

École Nationale Polytechnique



Département du Génie de l'Environnement

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'étude
pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en Génie de l'Environnement

Contribution à l'étude de la pollution de l'air par les particules fines, en milieu urbain, à Alger

présentée et soutenue le 15 juin 2016

BOUAKAZ Djallel Eddine Mohamed
HANNANE Hanane

Promoteur : **KERBACHI Rabah**
Co-Promoteur : **TALBI Abd El Hamid**

Jury

M. A.CHERGUI,	Professeur, ENP	Président
M. R.KERBACHI,	Professeur, ENP	Promoteur
M. Y.KERCHICHE,	M.C B, Univ. Médéa	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce travail aux deux personnes m'étant les plus chères au monde, mes parents. Pour leur soutien infailible et tous les sacrifices consentis. A mes sœurs, qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance et de courage.

A mon binôme pour sa bonne humeur, son énergie et l'immense travail accompli.

A tous mes amis de la cellule, tous les membres du CAP, tous mes proches, pour leur soutien constant et toutes ces années passées ensemble.

Hanane

Je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers et proches ainsi, qu'à tous ceux qui m'ont aidé à faire aboutir ce travail.

Djallel Eddine

Remerciements

Nous tenons à remercier, en premier lieu, Abdelhamid TALBI, de nous avoir encadré et soutenu au long de notre travail ainsi que Monsieur KERCHICHE pour sa précieuse aide dans l'accomplissement de ce travail.

Nos remerciements vont également à tout le personnel de la Mairie d'El Mohammadia, pour leur accueil chaleureux, leur sympathie et leur patience. Mais aussi aux membres de l'Office National de la Météorologie, pour leur contribution à notre étude et ce en nous fournissant les données nécessaires.

Nos vifs remerciements s'adressent tout particulièrement à notre directeur de mémoire, professeur Rabah KERBACHI, pour sa disponibilité, 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 tenons également à remercier tous les enseignants du Département Génie de l'Environnement, à l'Ecole Nationale Polytechnique auxquels nous devons notre formation d'ingénieur.

Enfin, nous remercions les membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer notre travail.

Merci à vous tous.

BOUAKAZ Djallel Eddine Mohamed
HANNANE Hanane

الملخص

شهدت الانبعاثات الملوثة للهواء نموا قويا منذ التسعينات وانعكس ذلك على نوعية الهواء إذ تدهورت حالته بشكل معتبر فإن التلوث الناجم عن وسائل النقل يشكل خطرا على الