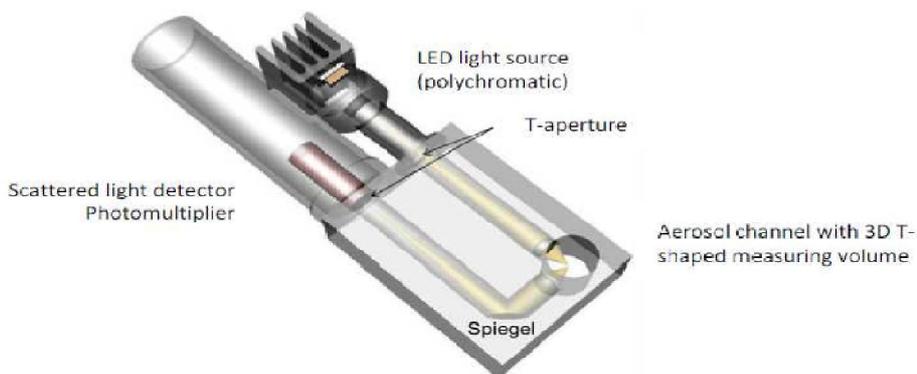


Figure 29. Schéma de la cellule de mesure du FIDAS 200

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

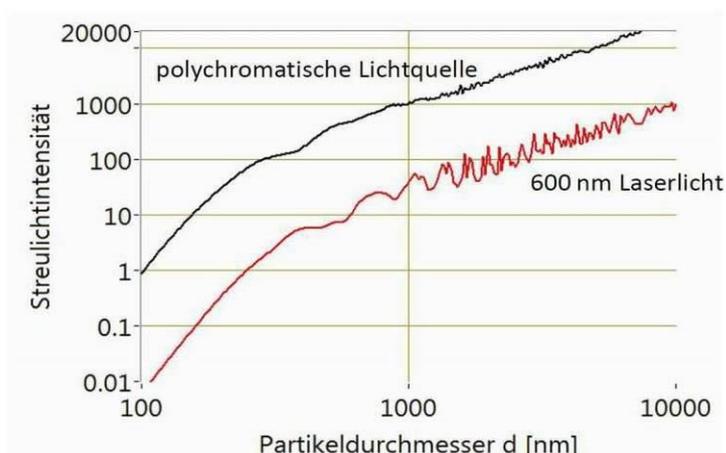


Figure 30. Courbe de calibration de la détection à 90° d'une source de lumière monochromatique (courbe rouge) et d'une lumière polychromatique (courbe noire FIDAS 200)

La taille du volume optique de l'analyseur FIDAS 200 permet de compter les aérosols un à un lors de leur passage dans le volume optique, assurant une excellente efficacité de comptage.

De plus, le volume optique de cette cellule de mesure présente la forme d'un « T ». Cette géométrie optique permet de détecter et d'éliminer les effets de bord, par la mesure de la durée des signaux lumineux en temps réel et en continu par le FIDAS 200. Les effets de bord sont liés à un sous éclairage des aérosols, qui par conséquent diffusent moins de lumière. La taille des aérosols est alors sous-estimée.

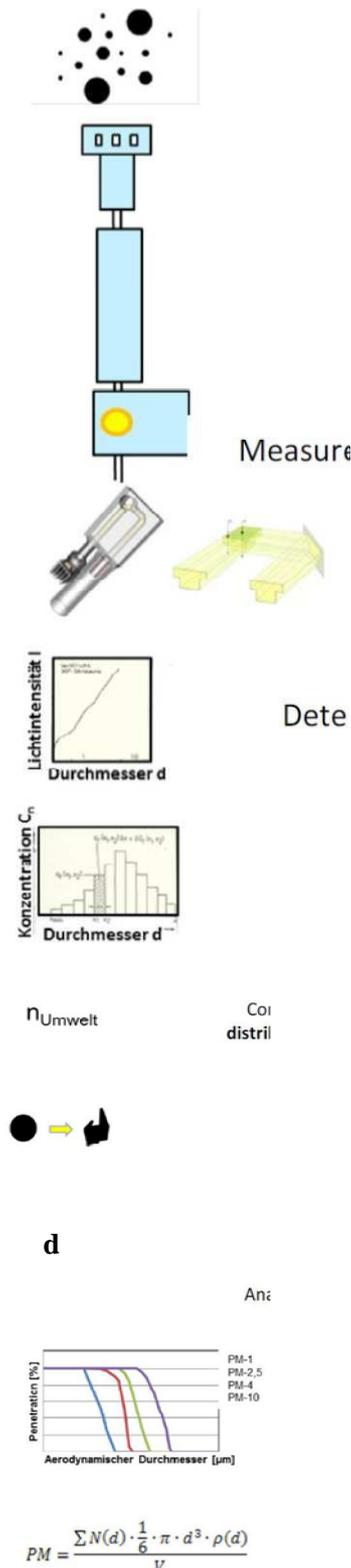
La mesure continue et en temps réel de la durée des signaux lumineux permet également de détecter et de corriger les erreurs de coïncidence. L'erreur de coïncidence apparaît lorsque les concentrations sont trop importantes et que plusieurs aérosols pénètrent simultanément dans le volume optique.

L'erreur de coïncidence induit une sous-estimation du nombre d'aérosols détectés et la surestimation de leur taille. Dans ce cas, chaque aérosol va diffuser de la lumière, la durée du signal va être rallongé et l'intensité détectée trop forte.

Ainsi le FIDAS 200 présente les avantages uniques suivants pour son utilisation du suivi des fractions massiques PM-10 et PM-2,5 :

- Grande résolution de la distribution en taille ;
- Bonne précision de la classification ;
- Excellente efficacité de comptage.

II.2.2. Le schéma de la figure 30 décrit les étapes de détection des particules par le FIDAS 200.



Aérosols de différentes tailles dans l'air ambiant.

Prélèvement représentatif de l'échantillon avec la tête Sigma-2.

Séchage de l'échantillon avec la ligne IADS.

Détection de la lumière diffusée par l'échantillon particule par particule à 90° dans la cellule de mesure.

Détection et traitement des effets de bord et erreurs de coïncidence.

Détermination de la taille optique des aérosols grâce à la courbe de calibration basée sur des sphères de latex.

Distribution granulométrique de l'échantillon.

Conversion de la taille des aérosols basée sur un indice de réfraction du latex à un indice de réfraction représentatif de l'air ambiant (Ministère de l'Environnement allemand).

Conversion du diamètre optique en un diamètre aérodynamique.

Attribution d'une de par classe de taille.

Application d'une correction par rapport au diamètre de coupure pour chaque fraction massique.

Calcul de la concentration massique par fraction.

Figure 31. Etape de mesure des particules par le FIDAS 200

II.2.3. Caractéristiques techniques du FIDAS 200

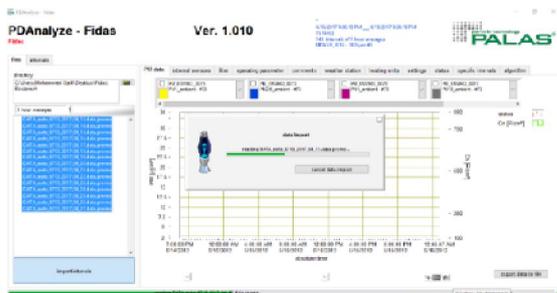
Le tableau 2 résume les caractéristiques techniques de l'analyseur

Tableau 2. Caractéristiques techniques du FIDAS 200

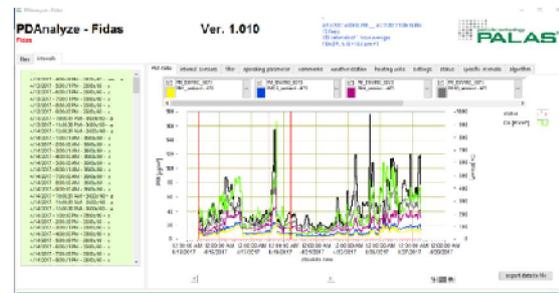
Principe de mesure :		mesure de diffusion de lumière blanche par les particules
Paramètres fournis (simultanément)		PM-1, PM-2.5, PM-4, PM-10, nombre, granulométrie, température, pression, humidité relative, vent
Gammes de mesure		taille 0,18 à 18 µm (jusqu'à 100 µm) nombre 1 - 20 000 p/cm ³ masse 1 - 10 000 µg/m ³
Taille du volume optique		262 x 262 x 164 µm
Nombre de classes de taille		64
Temps de moyennage		de 1 sec à 24 h (avec logiciel de post-traitement)
Débit de prélèvement		4,8 l/min
Interfaces		LAN, WIFI, RS-232/485, USB
Protocoles		Bayern/Hessen, Modbus, ASCII, PC à écran tactile 4 Gb
Mémoire		PDAAnalyse
Logiciel fourni		195 x 450 x 310 mm, rack 19"
Dimensions de l'analyseur		1810 x 600 x 400 mm, avec ligne IADS et tête Sigma-2
Dimensions du caisson IP65		9,3 kg
Poids de l'analyseur		48 kg, avec ligne IADS et tête Sigma -2
Poids du caisson IP65		115 - 230 Vac, 50 - 60 Hz, 140 W
Alimentation		200 W
Consommation électrique		-20 à 50 °C
Conditions d'utilisation		

❖ Utilisation du logiciel PDAalyze Software

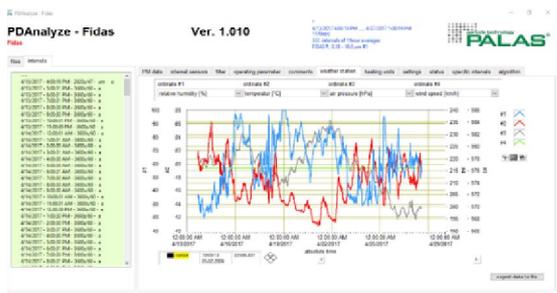
Le logiciel **PDAalyze Software** est un outil essentiel qui nous a aidés à traiter les résultats obtenus de l'appareil Fidas 200. Il est fourni avec les manuels de l'appareil, nous l'avons utilisé pour convertir les sauvegardes journalières en fichier .txt exploitable avec l'Excel. Le programme permet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



Importation et conversions des sauvegardes



interprétation des sauvegardes



Interprétation des données météo



suivi technique de l'appareil

Figure 32. Traitement des résultats de mesure avec le logiciel PDAalyze

II.2.4. Installation de l'analyseur

L'analyseur a été installé sur la terrasse du CDER dans une cabine fabriquée en panneaux sandwich (panneaux constitué d'une couche de matériau isolant entre deux plaques de matériau profilé), ces panneaux permettent d'isoler thermiquement l'appareil du milieu extérieur et le protéger contre la pluie. Pour se faire, la cabine doit disposer d'un espace suffisant pour mettre l'appareil et d'une ouverture pour faire sortir la tête de prélèvement ; A cet effet, nous avons d'abord fait des ouvertures pour faire passer les câbles de la station météo et celui de l'alimentation, puis, on a troué le toit de la cabine pour faire passer la tête. Nous avons fixé et installer la station météo sur une barre métallique en tenant compte que cette dernière doit être orientée vers le Nord (un indicateur est placé dans la station). Nous avons ensuite installé l'appareil tout en assurant l'étanchéité des ouvertures en mettant de la silicone autour des câbles et de la tête de prélèvement. A signaler que la tête de prélèvement est à une hauteur de 0.5 m à partir du toit de la cabine. Des tests ont été réalisés pour vérifier son bon fonctionnement.

Après deux semaines de mesure au CDER, l'appareil a été déplacé à l'hôpital de Mustapha Bacha pour faire une étude sur les niveaux des polluants à Alger Centre. Nous l'avons installé dans un espace ouvert, dans une cabine climatisée faite en panneaux sandwichs avec d'autres appareils. Son montage a été effectué comme à Bouzaréah (Figure 32 et 33). La tête et la station météo sont tous les deux installées sur le toit de l'armoire. L'analyseur est toujours fonctionnel en ce site à ce jour.



Figure 33. Installation de l'appareil au site de Bouzaréah



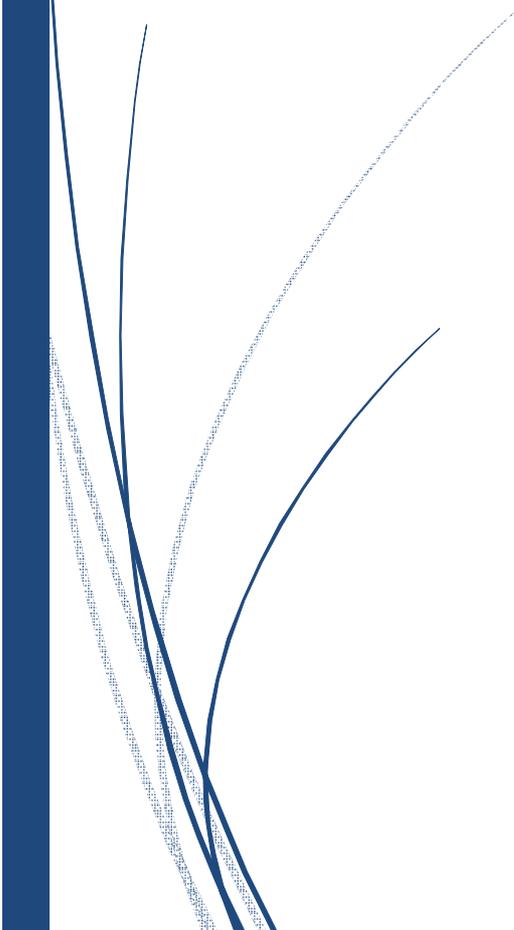
Figure 34 Installation de l'appareil au site du Mustapha Bacha

The logo consists of a dark blue vertical bar on the left and a blue arrow pointing to the right, containing the text "ENP 2017" in white.

ENP 2017

Partie 03

Résultats et Interprétations



III. Résultats et Interprétations

Le présent chapitre présente les résultats obtenus par le FIDAS 200 et traités par le logiciel PDAnalyze et leurs interprétations.

III.1. Teneurs atmosphériques en particules

Les concentrations moyennes journalières, les teneurs extrêmes ainsi que les écarts types sont résumés dans le tableau 2. Pour les PM10, les concentrations varient de 8 à 101 et 12 à 184 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Bouzaréah et Alger-centre respectivement. Les PM2.5 varient de 3,7 à 43 et 4 à 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Bouzaréah et Alger-centre respectivement. Les PM1 quand à eux accusent des teneurs journalières allant de 2,3 à 32 et 2,6 à 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Bouzaréah et Alger-centre respectivement.

Tableau 3. Teneurs moyennes et extrêmes journalières des PMi à Bouzaréah et Alger-centre en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

PMi $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Site semi urbain (Bouzaréah)				Site urbain (Alger-Centre)			
	Max	Min	Moyenne	Ecart	Max	Min	Moyenne	Ecart
PM1	32,32	2,28	7,82	4,74	31,97	2,65	10,12	4,35
PM2.5	43,03	3,73	10,88	5,85	42,73	4,04	14,11	5,53
PM4	71,41	5,87	20,41	10,33	84,60	8,25	24,35	9,66
PM10	101,30	8,32	31,57	17,28	183,91	12,54	35,73	19,17
PMtot	176,06	10,57	45,93	28,03	313,60	15,00	50,72	33,13

Ce tableau montre d'abord que pour toutes les classes granulométriques, les teneurs moyennes mesurées en site urbain sont supérieures à celles de Bouzaréah. Ce résultat était en fait attendu, vu que le centre d'Alger est plus exposé aux émissions du trafic routier et autres émissions diffuses.

En milieu urbain, les teneurs dépassent les teneurs du site semi urbain d'environ 14% pour les PMtot et PM10 et d'environ 20 ; 28 et 30% pour les PM2.5, PM4 et PM1 respectivement.

On constate également que pour les deux sites, les PM10 constituent environ 70% des PMtot. Ceci est important en ce sens que lorsqu'on ne dispose pas d'appareil avec une tête de seuil coupure de 10 μm , on peut mesurer les particules totales en suspension (chose qui est plus facile à faire) et à partir de là estimer les PM10.

La figure 35 présente les variations instantanées des concentrations des PMi dans les deux sites étudiés. Nous remarquons que les niveaux des PMtot, PM10, PM4, PM2.5 et PM1 atteignent respectivement de valeurs maximales instantanées (moyenne sur 1 mn) de 260 ; 75 ; 50 ; 30 et 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Bouzaréah et 410 ; 100 ; 50 ; 25 et 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Mustapha Bacha, avec une corrélation entre la variation des pics des PMi pour les deux sites.

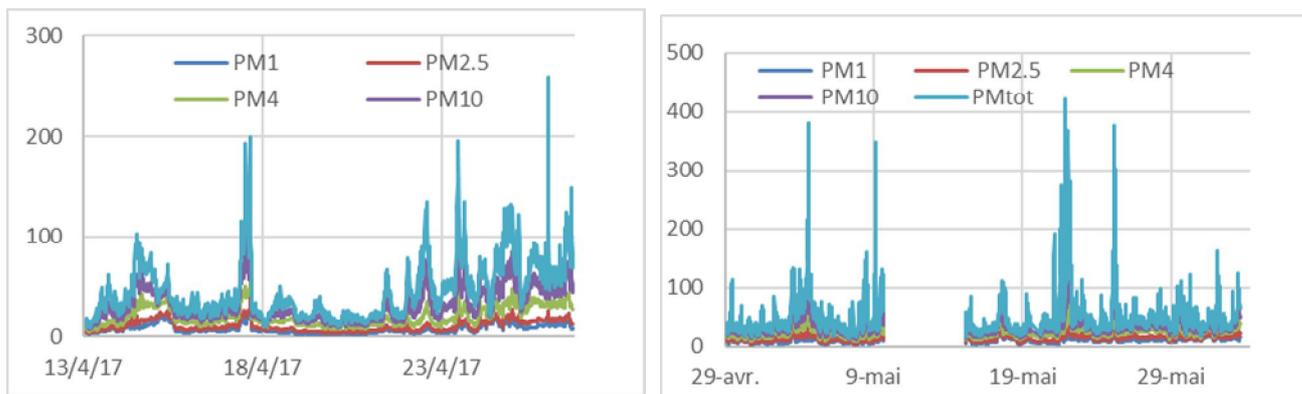


Figure 35. Evolution des concentrations instantanées des PMi mesurées dans les sites étudiés

L'évolution des moyennes journalières des teneurs atmosphériques en PMi mesurées à Bouzaréah et à Alger-centre sont illustrées respectivement en figure 36 et 37

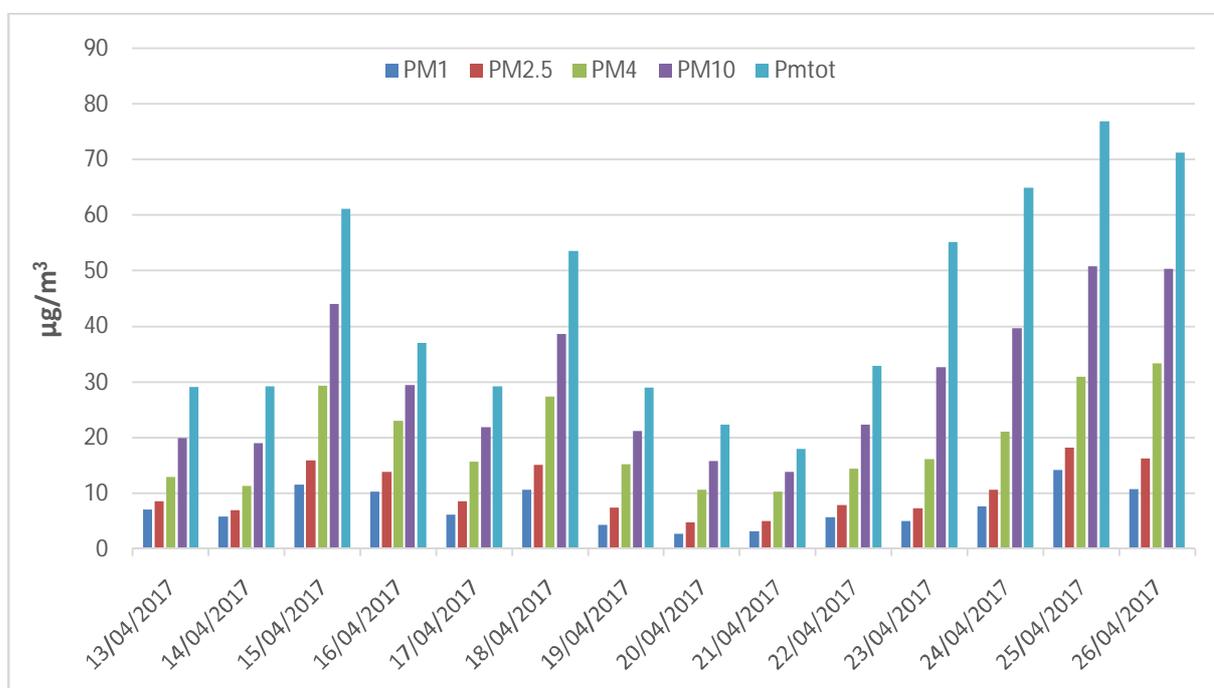


Figure 36. Evolution des moyennes journalières des concentrations des PMi mesurées à (Bouzaréah)

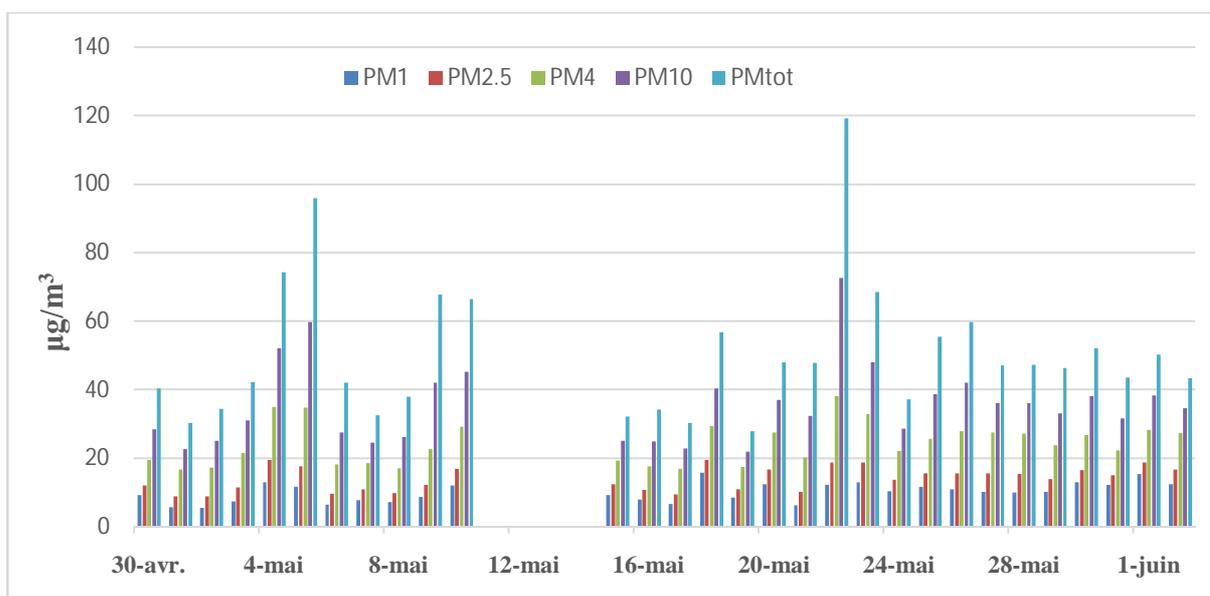


Figure 37. Evolution des teneurs atmosphériques en PMi mesurées à (Alger-Centre)

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

Nous remarquons que les niveaux des PM2.5 dans les deux sites, elles dépassent les limites de la valeur annuelle limite $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ exigée par l'OMS à Bouzaréah pendant 6 jours/14, et durant toute la période de mesure à l'hôpital Mustapha Bacha, ce qui est un risque sanitaire sur les malades de l'hôpital et les riverains.

Pour le cas des PM10, elles sont inférieures à la norme Algérienne, mais, elles ont atteint $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant deux jours (Norme OMS sur 24h) et 10 jours (norme annuelle $20\mu\text{g}/\text{m}^3$) à Bouzaréah et 3 jours à Mustapha Bacha pour les limites journalières et pendant toute la période pour la limite annuelle. Une étude de cause à effet va suivre ce travail en collaboration avec les spécialistes dans les maladies pneumologiques à l'hôpital Mustapha Bacha.

Le maximum journalier de pollution par les PMtot, PM10, PM4, PM2.5 et PM1 a été enregistré le 25 Avril 2017 à Bouzaréah avec des pics atteignant respectivement 78 ; 50 ; 30 ;

18 et 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces teneurs très élevées sont probablement dues à un transport de particules désertiques à partir du Sahara Algérien. L'examen des rétro trajectoires des masses d'air obtenues à l'aide du Modèle Hysplit [32] montre qu'effectivement cette journée coïncide avec un mouvement de masses d'air de basse altitude provenant du Sud et balayant la zone étudiée (figure37)

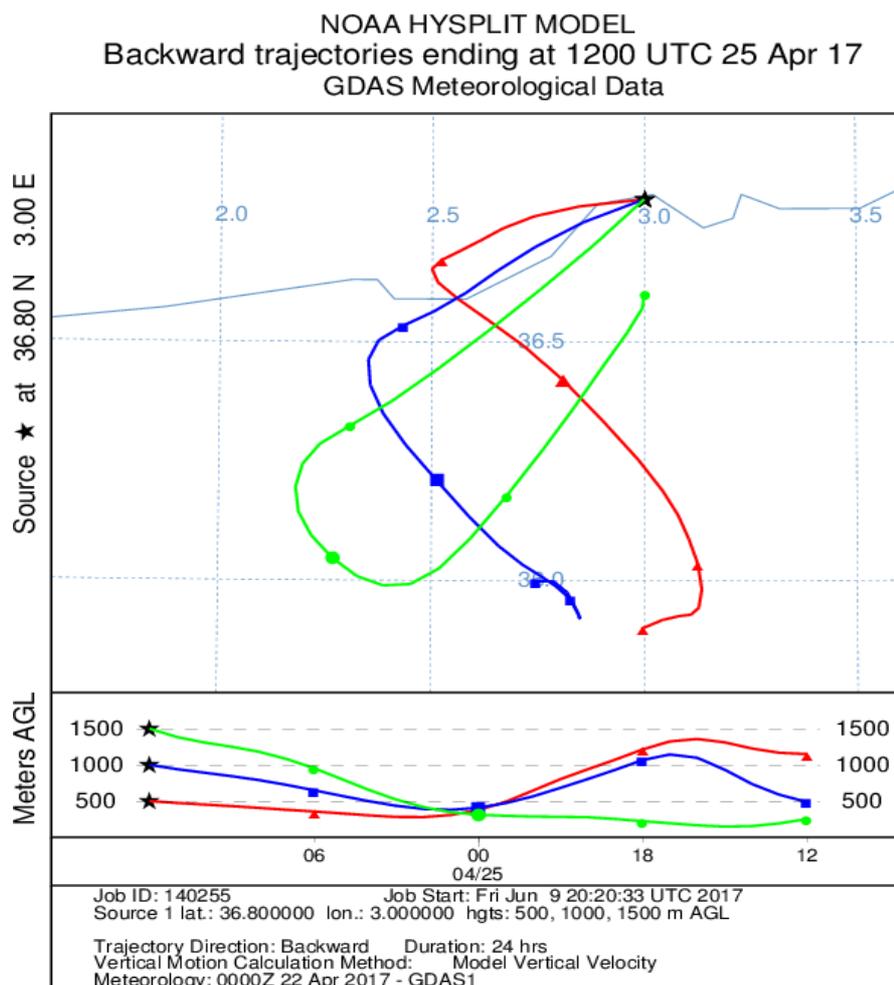


Figure 38. Rétro trajectoire des masses d'air du 25 Avril 2017 réalisée par le Modèle Hysplit

Pour le cas du site de Mustapha Bacha, la journée du 22 Mai 2017 a enregistré des Maximums journaliers de pollution par les PMtot, PM10, PM4, PM2.5 et PM1 de 120, 72, 38, 18 et 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement, ce qui peut s'expliquer en partie par les vents venant du côté du Sud-ouest algérien comme montré par la figure 35 mais on le verra plus tard cette journée est précédé par une situation sociale spéciale (le 21 Mai) qui a mené à ce Maximum.

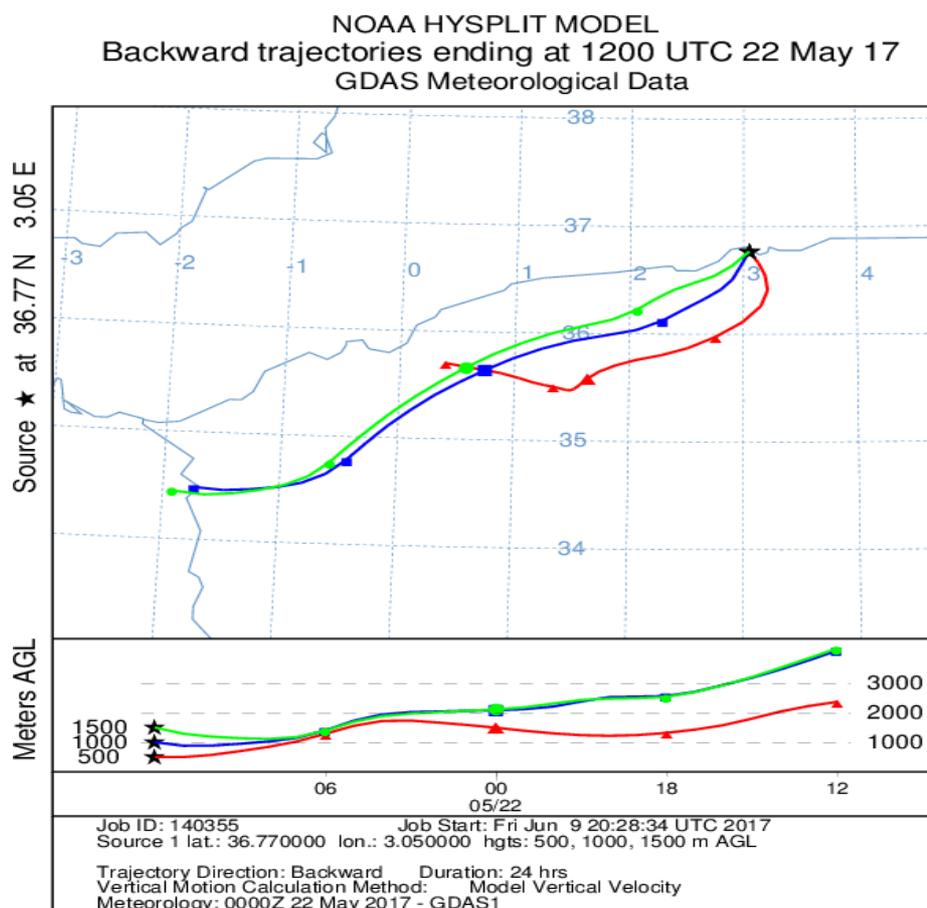


Figure 39. Rétrotrajectoire des masses d’air du 22 Mai 2017 réalisée par le Modèle Hysplit

Nous remarquons que les moyennes des PM1 sont élevées dans les deux cas, spécialement à Mustapha Bacha, où, elles ont dépassé même la norme annuelle OMS des PM2.5, ce qui peut causer de graves impacts sanitaires.

L’importance de la fourchette de variation des teneurs en PMi est certainement due aux variations dans l’intensité du trafic routier, à l’influence des facteurs météorologiques (humidité, vitesse et direction de vents) qui conditionnent la dispersion des particules. 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 ou de leur transport.

Nous présentons dans la figure suivante les pourcentages de chacune des classes particulières dans les deux sites étudiés. D’après les résultats de la figure 39 les PM>10µm représentent la tranche de particules la plus abondante avec 39% pour Bouzaréah et 37% pour Alger-centre, suivie des PM10 avec respectivement 27% et 26%.

Le site de Bouzaréah représente un taux plus élevé en PM grossières ce qui s'explique par la présence de la carrière de Bab El Oued et de la cimenterie de Rais Hamidou à 1km environ, contrairement aux PM2.5 et PM1 qui se présentent plus dans le site urbain, ce qui est dû au trafic routier et aux activités humaines.

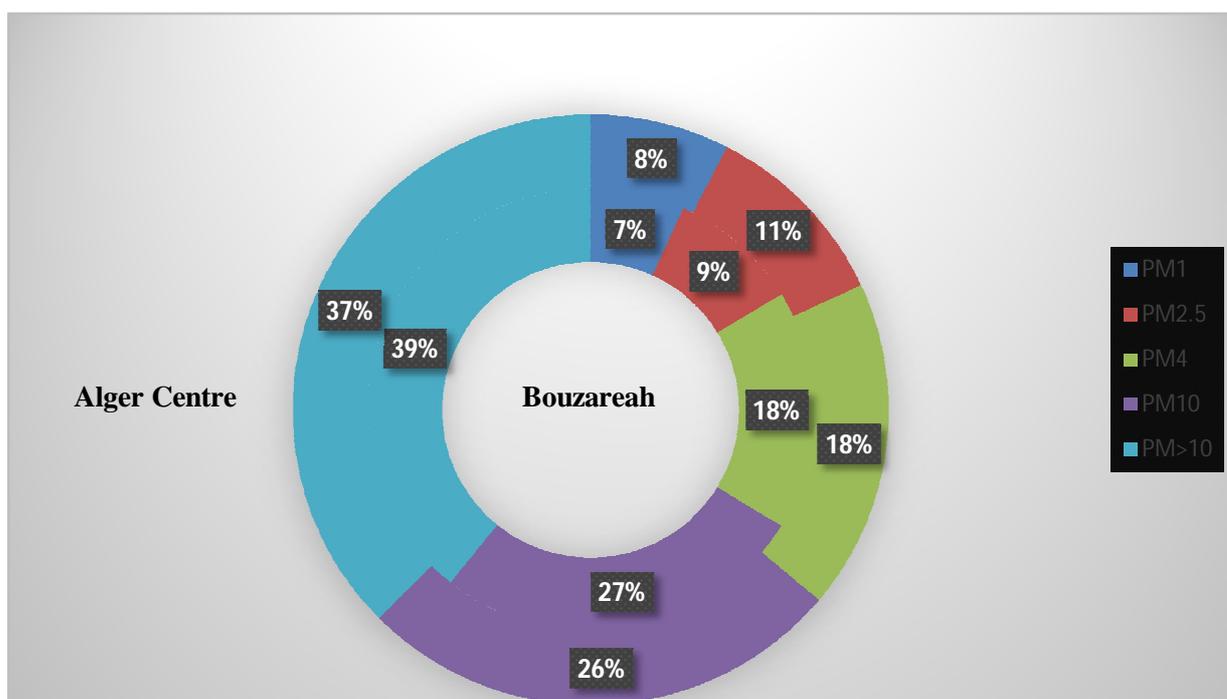


Figure 40. Pourcentage de chacune des classes particulières pour les deux sites étudiés

Distribution massique

La contribution en pourcentage massique des différentes classes granulométriques à l'ensemble des particules totales mesurées est illustrée dans la figure 39. Cette répartition montre que c'est surtout la fraction des particules inhalables ($d > 1\mu\text{m}$) qui a une fraction massique la plus élevée. On relève par ailleurs que plus de 16% des PM_{tot} sont des particules alvéolaires d'un diamètre inférieur à $2.5\mu\text{m}$ qui pénètrent profondément dans le système respiratoire. La fraction thoracique (PM_{2.5} à $10\mu\text{m}$) qui est constituée généralement de particules terrigènes ne constitue que le 18% des PM_{tot} ce qui reste sont des PM dont le diamètre est > 10 .

III.2. Etudes de cas des PMi

Dans ce qui suit nous réaliseront une étude de cas des PMi en détail.

➤ PM10

- Site semi-urbain de Bouzaréah

Les concentrations en PM10 varient entre 14 et 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La moyenne s'établit à 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ voisine de l'objectif de qualité européen (30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Elle est très largement au-dessous de la valeur limite algérienne (80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et inférieure à celle de l'union européen (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

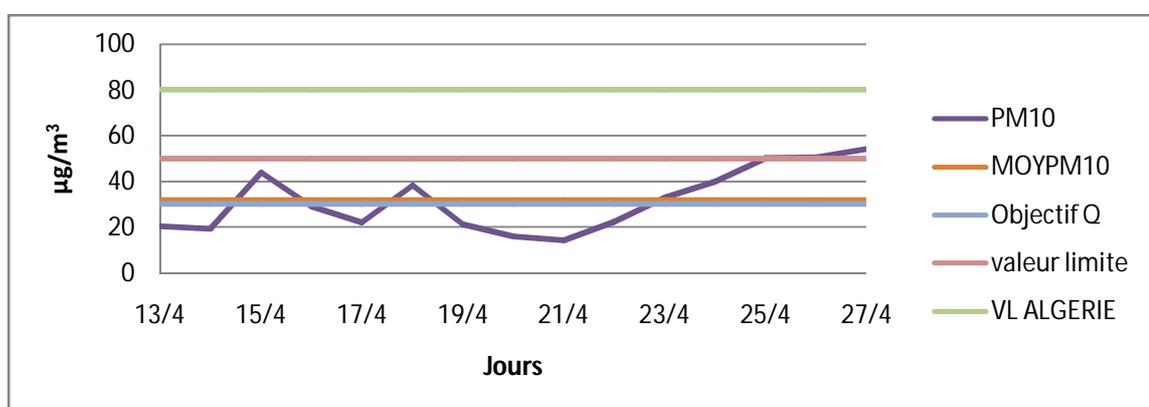


Figure 41. Etude de cas des PM10 dans le site semi-urbain de Bouzaréah

Le suivie des teneurs de ces particules chaque 15 mn (Figure 41) 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 PM10 atteignent 148 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le rapport PM10/PMtot évoluant entre 0.49 et 0.96, avec un rapport moyen de 0.72 ce qui montre qu'une grande part des particulaires dans l'air est inhalée par les citoyens.

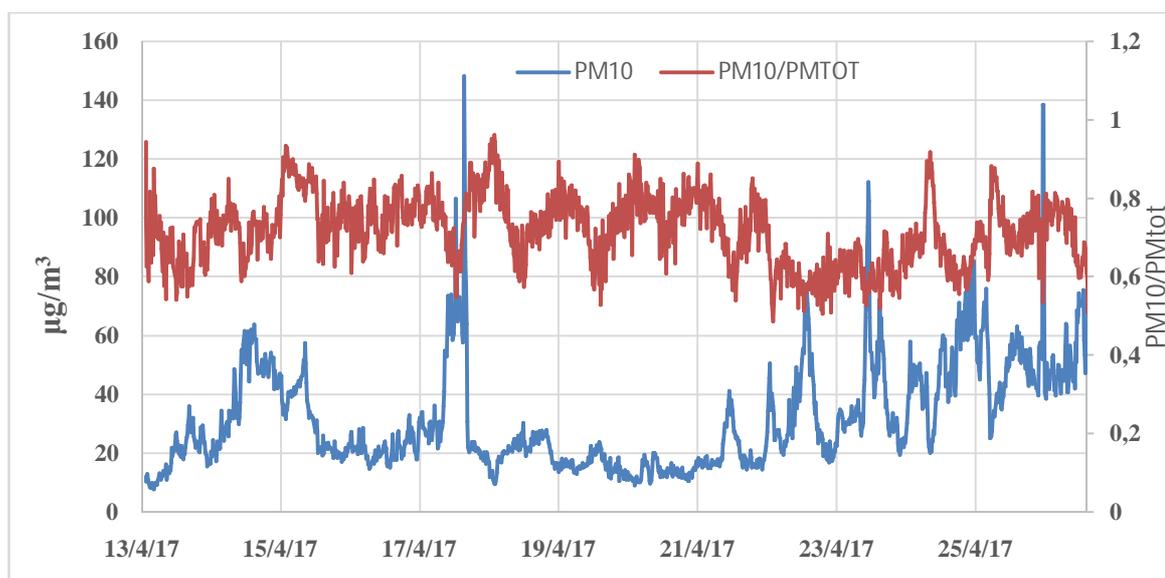


Figure 42. Rapport entre les PM10 et PMtot dans le milieu semi-urbain de Bouzaréah

- Site urbain de Mustapha Bacha

Lors de la période de mesure à l'hôpital de Mustapha Bacha, la pollution atmosphérique par les particules enregistrées était plus élevée par rapport à celle de Bouzaréah, où, les concentrations en PM10 varient entre 20 et 75 µg/m³. La moyenne s'établit à 35 µg/m³, dépassant l'objectif de qualité européen (30 µg/m³), néanmoins, elle est très largement au-dessous de la valeur limite algérienne (80 µg/m³) et inférieure à celle de l'union européenne (50 µg/m³) (figure 42...).

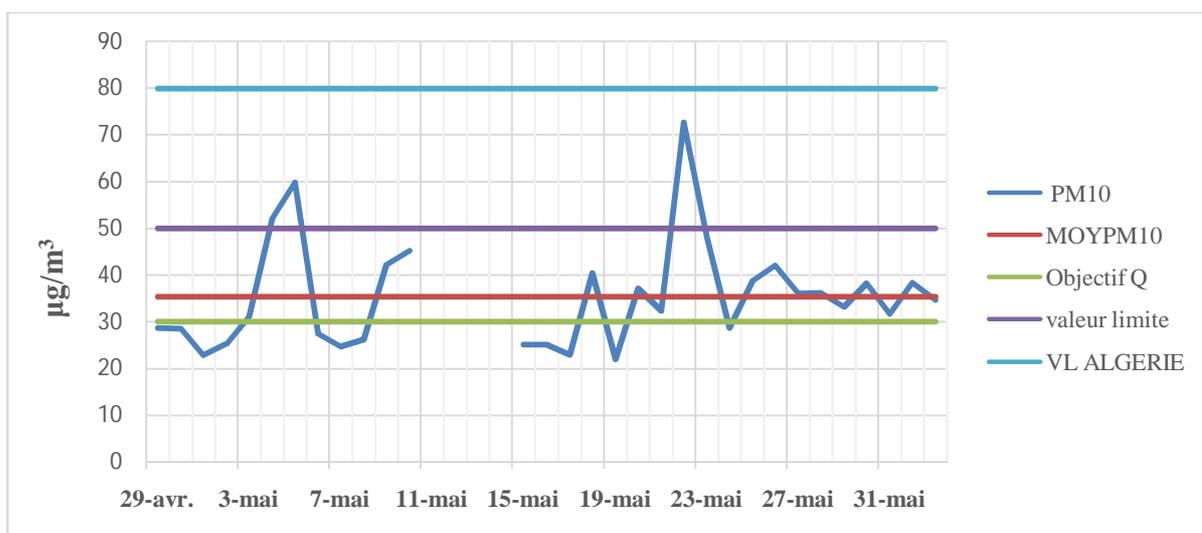


Figure 43. Etude de cas des PM10 dans le site urbain de Mustapha Bacha

Le suivi des teneurs de ces particules chaque 15 mn (Figure 43) montre des teneurs maximales des PM10 atteignant $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec un rapport PM10/PMtot évoluant entre 0,44 et 0,95 ou le rapport moyen est de 0.73.

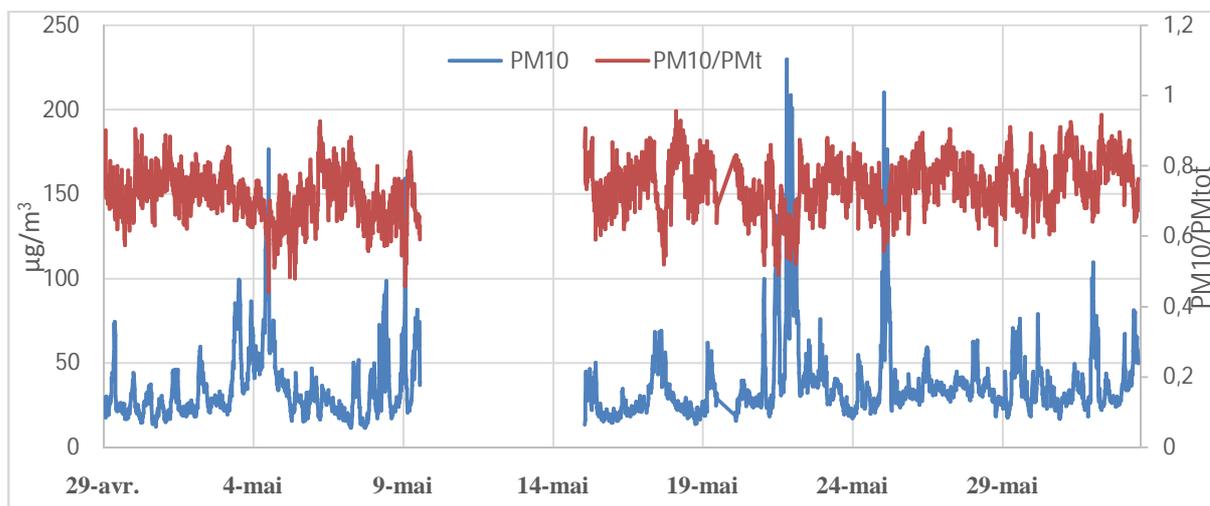


Figure 44. Rapport entre les PM10 et PMtot dans le milieu urbain de Mustapha Bacha

Pour le cas des valeurs quotidiennes mesurées pour les deux sites, seule une est en dessus de la valeur limite européenne de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au niveau de la zone semi urbaine sur 15 jours et deux dépassements pour la zone urbaine sur un mois de mesures. Ces résultats nous conduisent à prédire la possibilité que le nombre maximum de dépassement (35 sur l'année selon la norme Européenne) puisse être largement dépassée si la campagne de mesure se poursuit sur une année.

➤ PM2.5

- Site semi-urbain de Bouzaréah

Au niveau du site semi-urbain, la fraction de PM2.5 est minoritaire (Figure 44) et varie entre 5 et $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, La moyenne des PM2.5 s'établit à $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 PM2.5/ PMtot évoluant entre 0.15 et 0.73 avec un rapport moyen de 0.36, ce qui a été déjà expliqué.

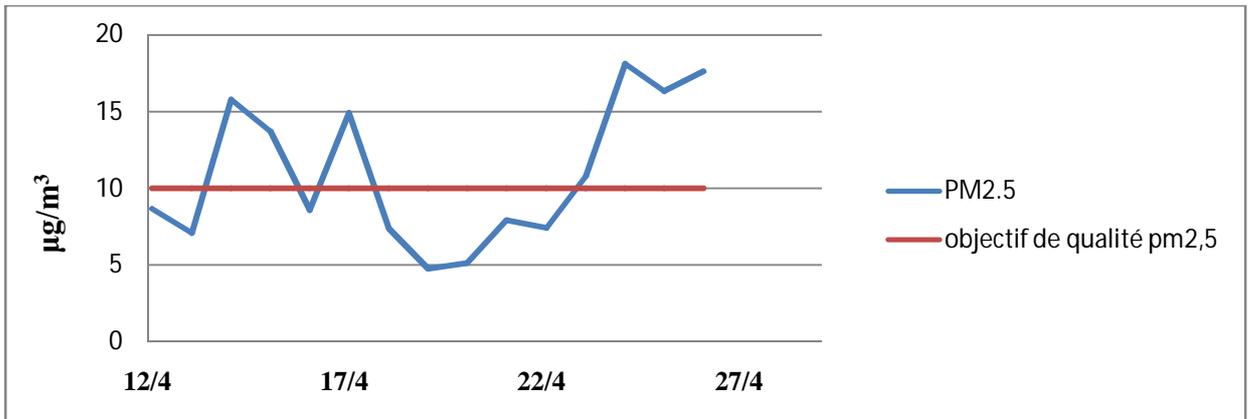


Figure 45. Etude de cas des PM2.5 dans le site semi-urbain de Bouzaréah

Sur les 15 moyennes journalières obtenues, quatre dépassements de l'objectif de qualité de l'OMS (annuelle) ont été enregistrés.

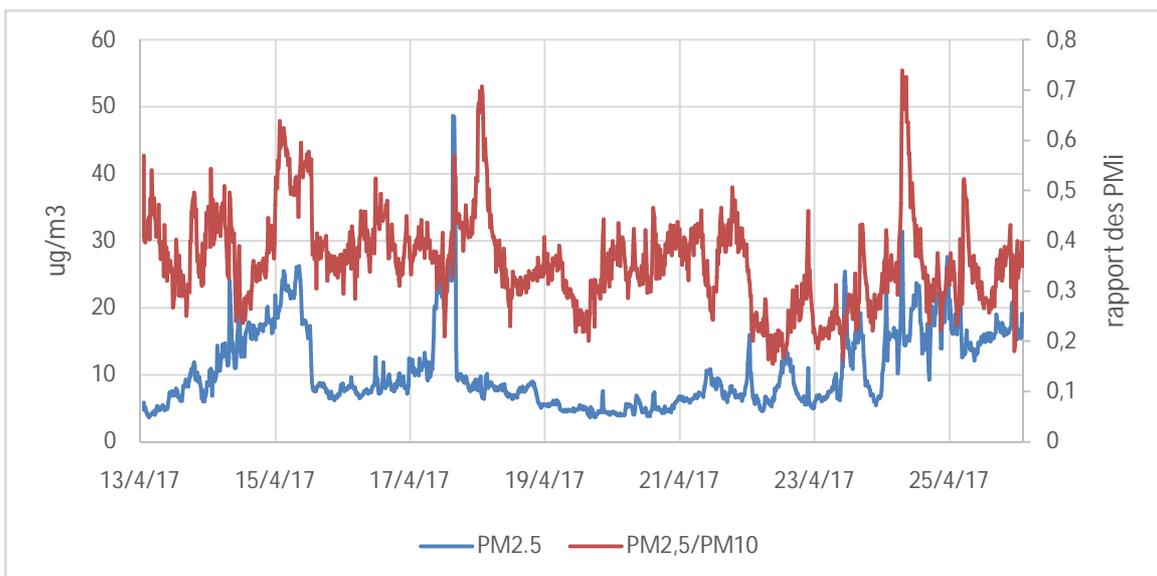


Figure 46. Rapport entre les PM2.5 et PM10 dans le milieu semi-urbain de Bouzaréah

- Site urbain de Mustapha Bacha

Sur les 36 valeurs quotidiennes mesurées à Alger centre, la valeur annuelle de la norme OMS pour cette fraction a été largement dépassé ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) durant toute la campagne de mesure, où, la moyenne s'établit à $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, et le rapport $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ évoluant entre 0,05 et 0,68 avec un rapport moyen de 0.31

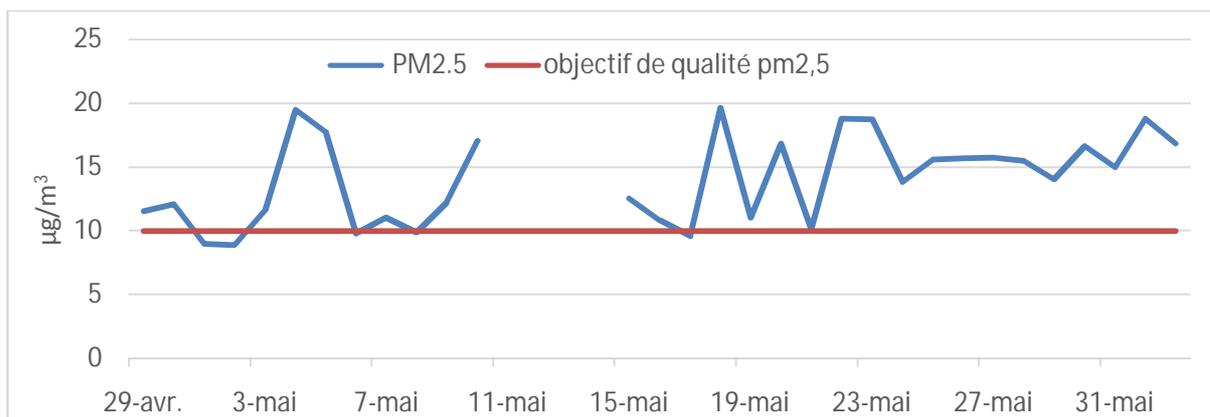


Figure 47. Etude de cas des $\text{PM}_{2.5}$ dans le site urbain de Mustapha Bacha

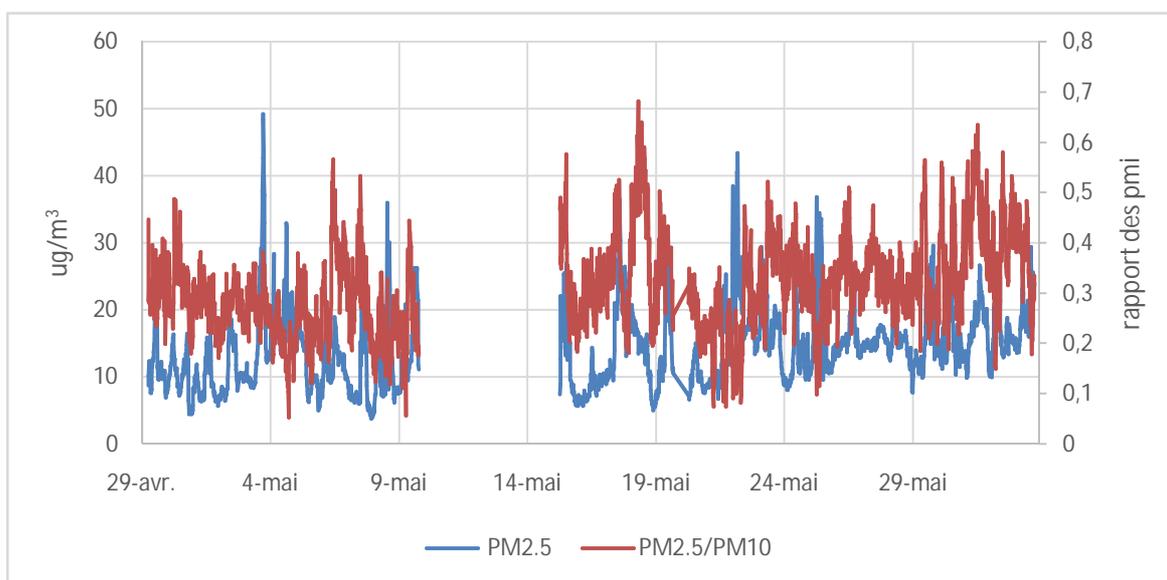


Figure 48. Rapport entre les $\text{PM}_{2.5}$ et PM_{10} dans le milieu urbain de Mustapha Bacha

➤ PM1

Sur la période de mesure à Bouzaréah, les concentrations en PM1 varient entre 2 et 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La moyenne s'établit à 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ce qui avoisine la valeur annuelle de la norme OMS pour les PM2.5 (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Cette situation s'aggrave de plus en plus à Alger centre, où, la valeur maximale des PM1 enregistré atteint 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ /jour et 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ /heure ce qui est très dangereux en absence d'une norme pour cette classe de particules qui traversent le système respiratoire. Tandis que la moyenne s'établis à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Le rapport PM1/ PM10 évoluant entre 0,05 - 0,73 pour les deux sites tandis que la plupart des jours, la proportion de PM1 représente environ 70% des émissions de PM2.5 (où le rapport PM1/ PM2.5 évoluent entre 0.5 et 0.90). Cela montre que les gens respirent des particules ultrafines qui ont de graves répercussions sur la santé comme le carbone suie et les métaux lourds.

Si les PM1 qui constituent la partie la plus fine des particules ont atteint une valeur de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cela met en danger toute la population de la région, en ce qui concerne les malades de l'hôpital et les habitants d'Alger. Les particules agissent comme un agglomérat de substances chimiques et/ou biologiques diverses dont certaines sont cancérigènes comme par exemple certains HAP, des métaux lourds ou encore des allergènes. Ces composés qui sont transportés par les particules se fixent sur l'ADN et peuvent provoquer des processus cancérigènes. A ce titre, Marano [31] indique que les toxicologues ont développé le concept du cheval de Troie : **« Les particules font entrer dans le poumon profond des molécules organiques et/ou d'origine biologique qui n'auraient pas pu y accéder seules. Elles participent également à leur passage des barrières biologiques, en particulier la barrière alvéolo-capillaire ».**

En remarquant l'absence des normes sur cette taille de particules, une étude réalisée par Kan Haidong, professeur à l'École de Santé Publique à l'Université Fudan basée sur une étude épidémiologique, a montré que les particules fines dans l'air mesurant entre 0,25 et 0,5 microns de diamètre ont une relation plus étroite avec la santé humaine, en particulier un risque accru de maladies cardiovasculaires. Selon ce professeur, plus les particules sont petites, plus la concentration dans un volume donné d'air est forte et donc plus le nombre de particules qui entrent en contact avec des tissus à l'intérieur du corps humain est élevé [33].

En ce qui concerne l'absence des normes limitant cette catégorie d'émission, T K Joshi, directeur du Centre de Santé Professionnelle et Environnementale (COEH) a révélé qu'il n'y a pas de norme sure pour PM1 simplement parce **qu'il n'y a pas de niveau qui puisse protéger tout le monde contre ses effets sur la santé. Il y a des personnes extrêmement sensibles même à des niveaux très bas. La pensée actuelle est que nous réduisons les particules fines autant que possible. C'est une proposition très chère [34]**

Un autre problème qui **inquiète** les experts de la santé est que les particules de PM1 ne subissent pas un lessivage par les gouttes de pluie. Cela signifie, même après la pluie, lorsque la concentration des polluants diminue, les PM 1 seront toujours présentes dans l'air [34].

➤ PM4

En ce qui concerne les teneurs des PM4 mesurées à Bouzaréah, les concentrations varient entre 10 et 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et la moyenne s'établit à 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le rapport PM1/ PM10 évolue entre 0,20 et 0,92. C'est teneurs augmentent pour atteindre 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Mustapha et Le rapport PM1/ PM10 évoluant entre 0.14-0.90 à Alger-

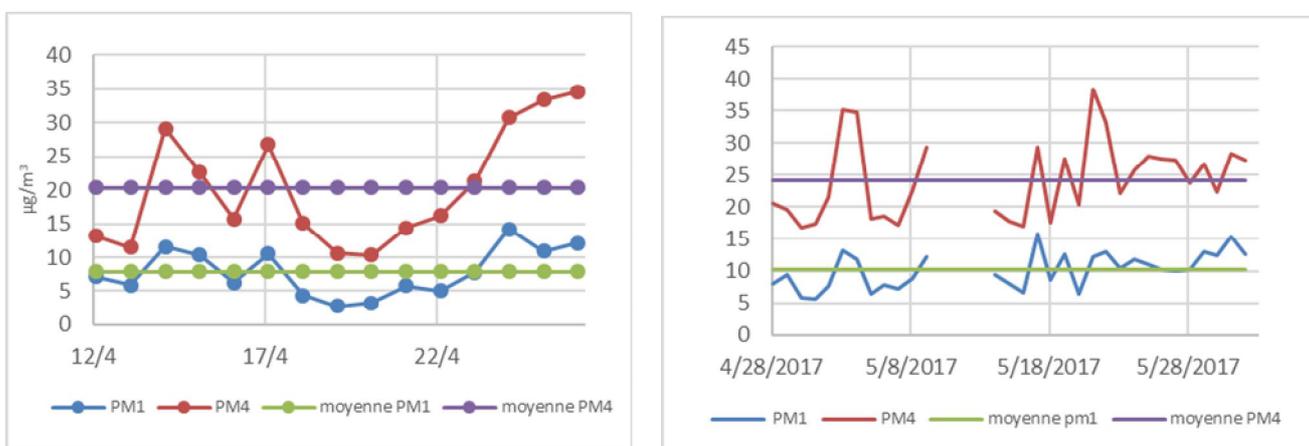


Figure 49. Etude de cas des PM1 et PM4 dans les deux sites étudiés

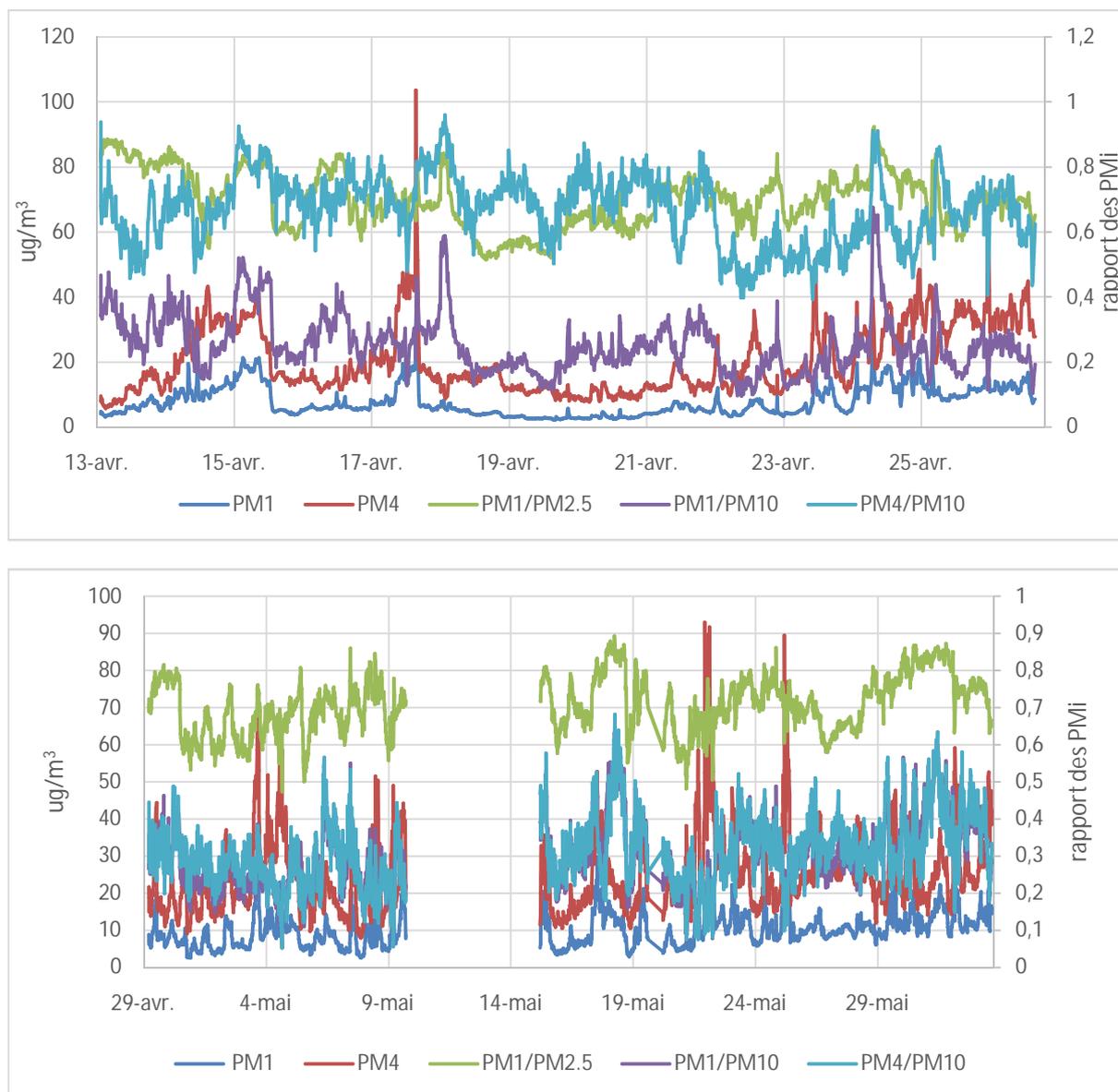


Figure 50 Rapport entre les PM1 et PM10, les PM1 et PM2.5 et entre les PM4 et PM10 dans les deux sites étudiés

III.3. La distribution des particules

Nous étudions dans ce qui suit l'évolution de la distribution des particules dans les deux sites étudiés (figures 50 et 51). On aboutit donc à cette distribution du nombre, de la surface et de la masse des particules.

Nous remarquons que les nanoparticules (16-50 nm) sont les plus nombreuses, mais elles constituent une masse négligeable. Les microparticules de diamètres supérieurs à 5 μm

forment presque la totalité de la masse alors que leur nombre est négligeable. Enfin, les particules dont le diamètre est compris entre 0.16 et 0.5 μm dans la zone semi-urbaine et 0.16-0.38 μm dans le site urbain, sont responsables de la majeure partie de la surface de contact entre les particules et le milieu ambiant.

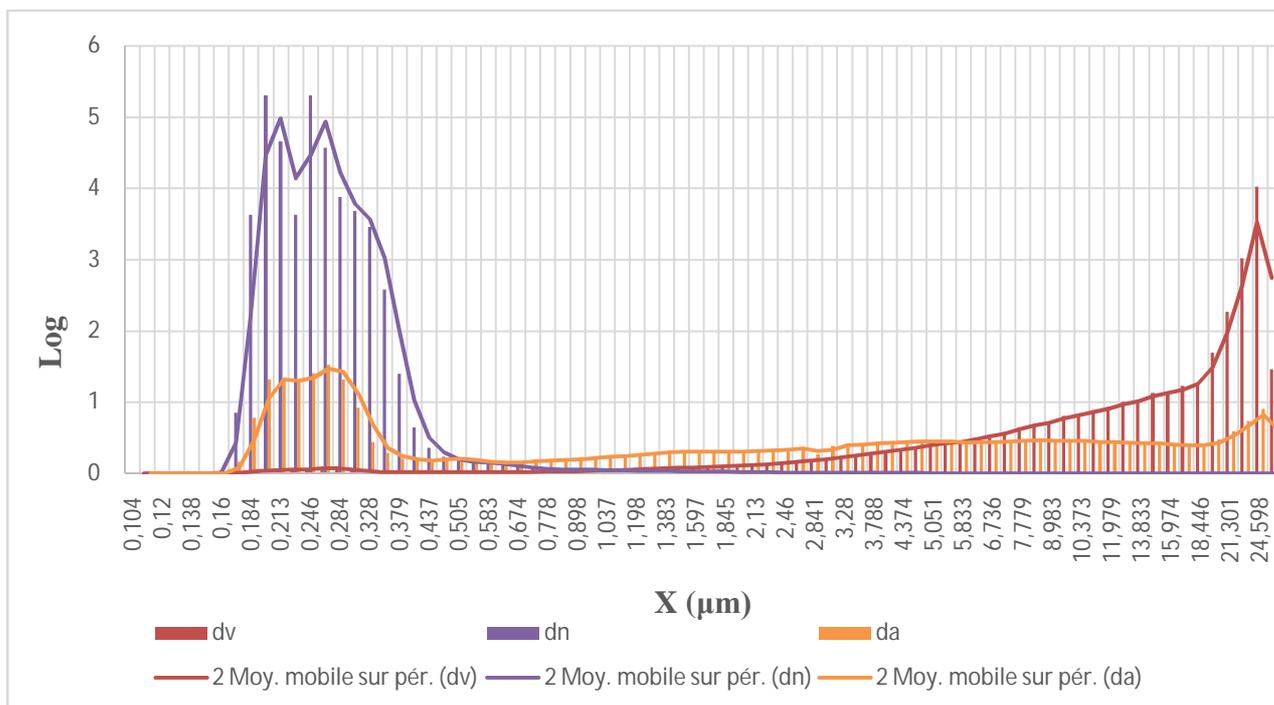


Figure 51. Distribution du nombre, de la surface et de la masse des particules au site semi-urbain

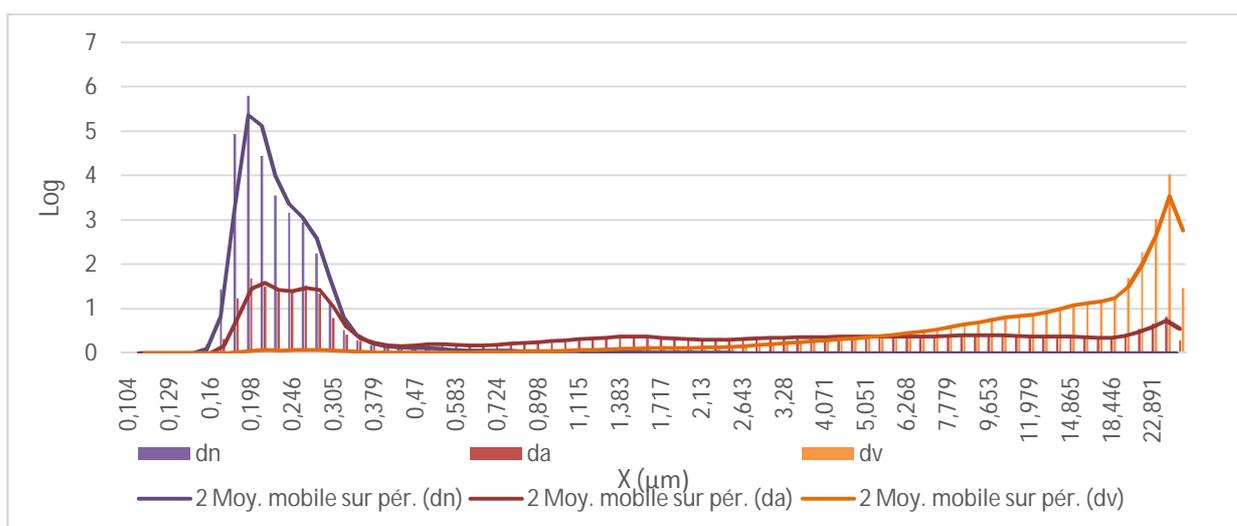


Figure 52. Distribution du nombre, de la surface et de la masse des particules au site de Bouzaréah au site urbain

La distribution en nombre des particules des deux sites de prélèvement représentée dans les deux figures ci-après montre que la plus parts des particules sont des PM1 (< 0.2µm) qui correspond aux particules de combustion, suie, fumée de tabac et des poussières en suspension.

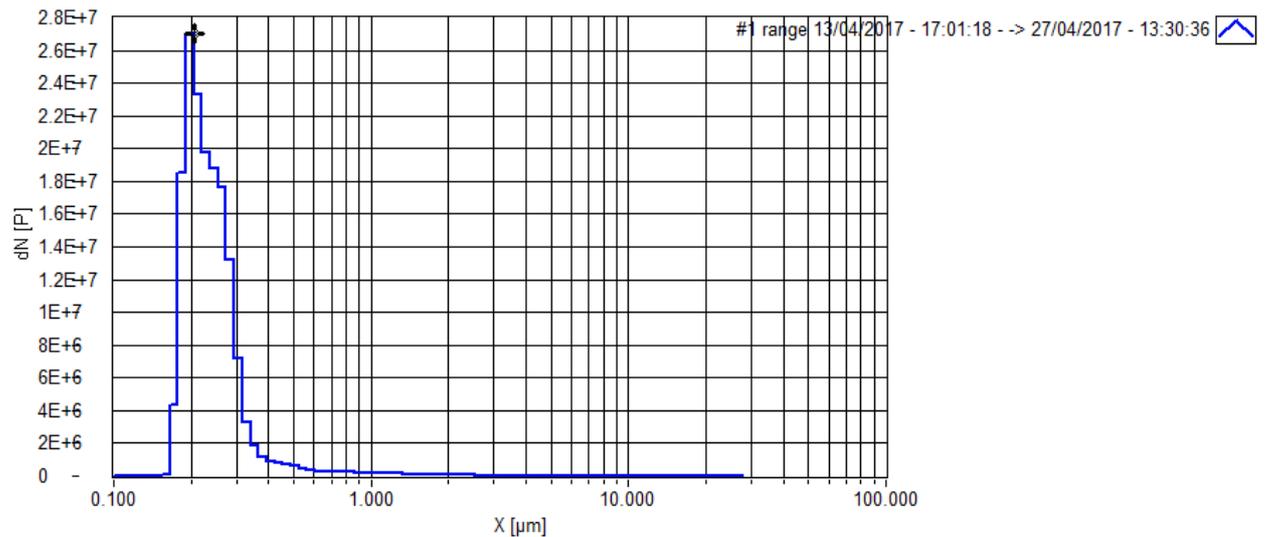


Figure 53. Distribution en nombre de particules sources dans le site semi-urbain

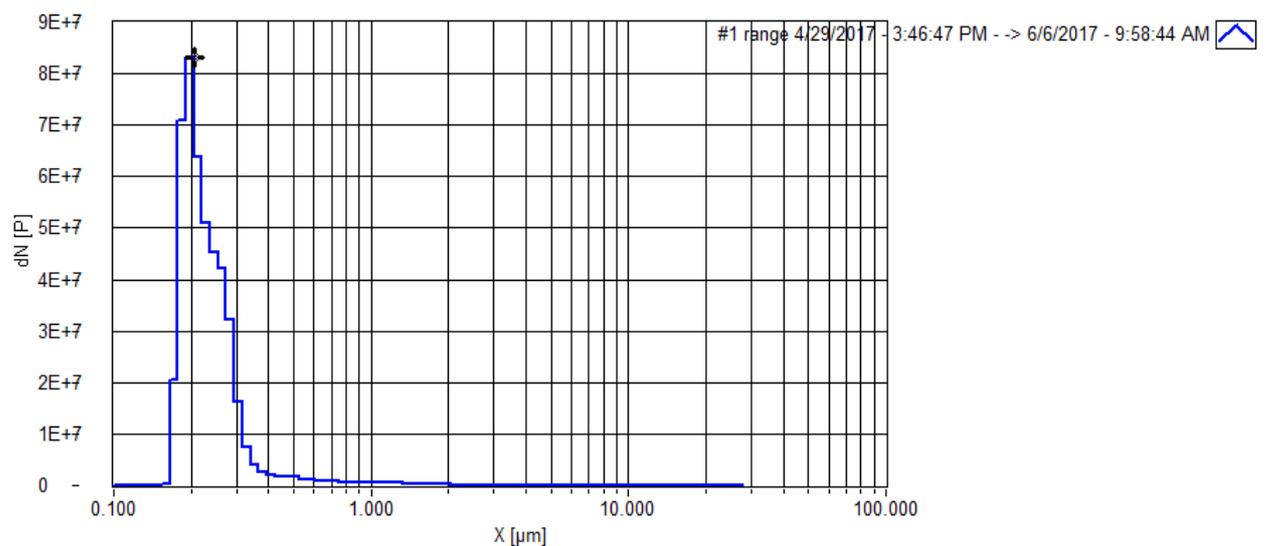


Figure 54. Distribution en nombre de particules sources dans le site urbain

III.4. Identification de signatures

Nous nous intéressons dans cette partie aux différentes allures de présence des polluants en fonction des périodes journalières et hebdomadaires. La présence de formes répétables enrichit nos informations sur les pollutions au sens où elles peuvent être utilisées pour identifier la principale source de la pollution rencontrée sur les sites étudiés.

III.4.1. Variabilité journalière de la pollution particulaire

Nous examinons les évolutions journalières des concentrations horaires de PM_i durant les jours ouvrables et le week-end.

Dans le cas du site semi-urbain de Bouzaréah, la figure 37 présente la variation journalière des concentrations de PM_i. Le cycle journalier présente des niveaux maximum le matin et en milieu de journée (entre 8h 30mn et 13h30mn), avec des pics vers 8h 30mn et 11h pour les PM_{tot} et PM₁₀, ce qui correspond aux horaires des pics de trafic quotidien, En début d'après-midi, les niveaux diminuent puis se stabilisent en fin de journée. Nous remarquons que la différence entre les concentrations moyennes des particules durant le jour et la nuit est importante.

Pour les PM_{tot} et PM₁₀ la différence est d'environ 40% et 30% respectivement, cette augmentation pendant le jour est due principalement aux activités des carrières, cimenteries et aux particules relevées par le vent. Par contre, l'augmentation des niveaux de PM₄, PM_{2.5} et PM₁ durant le jour ne représentent que 25%, 30% et 25% respectivement, qui sont liées à la combustion des carburants et aux activités industrielles.

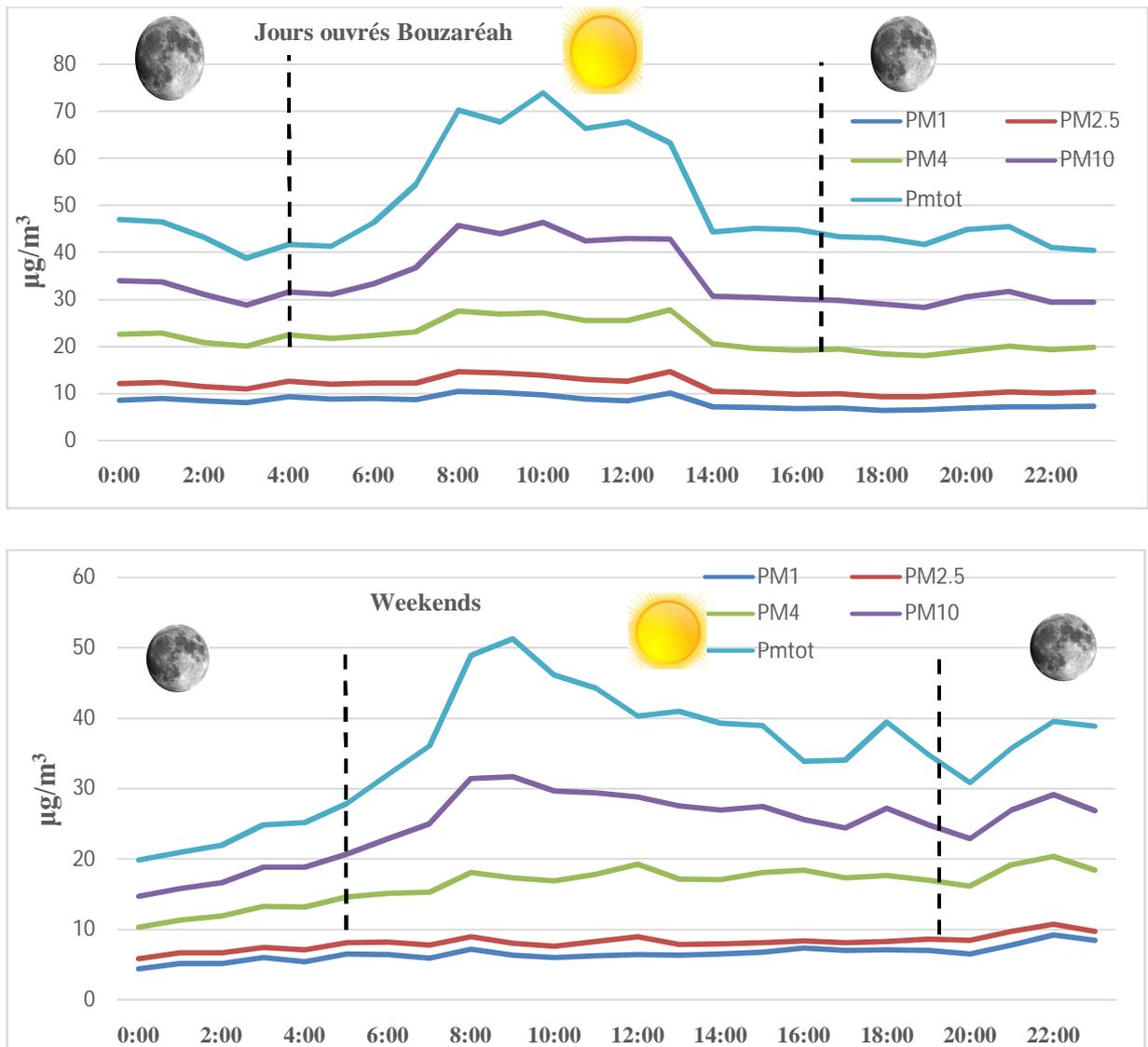


Figure 55. Variation diurne (jours ouvrés et weekends) des concentrations des PMi dans le site de Bouzaréah

Le même profil est observé sur le site urbain d'Alger-Centre, avec une amplitude plus forte et une remonté marquée en fin de journée, qui peut être due au mois de ramadan, où, il y a une forte circulation de véhicules le soir.

Sur ce site, des pics sont enregistré vers 7h, 10h et 22h pour les PM_{tot} et PM₁₀ de 65, 49 et 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement, ce qui correspond aux horaires des piques de trafic quotidiens et aux activités durant les nuits de ramadans, en particulier. D'autre part, les valeurs maximales pour le cas des PM₄, PM_{2.5} et PM₁ sont respectivement de 30, 18 et 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, observées à 8h 30mn et 10h du matin, ce qui peut être directement dû aux activités humaines (parc automobile, port, carrières...). Les valeurs des PM_i se stabilisent à partir de 12h autour de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{tot}, 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM₁₀, 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM₄, 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{2.5} et 7.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM₁ en suite une remontent vers 16h, puis, redescendent.

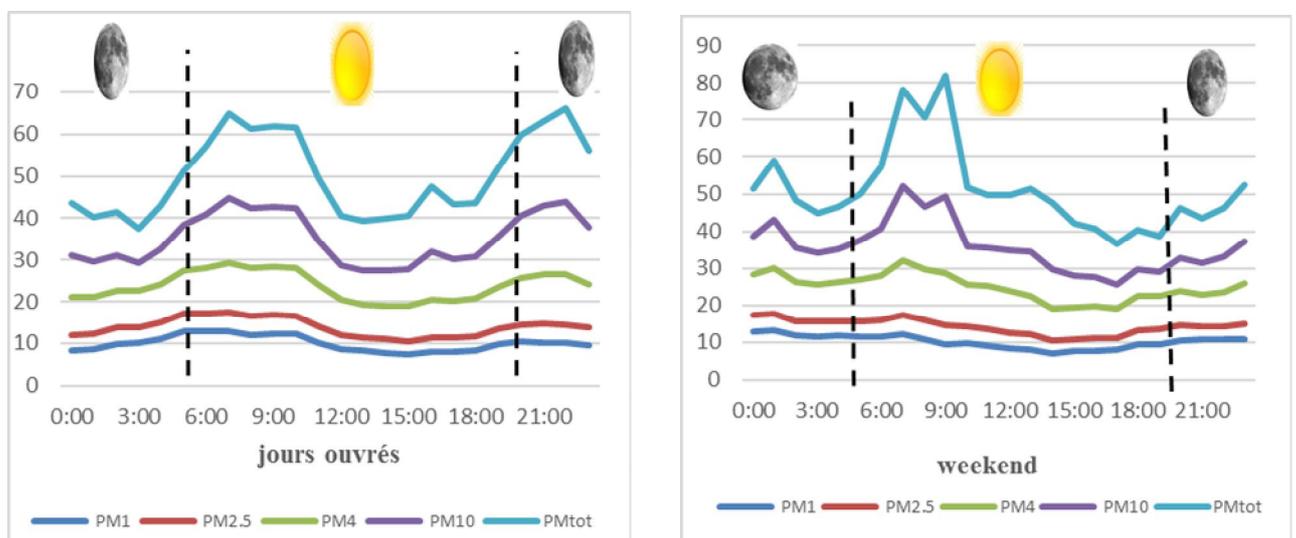


Figure 56. Variation diurne (jours ouvrés et weekends) des concentrations des PM_i dans le site d'Alger-Centre

Ce qui est de particulier est l'absence de la différence marquée entre la nuit et le jour, où, un pic à 22h est inscrit avec des concentrations maximales et identiques aux pics du jour, ce qui est lié aux activités durant les soirées du mois de ramadan.

On observe enfin une grande différence entre le profil des jours ouvrables et du week-end. Les cycles journaliers ont très peu d'amplitude sur les sites de prélèvement et comme un cas particulier, l'Hôpital Mustapha présente des niveaux maximums la matinée plus forte que celle des jours ouvrables, où, ils atteignent des piques élevés de 10% que ceux des autres jours de la semaine dans une période restreinte (entre 7H et 10H), puis diminuent vers des valeurs minimales, ce qui peut être dû à l'arrivée des malades la matinée.

III.4.2. Variation hebdomadaire

Nous examinons dans ce paragraphe l'évolution des PMi au cours de la semaine.

La variabilité entre les jours de prélèvements est en général non significative. La seule variation plus ou moins importante remarquable est due à un jour exceptionnel qui est le vendredi atteignant une teneur extrêmement basse ($12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour MPtot). Cette particularité observée peut être expliquée par une diminution de la densité du trafic routier (jour de repos), donc durant un jour ouvré (jour non férié et hors week-end), la concentration en PMi est plus élevée que lors des jours non ouvrés caractérisés par une circulation de trafic réduite, où, les concentrations en PMi sont minimales, en raison de la baisse de la circulation automobile et d'autres activités anthropiques. La figure 56 illustre le cas de la station semi-urbaine de Bouzaréah, les évolutions des moyennes journalières des concentrations de PMi en mois d'avril y sont reportées.

En site urbain, la variabilité entre les jours de prélèvements est en général non significative. On ne voit pas l'effet du week-end avec diminution des émissions. En jour férié et week-end, bien que ce soit des jours de repos, les niveaux de PMi sont toujours au-dessus des exigences des normes internationales. Les concentrations en PMi sont parfois plus élevées que lors des jours ouvrés (figure 56), ce qui s'explique d'une part par le nombre de véhicules qui arrivent à l'hôpital de Mustapha Bacha, et d'autre part au fait que le site est situé au centre d'Alger à côté de la place du 1er Mai qui est un carrefour vers les autres lieux de la capitale.

Il reste toutefois que la période étudiée est trop courte pour pouvoir tirer des conclusions claires sur l'effet du week-end.

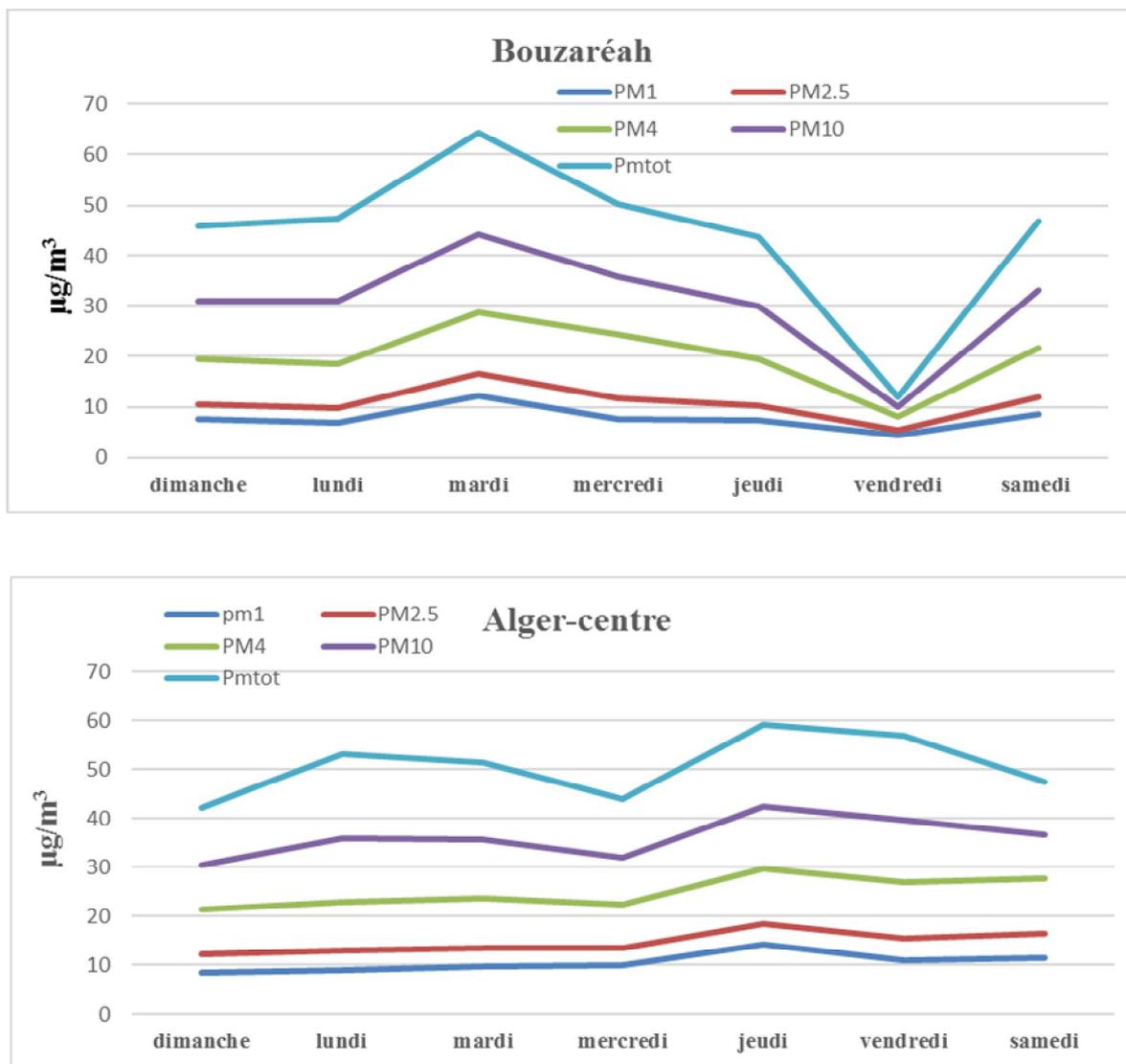


Figure 57. Variation hebdomadaire des concentrations des PMi dans les deux sites étudiés

III.4.3. Influence des facteurs météorologiques sur les teneurs des PMi

En analysant les résultats qui s'appuient sur les prélèvements journaliers des fractions PM1, PM2.5, PM4, PM10 et Pmtot à Bouzaréah et Alger Centre, nous remarquons qu'il y a une relation directe avec les conditions météorologiques, ce qui sera étudié ci-après.

Les suivis journaliers montrent plusieurs pics (Figure 57) de PM_i à Bouzaréah durant les jours suivants : 15, 18, 25 & 26 Avril 2017. La comparaison de ces jours de fortes teneurs en PM_i à ceux de faibles teneurs, permet de mettre à l'évidence l'influence des facteurs météorologiques (vitesse et direction du vent, précipitation, ...), et de l'activité humaine sur la concentration des particules dans l'air. En se basant sur les données météorologiques (température, vitesse des vents et précipitation) fournies par la station météo de notre appareil FIDAS200 et celle de l'Office National de Météorologie de Dar El Beida, nous constatons que certaines séquences de pollution en particules fines sont liées à l'évolution des paramètres météorologiques (Figure 57). On distingue à cet effet les

Conditions météorologiques qui caractérisent chaque site durant la période de prélèvement qui sont :

➤ **Site semi-urbain (Bouzaréah)**

- Une température moyenne (17,76 °C).
- Absence de précipitation durant les journées de prélèvement.
- Des vitesses de vent qui varient entre 7 et 19 m/s.
- Humidité moyenne de 64%.

Les concentrations élevées de particules fines peuvent être causées par la pollution atmosphérique transfrontalière venant de l'étranger. L'apport se fait principalement par les secteurs nord (N) et sud (S) de notre pays. Les vents du nord amènent des masses d'air humide à travers la Méditerranée et par conséquent ces masses d'air peuvent charger l'atmosphère en particules maritimes riches en sels et en carbone suie. Alors que les vents Sud sont des vents secs et chauds provenant du sud du pays ou des pays Africains voisins chargeant l'atmosphère en poussières provenant du Sahara et des activités pétrolières, ce qui donc renforce plutôt la composante terrigène. Le Sahara est en effet le plus grand pourvoyeur de poussières minérales pour l'atmosphère qui atteignent les pays Européens.

Donc, du fait de leurs multiples origines, les niveaux de particules peuvent varier très fortement d'un jour à l'autre en fonction de l'origine des masses d'air. A titre d'exemple la Figure 57 montre l'origine des masses d'air arrivées à Bouzaréah.

Le 15 avril est caractérisé par un régime de vents de secteur Ouest à Ouest/Nord-Ouest, avec l'arrivée de masses d'air maritimes polaires ayant recirculé sur l'Europe de Sud, entraînant des niveaux soutenus de particule.

Le deuxième pique de particules s'est produit durant la troisième semaine du même mois. Le 18 avril, il y a eu un changement de secteur de vents qui intervient, avec un passage au nord-ouest et Nord/Nord-Est et une arrivée de masses maritimes polaire en passant par l'Espagne et la France provoquant une augmentation brutale des niveaux en particules.

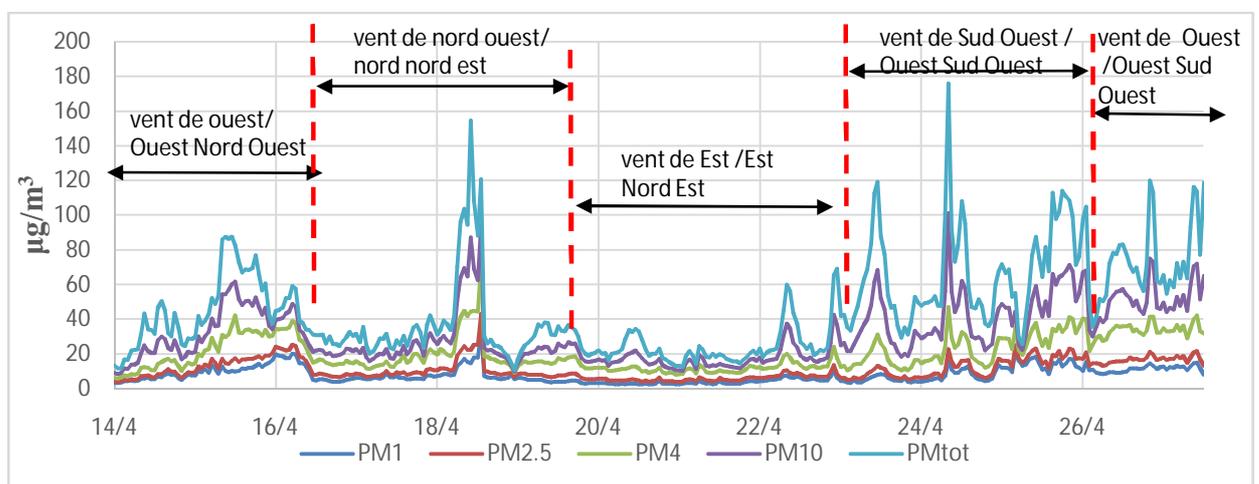
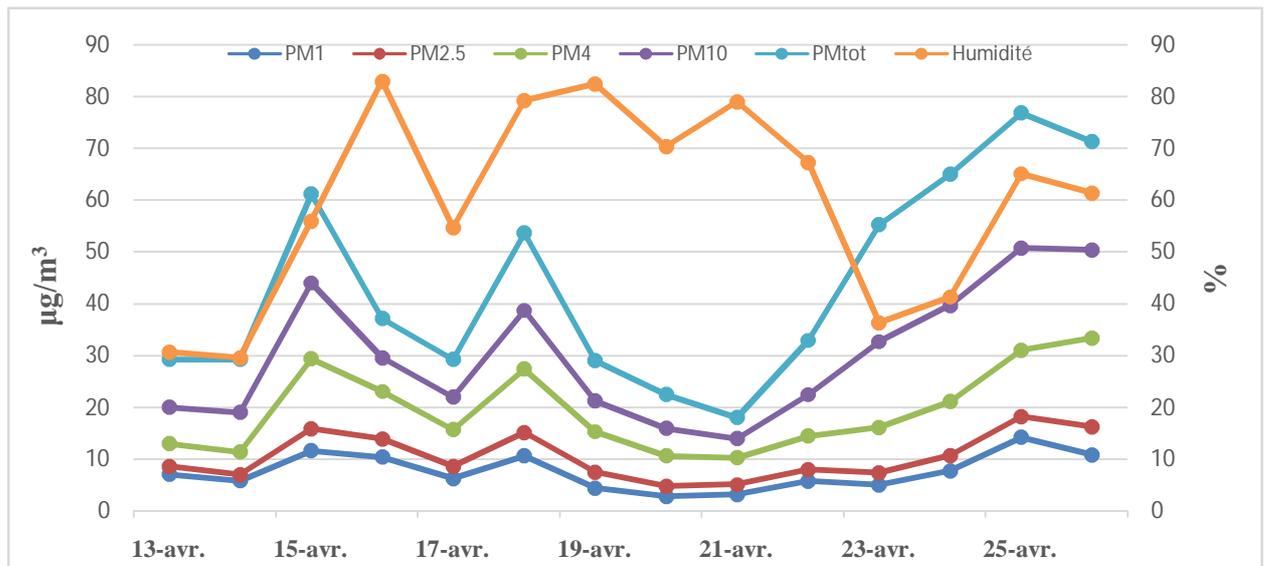
Un changement de secteur de vent intervient à partir du 19 avril, avec un passage Est /Est à Nord-Est et une arrivée de masses d'air maritimes et continentales, provoquant une chute brutale des niveaux en particules. Il est à noter que les conditions dispersives étaient globalement comparables (temps nuageux avec vent faible à modéré) et que cette baisse des niveaux s'est produite sans aucune précipitation, et ne résulte donc que du changement de l'origine de la masse d'air.

Le troisième épisode de particules s'est produit durant la dernière semaine d'avril. Le 25 et 26, où, les concentrations de particules fines ont augmenté à environ $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette augmentation a été causée par l'arrivée d'air Maritime tropicale polluée en provenance du Maroc à une altitude de 1500 m en traversant l'ouest de l'Algérie, et d'autres masses d'air Tropicales continentales à une altitude de 100 et 150 m provenant du sud de notre pays (Wilaya de Ouargla vue la période des vents de sable). Ceci peut être expliqué par la variation des principaux facteurs météorologiques qui sont la vitesse et la direction du vent, l'humidité et la température et les brises marines qui assurent une augmentation des concentrations en éléments marins et particules solides et aussi aux activités humaines qui en sont la cause de ces particules. Les concentrations moyennes journalières de PM1, PM2.5, PM4, PM10 et PMtot s'élèvent respectivement à des valeurs maximales suivantes 14.16, 18.12, 34.64, 54.15 et $79.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Bouzaréah pour toute la campagne de mesure. Cette hausse est relative à la variation de la température et l'humidité qui sont inversement liées (si l'une augmente l'autre diminue), et donc, à ces dates la température a été élevée et l'humidité a été faible ce qui a empêché l'absorption des particules en suspensions.

C'est ainsi que les fortes concentrations en particules coïncident le plus souvent avec les faibles vitesses de vent, où, la dispersion étant minimale.

Les teneurs diminuent quand la vitesse du vent augmente (meilleure dispersion des particules atmosphériques). Ceci explique en partie les faibles teneurs mesurées du 19 et 22 Avril, où des vents forts balayaient la région. Par contre à la plus faible vitesse de vent, un pic de pollution a été enregistré le 25 Avril ($PM_{tot}=180\mu g/m^3$).

Cette évolution illustre la complexité du phénomène lié à plusieurs facteurs en même temps.



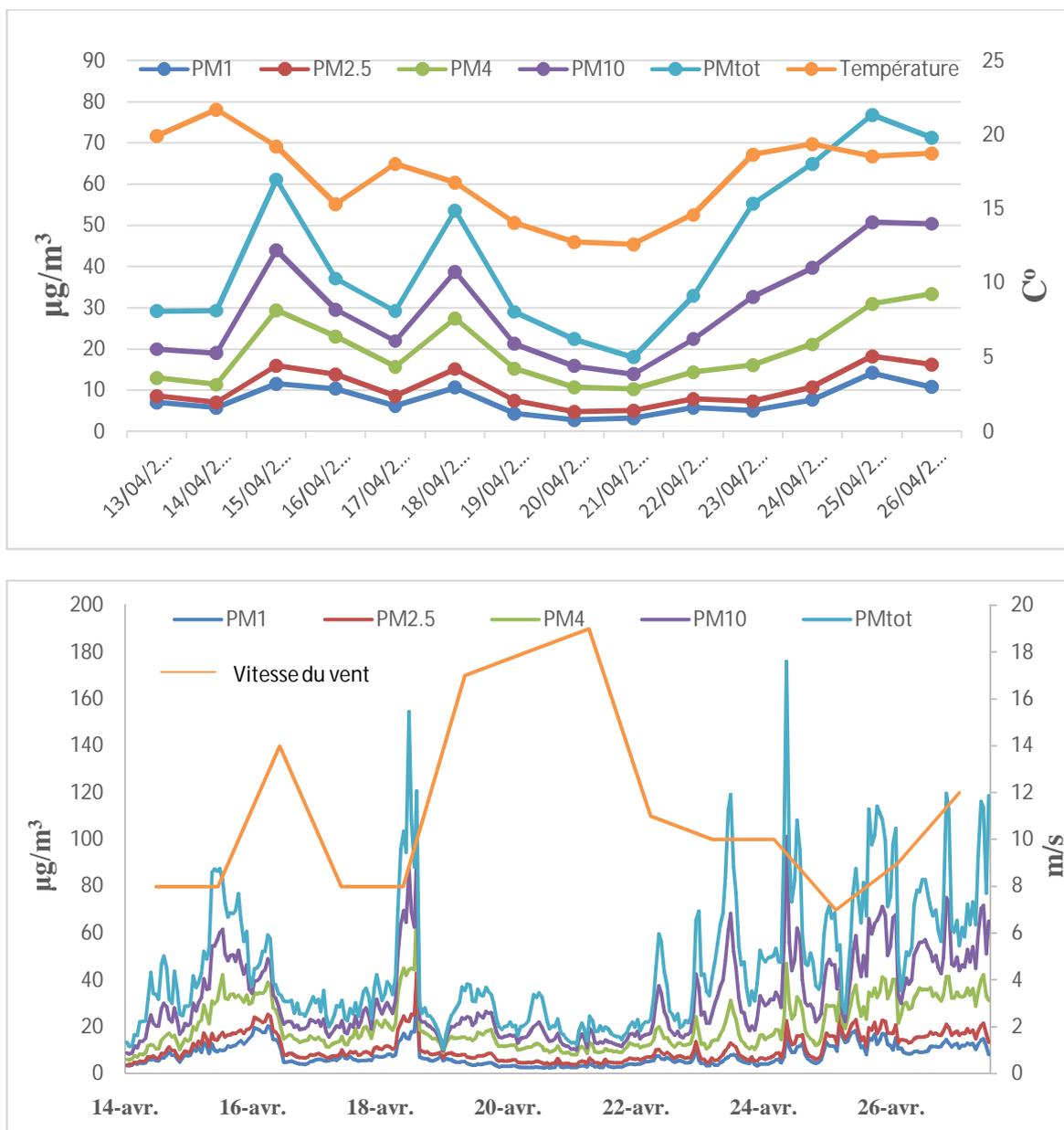


Figure 58. Variation de la pollution particulaire à Bouzaréah en fonction des conditions météorologiques

➤ **Site urbain (Alger centre)**

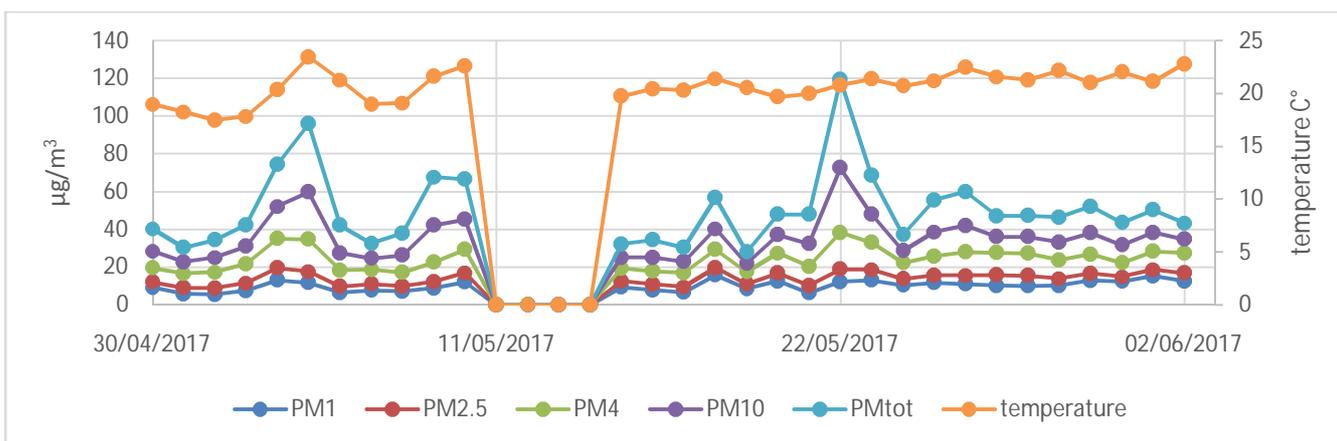
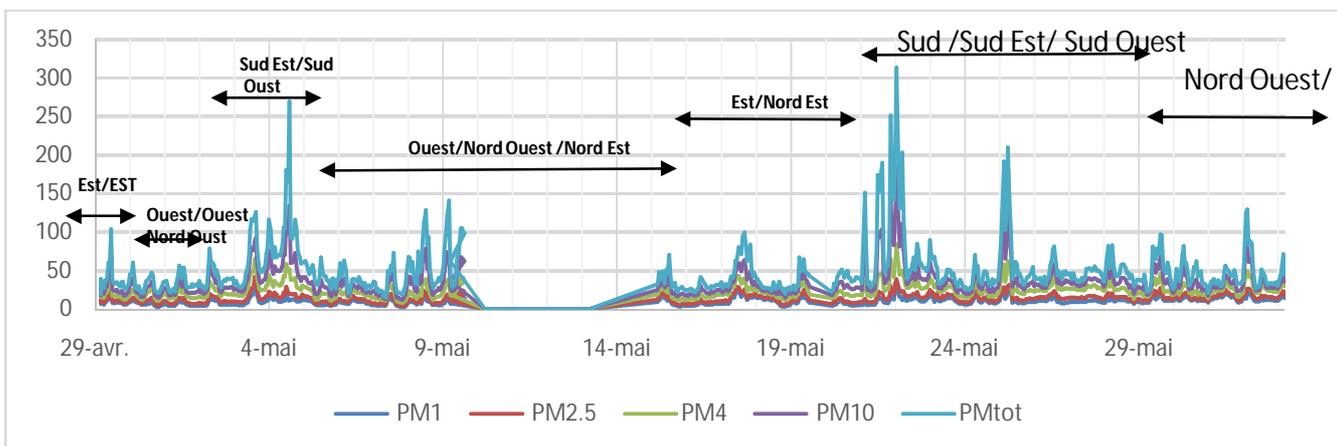
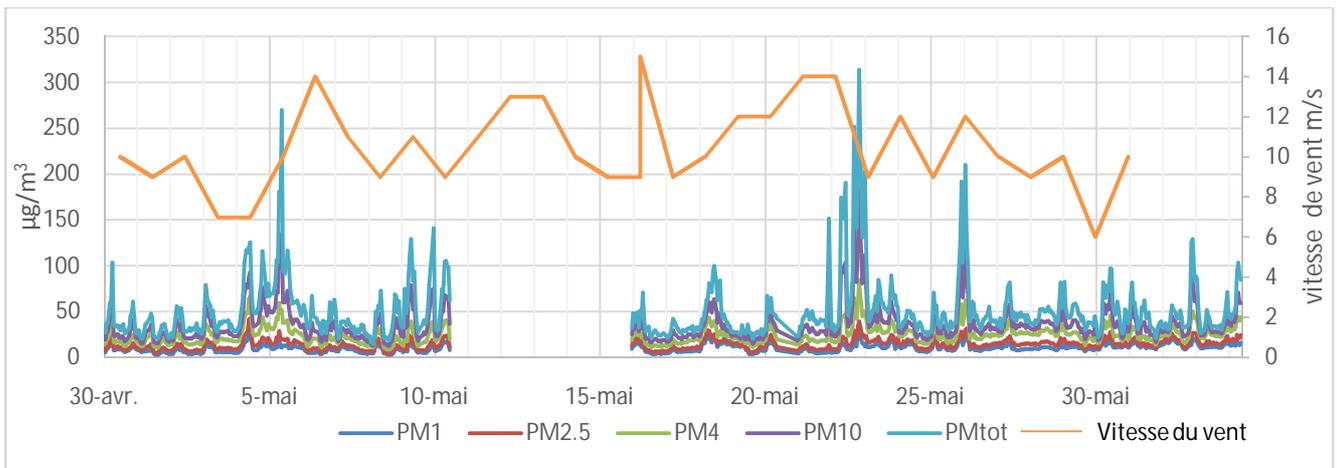
- Une température moyenne relativement (20 °C).
- Absence de précipitation durant les journées de prélèvement à l'exception des journées de 27 et 30 mai et quelques jours de juin.
- Des vitesses de vent qui varient entre 6 et 15 m/s.
- Humidité moyenne de 72 %.

Cette situation génère des niveaux de pollution relativement élevés par les PM_{tot} et PM₁₀, soit une moyenne quotidienne de 43 et 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement.

Cette pollution particulièrement forte malgré les vitesses de vent moyennement élevées qui peuvent favoriser la dispersion des particules, ce qui être dû à l'absence de précipitation, qui assurent un phénomène de lessivage de l'atmosphère et aux températures assez élevées qui favorisent la formation photochimique de particules secondaires entraînant cette pollution.

Lors de la période de mesure à l'hôpital de Mustapha Bacha, la pollution atmosphérique par les particules enregistrées était plus élevée comparée à la zone semi-urbaine de Bouzaréah. Les suivis journaliers dans ce site montrent plusieurs pics (Figure 58) de concentration en mois de Mai, en termes de pollution totale. Le 22 Mai a été une journée extrêmement polluée (PM_{tot} atteignent 310 à 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Ce jour coïncide avec la manifestation des retraitées de l'Armée Nationale Populaire qui a causé des embouteillages énormes au niveau de la Wilaya d'Alger. D'autres pics ont été marqués le 5 Mai avec des masses d'air tropicales continentales traversant le Sud-Est et Sud-Ouest de l'Algérie, ce qui nous laisse supposer que la source probable est les champs des hydrocarbures Au Sud-Est et les sables au sud-ouest.

En général, dans le reste du mois, la pollution des particules varie en moyenne entre 14 et 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{2.5} et entre 25 à 60 jusqu'à 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM₁₀. On remarque que sur la dernière semaine de mai correspondant à la 1^{ère} semaine du mois de ramadhan une diminution importante de la pollution atmosphérique par rapport à ce qui était auparavant. Cette diminution est due à un ralentissement des activités humaines durant ce mois et au changement de rythmes de vie des citoyens. La circulation est fluide et il y n'y a plus de congestions à Alger-centre.



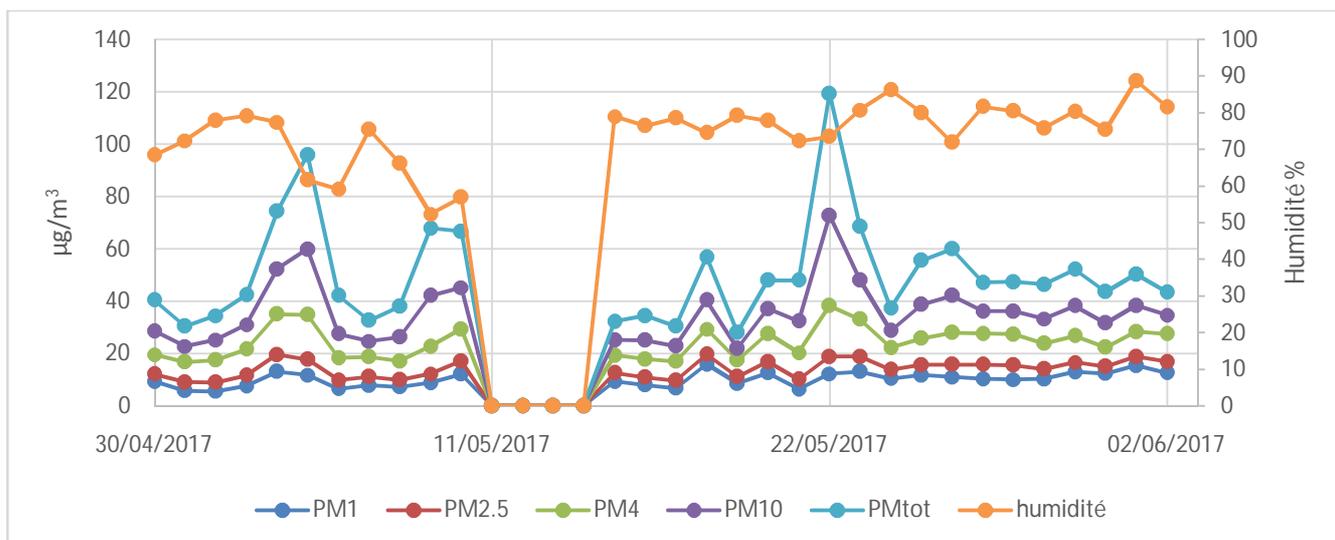


Figure 59. Variation de la pollution particulaire à Mustapha Bacha en fonction des conditions météorologiques

III.4.4. Corrélation entre les teneurs massiques des différentes classes des particules

Afin de mieux comprendre l'évolution des classes granulométriques ciblées par l'étude, et pour permettre de distinguer les différentes sources et mécanismes de formation, il est utile d'étudier les corrélations entre les différentes classes granulométriques. Une bonne corrélation signifie qu'on est probablement en présence de la même source émettrice. Les tableaux suivants présentent la corrélation entre chaque deux classes granulométriques obtenues à partir des 42 et 43.

Tableau 4. Coefficients de corrélations liant les différentes classes granulométriques à Bouzaréah

	<i>PM1</i>	<i>PM2.5</i>	<i>PM4</i>	<i>PM10</i>	<i>PMTOT</i>
PM1	1				
PM2.5	0.98244592	1			
PM4	0.89940477	0.96240999	1		
PM10	0.79310083	0.8640732	0.94456435	1	
PMTOT	0.69240293	0.76257979	0.85966645	0.97838873	1

Tableau 5. Coefficients de corrélations liant les différentes classes granulométriques à Alger-Centre

	<i>PM1</i>	<i>PM2.5</i>	<i>PM4</i>	<i>PM10</i>	<i>PMTOT</i>
PM1	1				
PM2.5	0.9717056	1			
PM4	0.84856628	0.94381644	1		
PM10	0.69304928	0.80841963	0.94100729	1	
PMTOT	0.59636438	0.7164108	0.87638272	0.98575897	1

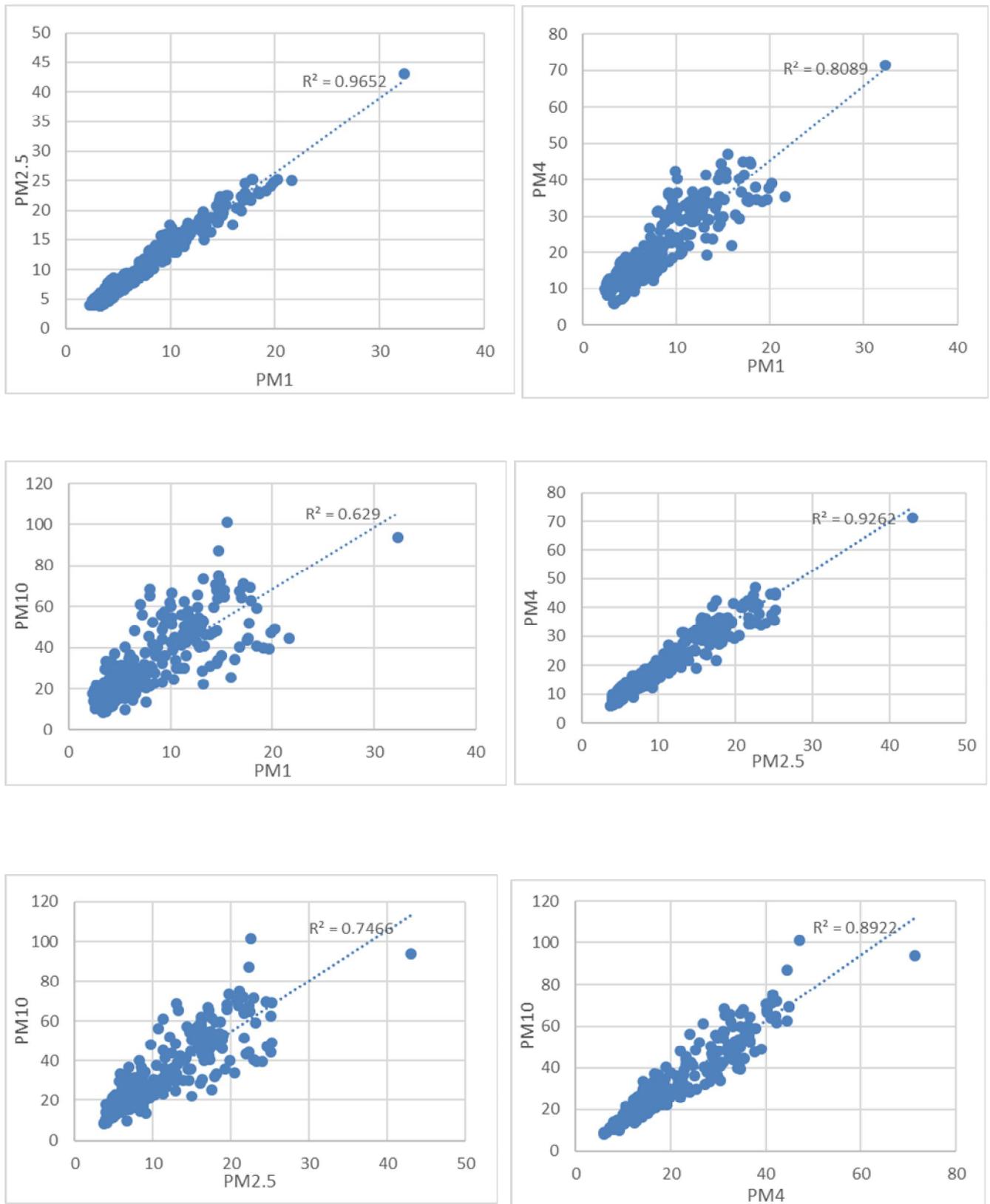


Figure 60. Corrélation entre les PMi à Bouzaréah

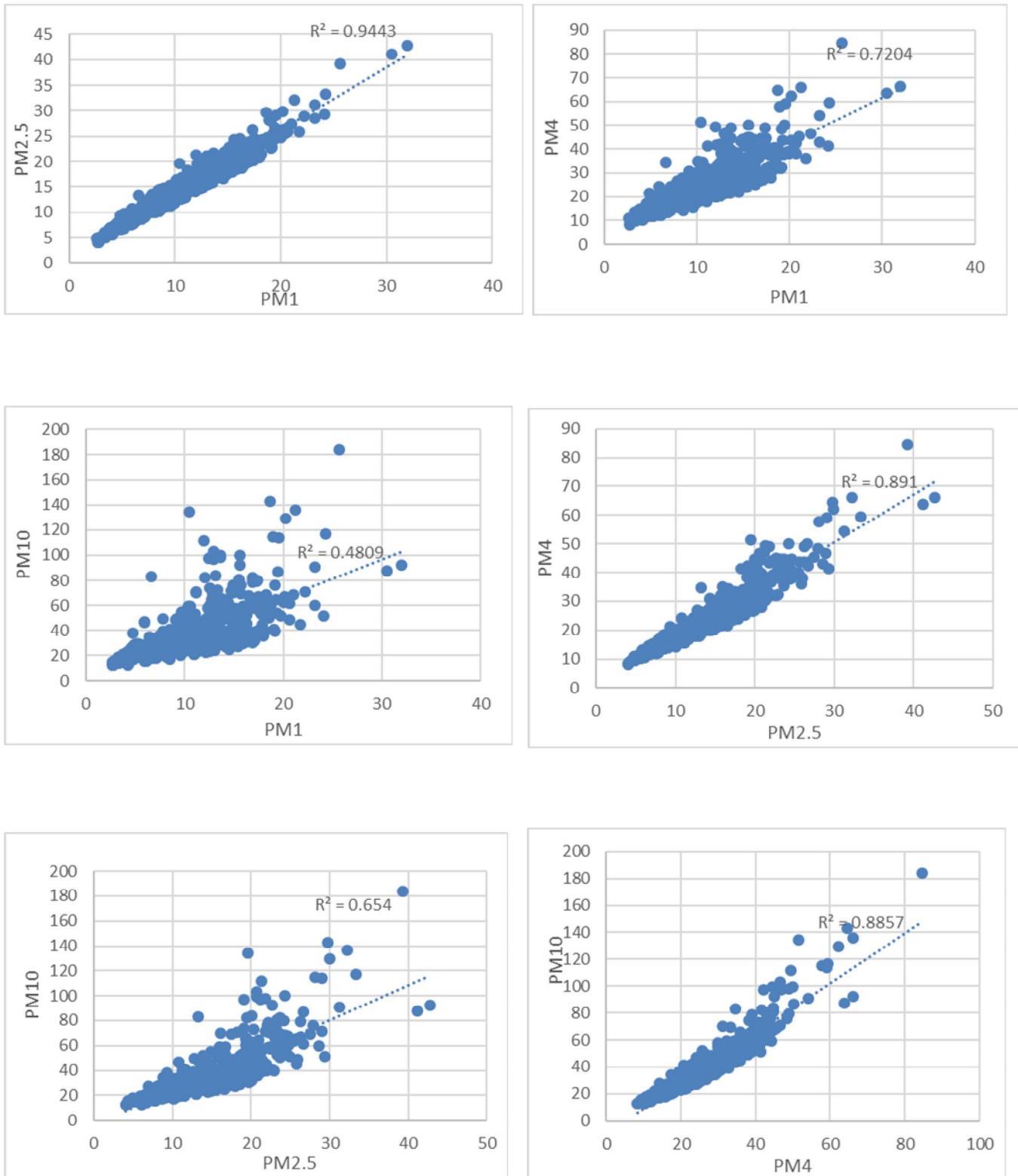


Figure 61. Corrélation entre les PMi à Alger-centre

Les deux espèces PM2.5 et PM1 sont parfaitement corrélées ($r = 0,98$) et associées ($R^2 = 0,9651$), ce qui indique une relation très forte. On peut ainsi considérer que près de 70% des PM2.5 sont constituées de PM1. Un tel résultat peut être expliqué par le fait que ces particules fines ont les mêmes sources de pollution qui sont en générale les particules secondaires ou bien les sources de combustion comme le trafic routier.

Si l'association des espèces PM2.5 et PM1 est évidente pour les particules fines, comme vu ci-dessus, celle des PM10 et PM1 d'une part et PM2.5 d'autre part, est moindre ($r^2 = 0.62$, $r^2=0.74$) (fig.61 et 62) respectivement. Pour cause, on introduit dans la comparaison la fraction grossière dont les niveaux sont en grande partie dus généralement à des origines différentes que pour la fraction fine.

Dans le cas du site urbain, avec des facteurs de corrélations avoisinant 0,97 pour PM1/PM2.5, où, nous constatons que l'évolution des teneurs en PM1 est également étroitement liée à l'évolution des teneurs en PM2.5. Concernant la corrélation PM10/PM1, les résultats indiquent un facteur de corrélation faible de 0,69 et associée avec un facteur ($R^2 = 0,48$). Ce qui confirme la formation des PM10 est influencé par des sources de pollution autres que celles des particules fines et ultrafines.

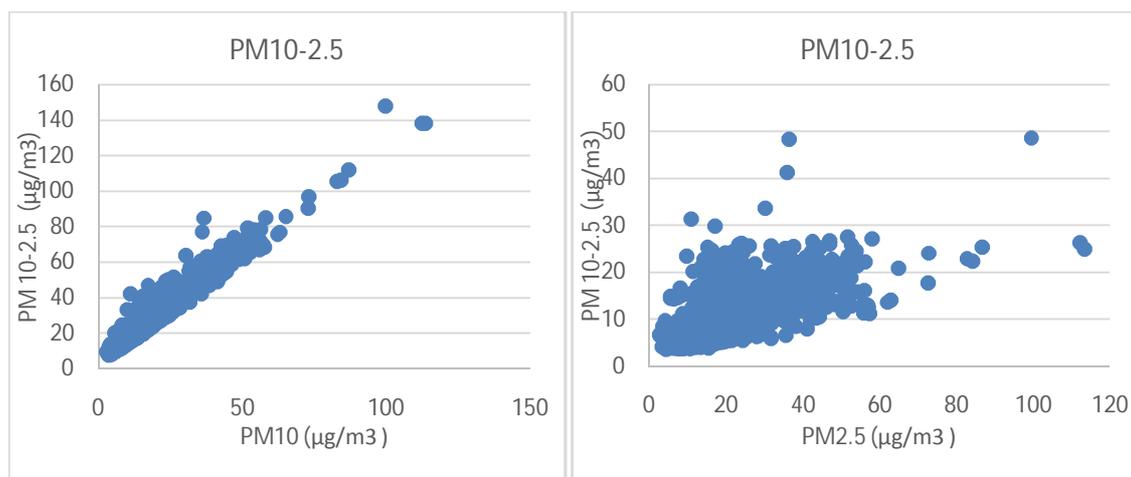


Figure 62. Corrélation entre les PMi à Bouzaréah

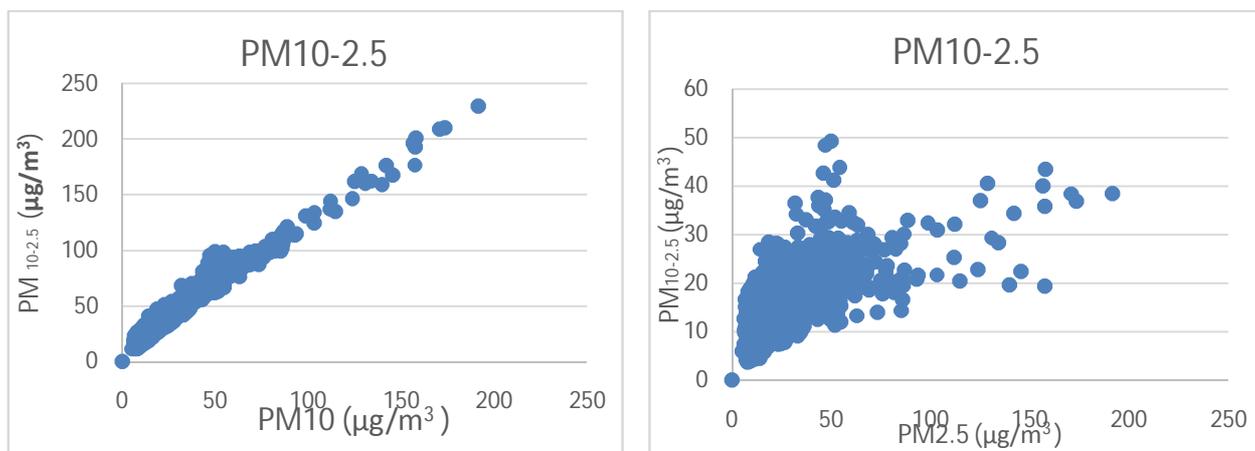


Figure 63 Corrélation entre les PMi à Alger centre

De cela on remarque que l'on obtient une bonne corrélation avec les PM10 lorsqu'on les compare avec les particules grossières alors que c'est le cas contraire pour les PM2.5 ce qui renforce notre hypothèse de la différences des sources des particules fines et les particules grossières.

III.4.5. Evènement journalier

❖ Le 1^{er} Mai

Les teneurs en PMi durant la journée des travailleurs sont très faibles comparativement aux autres journées de mesures. Ces résultats ont été obtenus à Alger-centre, où, il y a beaucoup plus de mouvement qu'ailleurs et malgré cela, les variations des particules totales atteignent un maximum de 48 µg/m³ le matin vers 10 h, ce qui est expliqué par le fait que ce jour férié peut affecter les activités humaines, d'où, les niveaux de pollution atmosphérique.

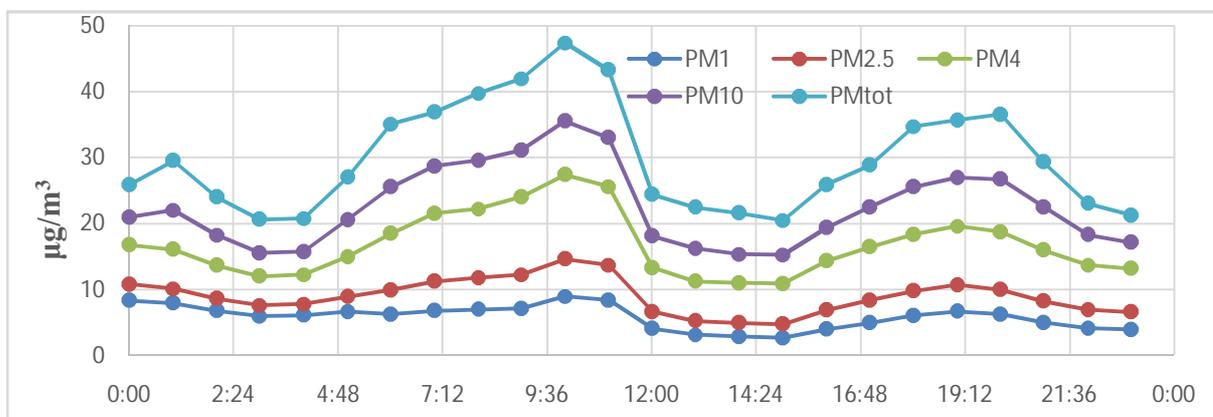


Figure 64. Evolution des niveaux de PMi durant le jour du 1er Mai 2017

❖ Le 4 Mai (journée des élections législatives)

Un évènement important dans tout le territoire national a toujours besoin d'une bonne organisation par l'état, pour assurer son bon déroulement, c'est le cas des élections législatives.

A cette occasion, Nous avons profité d'étudier l'effet d'un tel évènement sur les teneurs atmosphériques. Et comme nous l'avons prédit, nous avons enregistré des résultats élevés le matin ce qui peut être la conséquence du trafic routier résultant de l'organisation du jour du vote à l'échelle nationale (Figure 64), avec des pics obtenus au début du vote entre 7 H et 10 H de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM1 et à la fin du vote entre 18 H et 20 H avec $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10.

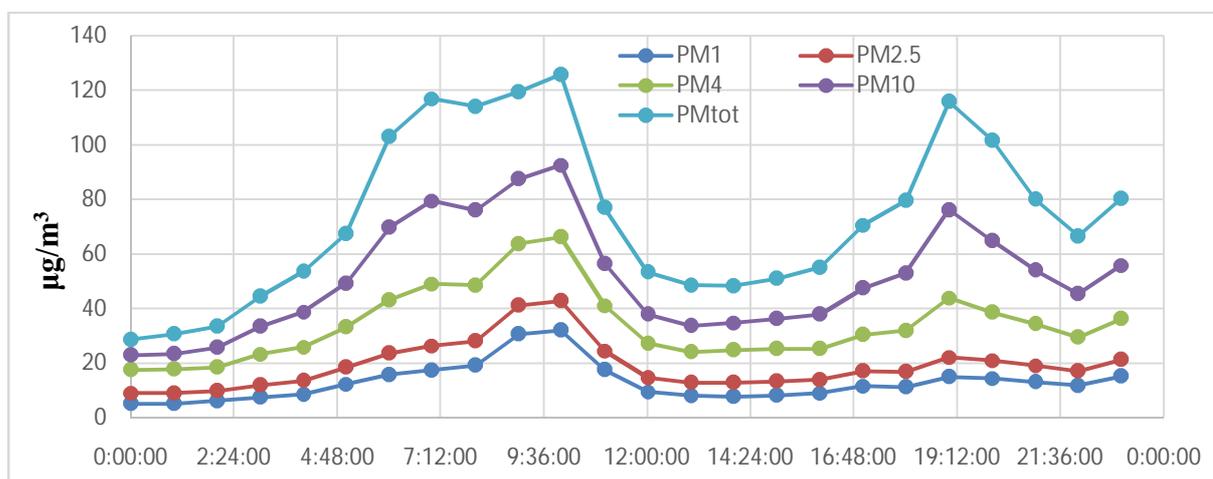


Figure 65. Evolution des niveaux de PMi durant le jour de vote

❖ Le 21 Mai (Manifestation)

Au cours du mois passé, une manifestation a été tenue dans la Wilaya d'Alger, cela a pu affecter la pollution atmosphérique dans la commune d'Alger-centre, plus que l'on pensait (Figure 65). Cette manifestation a causé à l'entrée de la route d'Alger (côté Est) un embouteillage immense qui entrainer une rareté de véhicules à Alger-centre, où on a remarqué une diminution de 20 à 40% des teneurs en pollution.

Cet effet a été remarqué dans les teneurs de PMi enregistrée telles que les PM10 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et PM2.5 (ne dépassent pas les $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Ces teneurs se tiennent sur toute la journée jusqu'à 22 h ou on enregistre une teneur de $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 qui s'explique par l'ouverture des routes et le retour de la circulation.

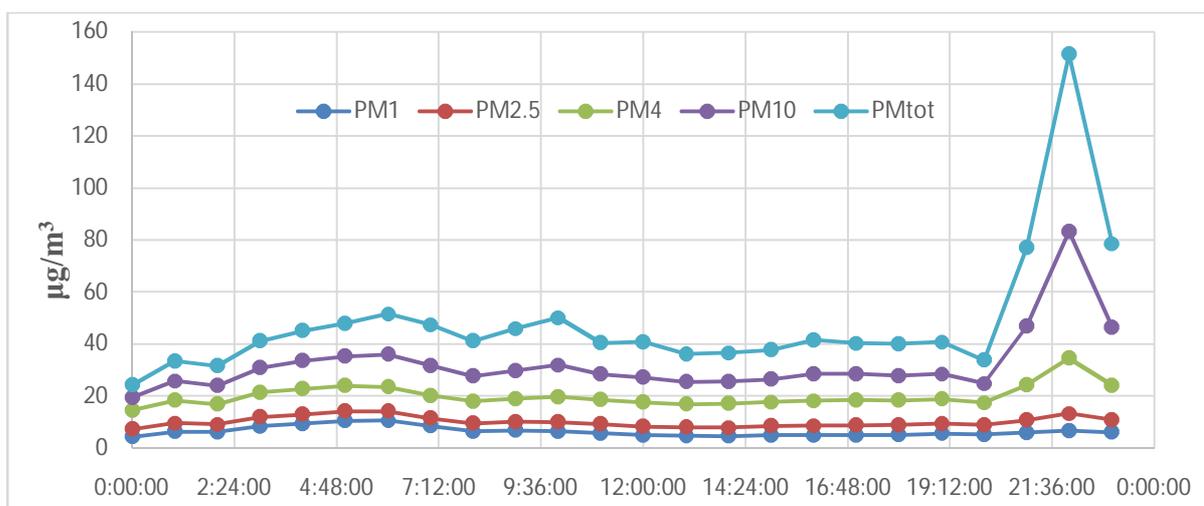


Figure 66. Evolution des niveaux de PMi durant la journée de manifestation

❖ Le 26 Mai (Journée sans véhicule)

Alger la blanche s'est donc transformée le temps d'une journée en un grand espace où l'Algérois a pu prendre une bouffée d'air frais loin de la pollution et du tracass quotidien. L'initiative d'Alger sans voiture a pu dessiner un sourire sur les visages des personnes présentes sur les lieux.

L'impact positif de ce petit évènement s'est traduit par les résultats obtenus des mesures des PMi qui ont montré une diminution remarquable, avec des valeurs au-dessous des normes de l'OMS, avec une diminution de teneurs de 20 allant jusqu'à 50% dans la journée, pour les PM10 ($< 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et les PM2.5 (autour de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Cette initiative qui n'est pas la première à Alger contribue beaucoup à la réduction des teneurs de pollutions à Alger (Figure 66).

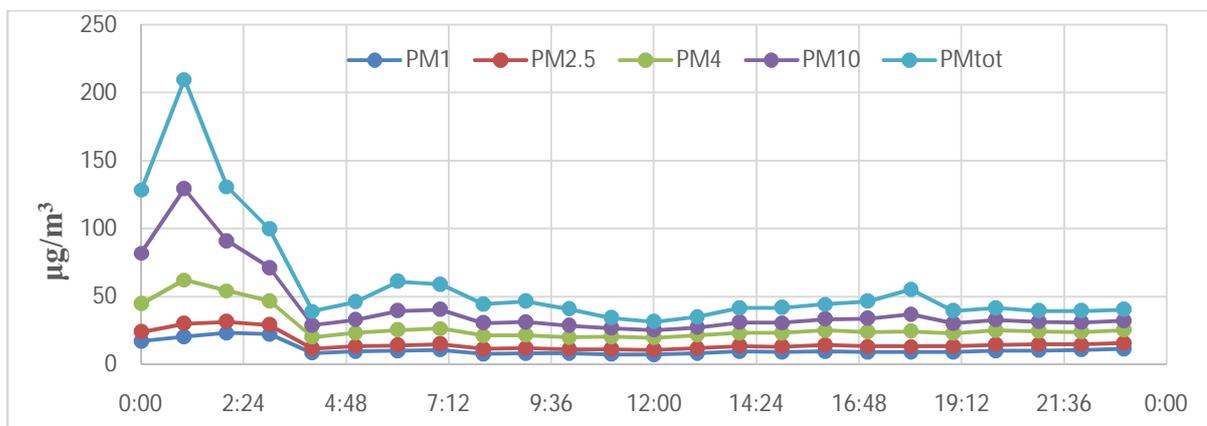


Figure 67. Evolution des niveaux de PMi durant la journée sans véhicules à Alger-centre

❖ Du 27 au 2 Juin (jours de Ramadhan)

Ramadhan est un mois spécial pour les algériens, en effet durant cette période de 30 jours le rythme des activités humaines change sensiblement. Le cycle journalier présente une faible amplitude, les valeurs atteignent des pics élevés un peu tard en matinée de 10 H jusqu'à midi, suivis d'un abaissement des teneurs et une remontée plus marquée en soirée de 21 H jusqu'à 23 h en raison des déplacements nocturnes des veillées traditionnelles.

Nous avons observé une grande différence entre le profil des jours ouvrables et du week-end. Les cycles journaliers présentent de faibles teneurs le matin et des niveaux maximums en soirée ($24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM 2.5 et $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10) (figure 67).

On note également les faibles teneurs enregistrées entre 19 h et 20 h (jusqu'à $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10) correspondant à la période de l'Iftar où il n'y a pratiquement aucune activité humaine (figure 68).

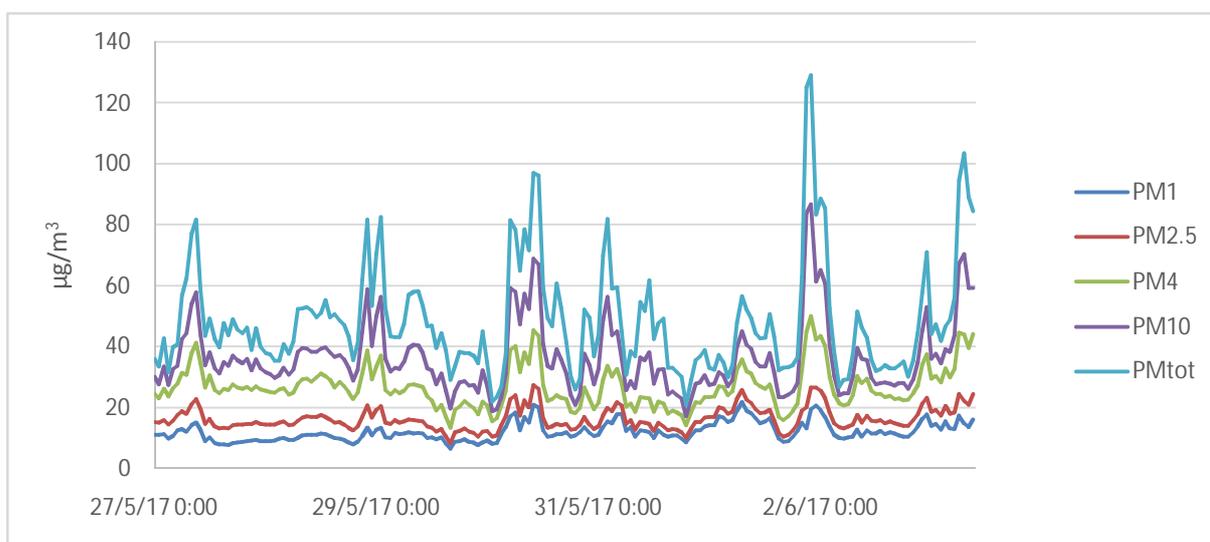


Figure 68. Evolution des niveaux de PMi durant les jours de Ramadhan à Alger-centre

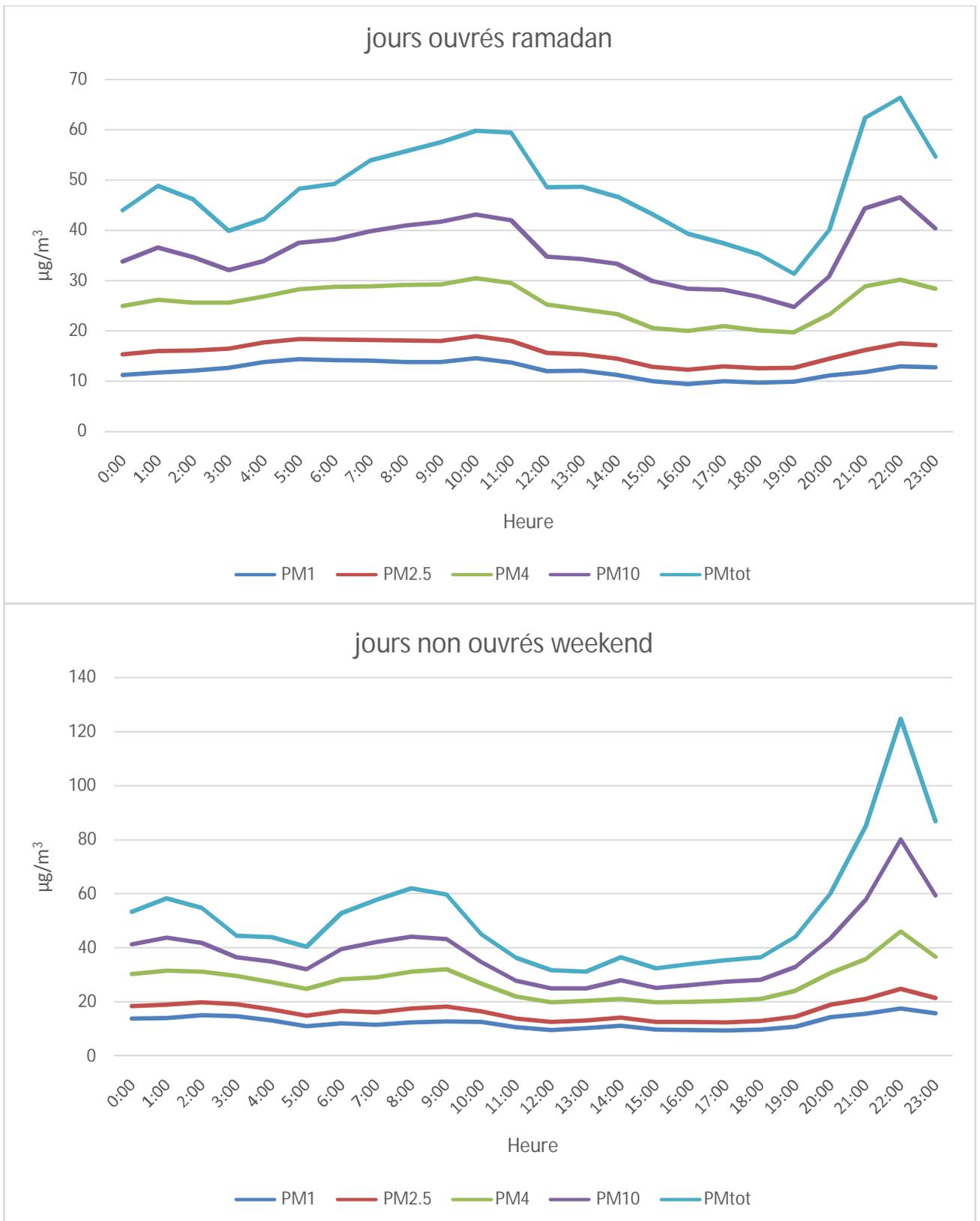


Figure 69. Suivie journalier ramadan

❖ Le 27 et 30 Mai (journées pluviales)

La pluie peut aussi contribuer à réduire les concentrations des particules dans l'air, d'une part par le lavage de l'atmosphère, mais également par le lavage et la fixation des sols en diminuant la remise en suspension des particules. Dans les jours où il y a eu des pluies fortes comme le 27 et le 30 Mai, nous avons enregistré une faible teneur de particules, au-dessous des $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et ne dépassent pas les $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM1. Ces particules sont absorbées par les gouttelettes d'eau et rejoignent les réseaux d'eau.

A la fin de l'averse, on remarque une remontée des variations des PMi vers les 90 jusqu'à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PMtot d'où l'augmentation de la pollution atmosphérique par les particules.

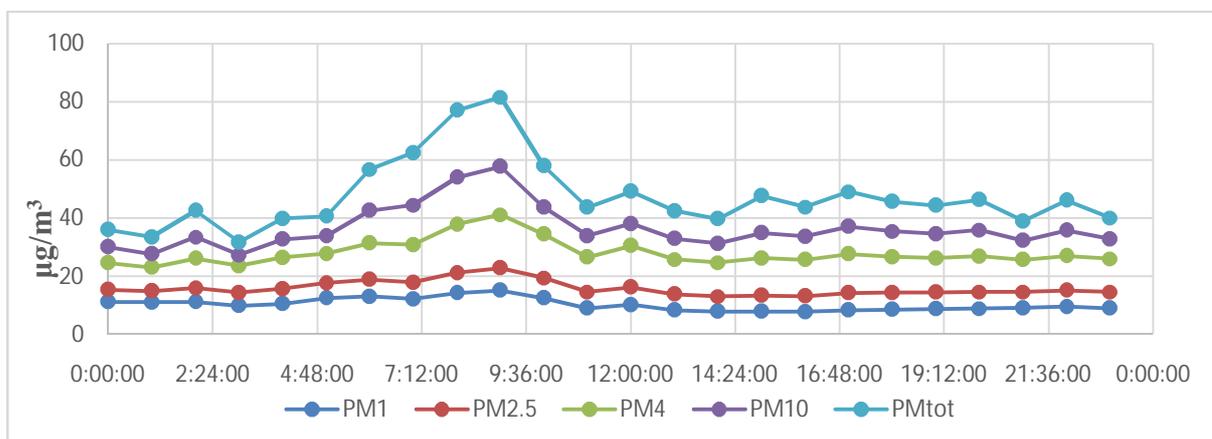


Figure 70. Evolution des niveaux de PMi durant une journée pluvieuse (27 Mai)

III.4.6. Occurrences des épisodes de pollution

La Figure 76 présente l'évolution des concentrations en PM10 et PM2.5 mesurées dans les deux sites étudiés. Par anticipation de l'évolution de la réglementation en cas d'épisode de pollution, les seuils de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (seuil d'information et de recommandation) et de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (seuil d'alerte) sont représentés.

Il est à noter qu'aucun épisode très intense n'a eu lieu pendant la campagne de mesure.

Toutefois, cinq épisodes particuliers ressortent spécifiquement le 27 Avril en site semi-urbain et les 5 et 22 Mai au niveau du site urbain :

Le 27 Avril correspond à des épisodes de masses d'air maritimes polaires caractérisées par des vents de l'Ouest et Ouest/Sud-Ouest avec seulement 7.6 % des dépassements de la norme des PM10 et un dépassement de 40% en ce qui concerne l'objectif de qualité et aucun dépassement de valeur limite des PM2.5 en site semi-urbain.

Le 5 Mai correspond à des masses d'air continentales tropicales caractérisées par des vents Sud-Est/Sud-Ouest où un dépassement de 21% de la norme des PM10 et 80% de l'objectif de qualité des PM2.5

Le 22 Mai correspond à des masses d'air continentales tropicales et maritimes polaires caractérisées par des vents Sud-Est/Sud-Ouest et Nord avec un dépassement de 40% de la norme des PM10 et 80% de l'objectif de qualité des PM2.5.

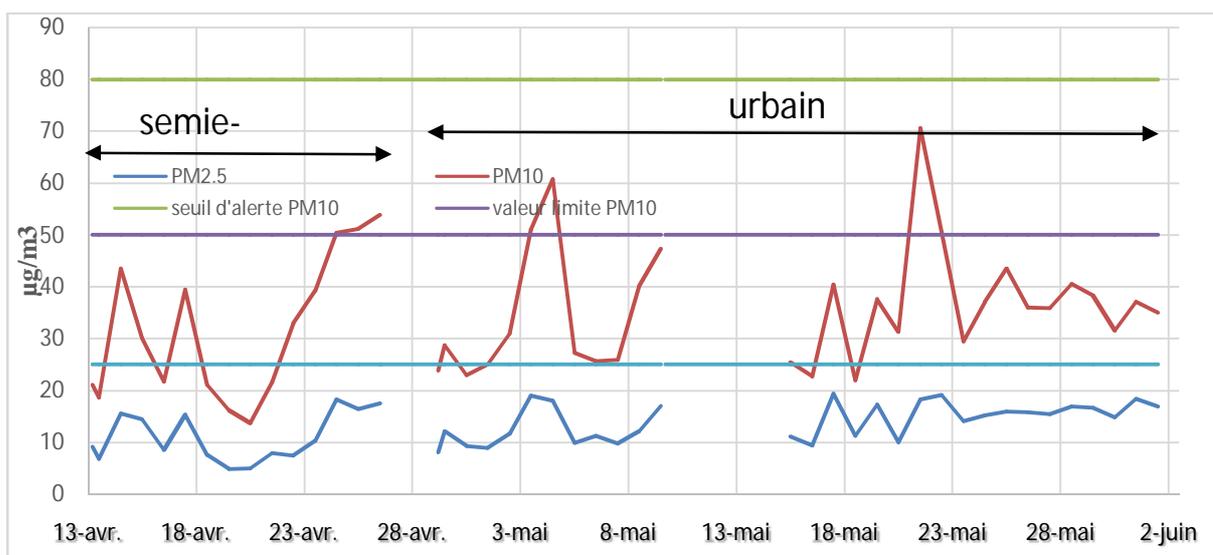


Figure 71. Comparaison des niveaux de pollution de l'air dans les deux sites avec les normes recommandées

Les périodes sous régime de vent de secteur Est–Est/Nord-Est et Nord/Nord-Est sont caractérisées par des niveaux homogènes de particules en dessous du seuil des $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Si durant 45 prélèvements on a trois dépassement de la norme journalière de l’OMS (50 moyenne sur 24h à ne pas dépasser plus de 35 jours sur l’année), ce fait nous permet de prédire un dépassement durant toute l’année si le suivi continue.

Tables de HYSPLIT

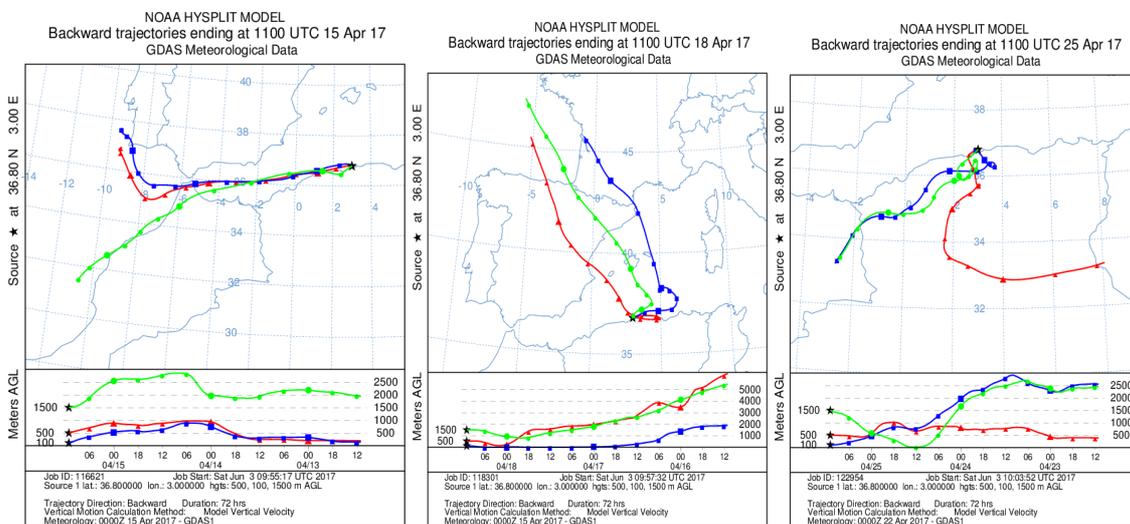


Figure 72. Cartes des rétro trajectoires des masses d’air aux jours de pics enregistrés à Bouzaréah [35]

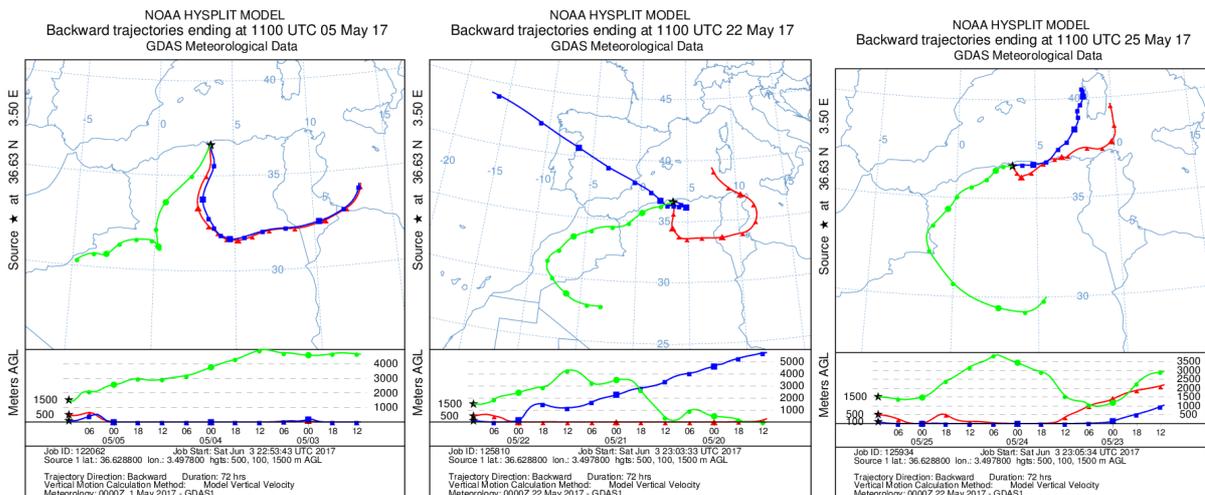


Figure 73. Cartes des rétro trajectoires des masses d’air aux jours de pics enregistrés à Alger-centre [35]

III.4.7. Comparaison entre les deux sites

Le site semi-urbain de Bouzaréah est caractérisé par la présence d'arbres (forêt de Bainem à l'ouest), le trafic et les activités humaines sont d'une densité faible par rapport à Alger-centre qui est une zone urbaine. Au centre-ville d'Alger, le trafic routier est très élevé, la route à proximité est toujours en embouteillage le matin, tandis qu'à Bouzaréah le seul trafic que l'on peut remarquer est dans la route N11 qui mène vers l'ouest. La figure 73 présente une comparaison des teneurs moyennes des PMi entre les deux sites. La moyenne des teneurs enregistrées à Bouzaréah s'élève à $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 alors qu'elle est un peu plus élevée à Alger-centre. Si on compare cependant les valeurs minimales et maximales des deux sites, on trouvera une très grande différence qui est liée directement aux caractéristiques de chaque site. Pour les valeurs maximales d'Alger-centre, on est à $183 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10, soit 80% plus élevées que celles de Bouzaréah ($101 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

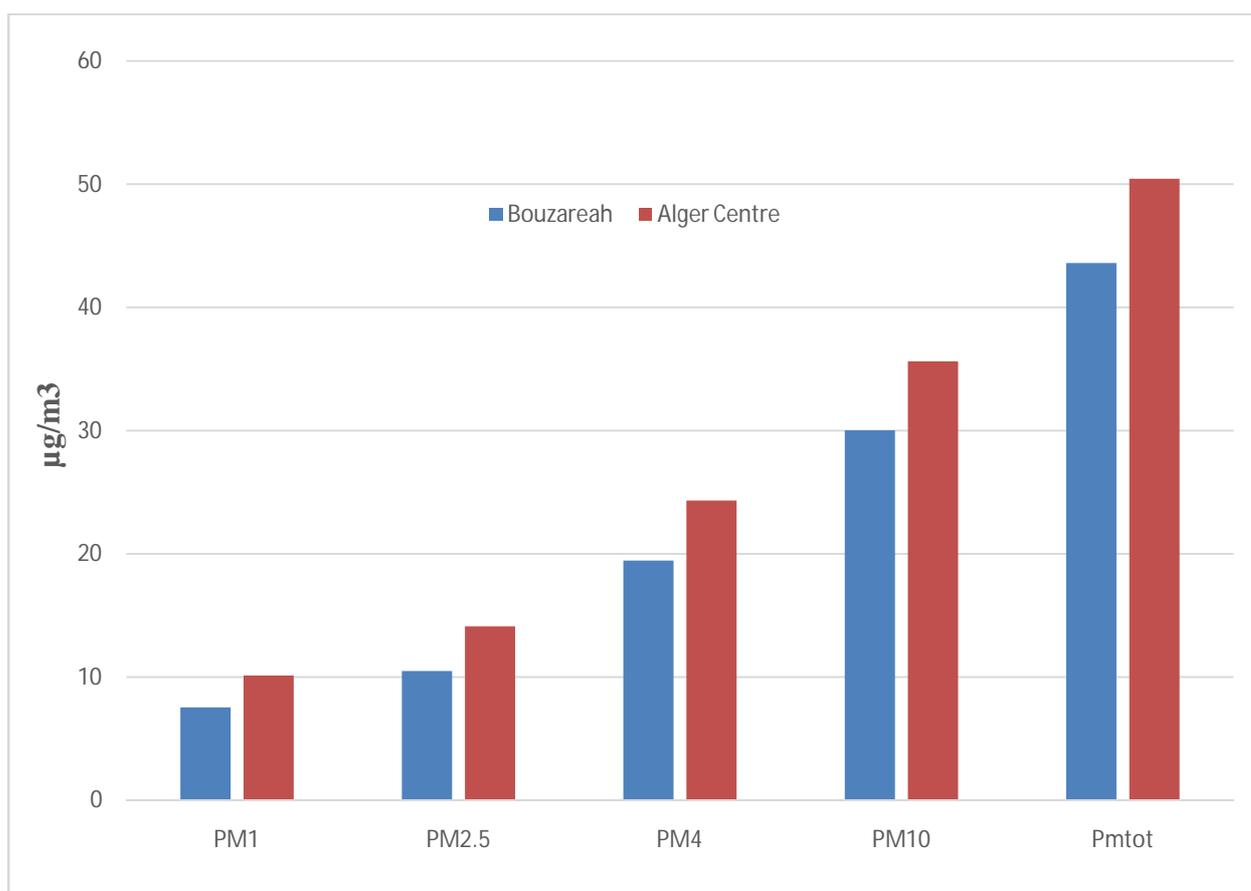


Figure 74. Comparaison des moyennes de PMi dans les deux sites étudiés

III.4.8. Comparaison avec les teneurs de PMi mesurées à Alger dans des études précédentes

L'examen de l'ensemble des études effectuées au cours des années passées aussi bien par Samasafia que par les travaux de magisters de l'ENP fait ressortir les conclusions suivantes :

Les teneurs mesurées au cours de ce travail en site semi-urbain à Bouzaréah sont comparables à celles mesurées sur une période de plus d'une année en site rural loin des émissions anthropiques dans la wilaya de Tipaza [30].

Il est fort possible que sur une longue période, le site de Bouzaréah aurait donné des teneurs plus élevées que celles que nous avons enregistrées dans cette étude.

1. Le niveau des PM10 de l'ordre de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est probablement le niveau moyen minimum qui prévaut en Algérie dans des sites en dehors des grandes agglomérations. Ce niveau peut être considéré comme étant celui provenant uniquement des émissions naturelles.

Pour le site urbain d'Alger, il nous semble que les teneurs que nous avons mesurées sont sous-estimées. Toutes les études effectuées à ce jour en divers sites de type milieu urbain à Alger ont donné un niveau moyen de l'ordre de 60 à $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les [29],[31]. Dans notre étude le niveau moyen de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mesuré à Alger n'est probablement pas représentatif de la situation réelle qui prévaut dans de pareils sites.

Les raisons de cette discordance peuvent être selon notre avis :

- a) La période que nous avons suivie est assez spéciale, puisque plusieurs jours ont coïncidé avec le Ramadhan où l'on remarque sans aucune analyse approfondie que toutes les activités humaines sont très réduites, la vie se fait au ralenti et en particulier, la nette diminution dans l'intensité du trafic routier.
- b) Il est également fort possible que l'analyseur utilisé sous-estime les valeurs des PMi. Usuellement, on mesure les PMi par la jauge B qui est homologuée et qui équipe la majorité des réseaux de surveillance de part le monde ou bien l'échantillonneur à fort débit le HVS.

La littérature ne décrit pas de travaux réalisés avec cet analyseur. La sous-estimation peut provenir du fait que l'étalonnage de l'appareil n'est pas parfait et qu'il est à ré-étalonner.

Pour confirmer la validité des teneurs fournies par le Fidas 200, il serait utile de le placer à côté d'une jauge B en un même site et comparer les teneurs données par les deux appareils.

Enfin, il serait très difficile, voire très osé de dire sur la base de notre étude que la pollution atmosphérique a diminué à Alger. Le parc automobile a quasiment doublé ces cinq dernières années et l'agglomération d'Alger a gardé au moins les mêmes installations industrielles.

III.4.9. Comparaison avec des villes étrangères

Pour avoir un aperçu global sur l'ampleur de taux de pollution par les particules, il est utile de comparer nos résultats avec ceux obtenus dans d'autres villes.

A partir de la dernière base de données de l'OMS, et dans un but comparatif, des capitales des pays ont été sélectionnées, telles que : Paris, Riyad, le Caire, Madrid, Rome, Berlin, Istanbul, Tunis et les villes de New York et Casablanca (tableau 6).

La comparaison en teneurs de pollution atmosphérique enregistrée entre celles d'Alger et des autres villes du monde montrent que notre capitale dispose des niveaux modérés en termes de pollution en PM10 et PM2.5 et qu'elle est mieux classée que les pays de l'Est et du Moyen-Orient qui ont atteints des situations dramatiques. En ce qui concerne l'Algérie, pour les particules, seules les PM10 ont été fixées à 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mais avec le développement technologique et l'augmentation du nombre de véhicules et autres sources de pollution de l'air, cette dernière doit être révisée et établir une autre loi concernant les PM2.5 aussi.

Il faudrait également qu'on mène dans notre pays des études épidémiologiques réelles qui tiennent compte de la composition de nos particules où la part des émissions naturelles est plus élevée qu'en Europe.

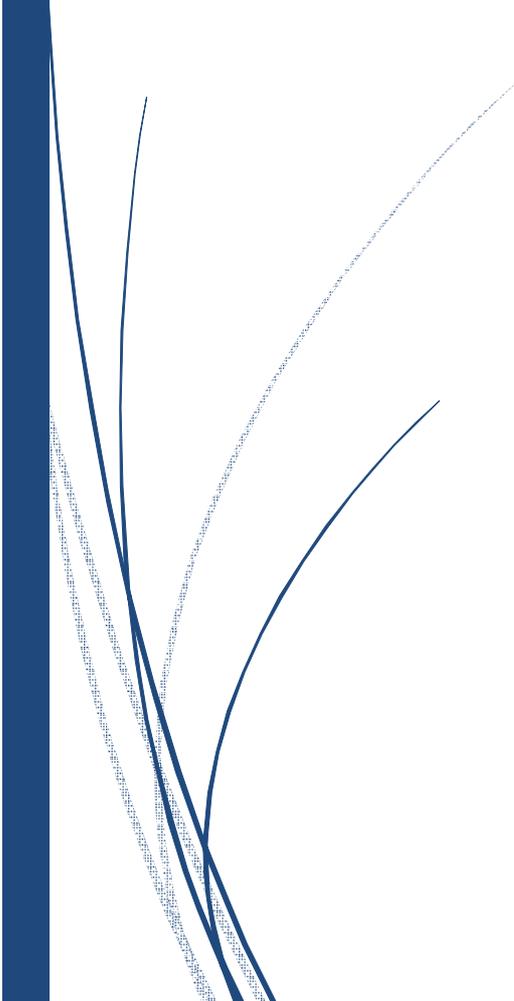
Tableau 6. Comparaison des niveaux de pollution par les particules de l'air avec d'autres villes du monde

Site	Période	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Alger	2017	35.6	12.5
Riyad (Arabie Saoudite)	2014	368	156
New York (Les Etats Unies)	2014	16	9
Paris (France)	2014	28	18
Berlin (Allemagne)	2011	24	20
Rome (Italie)	2011	32	21
Le Caire (Egypte)	2011	135	73
Madrid (Espagne)	2011	22	11
Istanbul (Turquie)	2011	48	32
Tunis (Tunisie)	2010	90	38
Casablanca (Maroc)	2013	60	25

The logo consists of a dark blue vertical bar on the left and a blue arrow pointing to the right, containing the text "ENP 2017" in white.

ENP 2017

Conclusion Générale



Conclusion Générale

De nombreuses études ont été consacrées aux suivis des concentrations atmosphériques des PM_i à travers le monde et ce en raison du fait qu'ils constituent un indicateur majeur de la qualité de l'air avec d'importants effets sur la santé

En Algérie, d'une façon générale, il existe très peu de données sur la pollution atmosphérique. En effet, malgré l'existence de quelques études faites par les universités et l'ENP et réseaux de surveillance de SamaSafia (mis en arrêt en 2009) pour certaines agglomérations, ces données restent insuffisantes pour établir un bilan sur la pollution de l'air en Algérie.

C'est en continuité de ces travaux et afin de mieux enrichir nos connaissances sur ce problème que nous avons réalisé cette étude sur l'ampleur de la pollution de l'air par les PM_i, notamment les différentes fractions granulométriques PM_{tot}, PM₁₀, PM₄, PM_{2.5} et PM₁ au niveau d'un site urbain et un site semi-urbain à Alger. Les prélèvements automatiques chaque seconde nous permettent de mieux cerner les variations journalières de polluant sur une durée de 52 jours.

Les résultats obtenus montrent, que les fractions grossières (PM₁₀ et PM_{tot}) présentent de fortes concentrations par rapport aux particules fines et ultrafines. Ces dernières présentent des variations importantes entre les jours de prélèvements au niveau des deux sites urbain et semi-urbain.

Nous constatons également l'influence des conditions météorologiques telle que la pluviométrie qui est bien marquée pour les fractions grossières dans le jour de son occurrence à Alger-centre, ainsi que l'influence du vent et de la température et l'humidité sur les deux sites.

La comparaison avec les normes de qualité de l'air montre des dépassements significatifs des normes journalières des Directives Européennes et de l'OMS. Ainsi, la majorité des Algérois sont potentiellement exposés à un dépassement de la valeur limite journalière en PM₁₀.

Les teneurs en PM_{2.5} sont 1,8 fois supérieures au seuil de l'objectif de qualité. Cela nous laisse prédire que près de 95% des Algérois, soit 3 millions de personnes, sont concernés par ce dépassement de seuil. Une comparaison avec les anciennes mesures nous a permis de constater qu'au niveau d'Alger-centre, les teneurs enregistrées sont plus faibles par rapport à celle des années précédentes, et qu'une tendance à la baisse se dessine, en particulier en proximité au trafic routier à Alger-centre, où la valeur limite 25 (µg/m³).

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 durant le Ramadhan ou éventuellement un manque de fiabilité de l'analyseur utilisé ont été évoquées.

L'étude du rapport PM_{2.5}/PM₁₀ montre que les PM₁₀ sont très enrichis en particules grossières d'origine naturelle. Le manque de végétation qui favorise l'érosion des sols et parfois le transport des particules du désert en sont responsables.

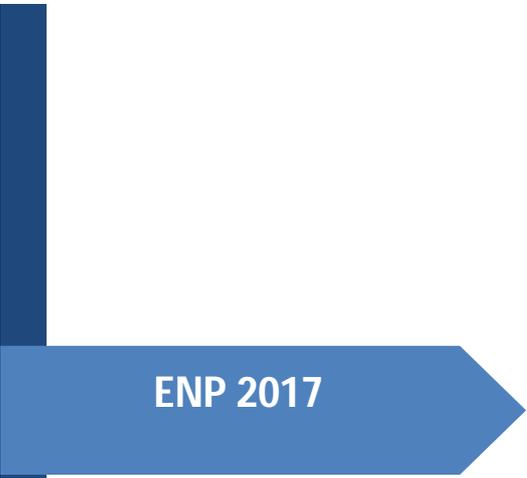
Cette étude a permis également de montrer que les PM₁₀ constituent environ 70 % des PM_{tot} qu'il est ainsi possible d'avoir facilement une estimation des PM₁₀ par une simple mesure des particules totales en suspension.

L'étude de la distribution des particules montrent que les nanoparticules sont les plus nombreuses et responsables de la majeure partie de la surface de contact entre les particules et le milieu ambiant, mais elles constituent une masse négligeable. Les microparticules forment presque la totalité de la masse alors que leur nombre est négligeable.

A la lumière de ces résultats et afin d'améliorer graduellement la situation ou au moins éviter son aggravation, nous présentons les recommandations suivantes :

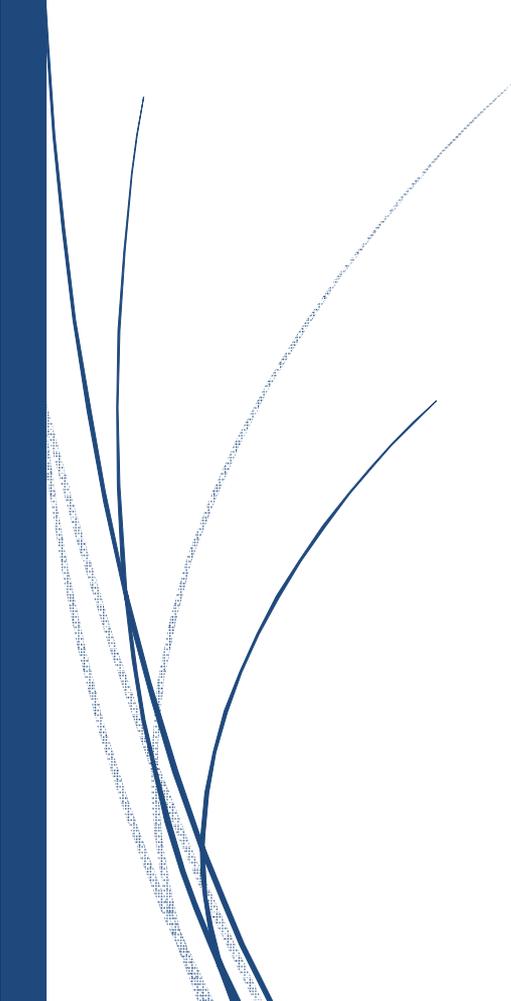
- ✚ Une stratégie et mode de transport appropriés ;
- ✚ Une fluidité du transport ;
- ✚ Un contrôle régulier des émissions industrielles.
- ✚ Encouragement de la bicarburant Essence / GPL ou GNC et électrique.
- ✚ Réduire les aires nues et donc la pollution par érosion éolienne (création d'espaces verts).
- ✚ Mettre en place un système d'évaluation de la pollution particulaire sur l'échelle nationale et son incidence sur la santé par des études épidémiologiques.
- ✚ Développement du domaine des énergies renouvelables.

En fin revoir 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 les PM₁ qui sont les plus dangereux pour la santé humaine.



ENP 2017

Bibliographie



Bibliographie

- [1] N. Probst-Hesch, Interviewee, meme si minime, la pollution de l'air est problematique. [Interview].
- [2] A. HODZIC, «Thèse de doctorat en chimie et physique de l'atmosphère : Modélisation des aérosols de pollution en Ile-de-France,» Ile-de-France, 2005.
- [3] D.W. DOCKERY, C. ARDEN POPE, Xiping Xu, J.D. SPENGLER, J.H. WARE, M.E. FAY, B.G. FERRIS, Jr., F.E. SPEIZER, «An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities,» The New England Journal of Medicine, n° 329:1753-1759, 1993.
- [4] C.A. POPE, M.J THUN, M. NAMBOODIRA, D.W. DOCKERY, J.S. EVANS, F.W. SPEIZER, C.W. HEATH, «Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults» critical care medicine, vol. 151, 1995.
- [5] P. VAN VLIET, M. KNAPE, J. DE HARTOG, N. JANSSEN, H. HARSSEMA, B. BRUNEKREEF, «Motor vehicle exhaust and chronic respiratory symptoms in children living near freeways,» eEnvironmental Research, n° 174, pp. 122-132, 1997.
- [6] Airparif, «Synthèse des connaissances sur les particules en suspensions dans l'air et les travaux d'Airparif sur ces polluants.[EN LIGNE],» Airparif, Ile-de-France, Octobre 2008.
- [7] C. PIOT, «Thèse Pour obtenir le grade de docteur de l'université de Grenoble: Polluants atmosphériques organiques particulaires en Rhône-Alpes: caractérisation chimique et sources d'émission,» Université de Grenoble, 2011.
- [8] P. MASCLLET, «Les aérosols atmosphériques,» chez *Pollution atmosphérique*, Paris, 2005, p. 73.
- [9] A. WAKED, Caractérisation des aérosols organiques à Beyrouth, Liban, Paris: Université Paris-EST, 2012.
- [10] «Le carbone suie: enjeu présent et futur,» AirParif, PARIS, 2014.
- [11] M. TOMBETTE, «Modélisation des aérosols et de leurs propriétés optiques sur l'Europe et l'Ile de France : Validation, sensibilité et assimilation de données,» *Ecole des Ponts ParisTech*, 2007.
- [12] H. ABDERRAHIM, «Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur: Apport du sondeur à laser (lidar) dans l'étude de la pollution par les aérosols,» Université d'Oran, Oran, 2012.
- [13] «Diffusion des polluants,» CANOPÉ académie d'Amiens , [En ligne]. Available: http://crdp.ac-amiens.fr/enviro/air/air_maj_poll7.htm.
- [14] «Principales causes de mortalité dans le monde,» Organisation Mondiale de la Santé, 2014. [En ligne]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/fr/>.
- [15] A. Taytard, « système de defences de l'appareil respiratoires » 2013,[EN LIGNE]. Available: <http://www.respir.com/doc/abonne/base/EnvironnementDefenses.asp>
- [16]«Summary report of the Aphekom project 2008-2011» France,[EN ligne]. <http://www.aphekom.org/>
- [17] «ORS, Observatoire Régional de Santé d'Île-de-France,» [En ligne]. Available: <http://www.ors-idf.org/>.
- [18] J.-M. BRIGNON, «Les effets environnementaux des particules,» n° 1177, pp. 91-102, 2003.

- [19] K. NYTORV, «Air quality in Europe,» European Environment Agency, Denmark, 2014.
- [20] L.Aïchi, «Pollution de l'air : le coût de l'inaction,» SENAT, Paris, 2015.
- [21] «La pollution de l'air par des particules,» Ministère de l'Environnement, France, Mars 2015.
- [22] «Les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique,» *Décret exécutif n° 06-02*, 2006.
- [23] «Mesures primaires et secondaires de réduction des particules,» CITEPA, 29 Septembre 2016. [En ligne]. Available: <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/techniques-de-reduction/mesures-primaires-et-secondaires-de-reduction-des-particules>.
- [24] «UNECE COMMISSION ÉCONOMIQUE POUR L'EUROPE Document d'orientation sur les techniques de lutte contre les émissions pour les sources mobiles dans le cadre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance,» Nation Unies, 2016.
- [25] «Quelle est la réglementation des filtres à particules en France ?,» 12 Décembre 2014. [En ligne]. Available: <http://blog.mister-auto.com/actus/quelle-reglementation-filtres-particules-en-france/>
- [26] «Comment fonctionne un FAP ?,» 2014. [En ligne]. Available: <https://www.carter-cash.com/>.
- [27] «GPL,» [En ligne]. Available: <https://www.encyclo-ecolo.com/>.
- [28] P.Lajoie, «Efficacité des purificateurs d'air portatifs,» Centre de santé publique de la région de Québec, [En ligne]. Available: <http://www.enviro-option.com/fr/purificateur-air-info>.
- [29] N. OUCHER, R. KERBACHI, A. GHEZLOUNA, H. MERABET, «Magnitude of Air Pollution by Heavy Metals Associated with Aerosols Particles in Algiers,» *Energy Procedia*, n° 174, p. 51 – 58, 2015.
- [30] A.TALBI, «Mémoire de Magister: Etude de la pollution de l'air par les PM_i en milieu rural,» Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2012.
- [31] Y. KERCHICH, Y. MOUSSAOUI, R. KERBACHI, «Atmospheric levels of BTEXs, PM_{2.5}, PM₁₀ and heavy metals at Algiers's city,» *FEB*, vol. 25, n° 107, pp. 2519-2530, 2016.
- [32] «Air Ressource Laboratory,» HYSPLIT, 2017. [En ligne]. Available: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
- [33] W. HONGYI, "Study shows PM₁ air pollution is most harmful," *Chinadaily US Edition*, 28 10 2013. [Online]. Available: http://usa.chinadaily.com.cn/china/2013-10/28/content_17061997.htm.
- [34] Madan, "Delhi air poisoned with most toxic pollutant PM₁-Researchers," *Planet Custodian*, 29 Septembre 2016. [Online]. Available: <http://www.planetcustodian.com/2015/06/29/4095/delhi-air-poisoned-with-most-toxic-pollutant-pm1-researchers.html>.
- [35] "Air Ressource Laboratory," HYSPLIT, 2017. [Online]. Available: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.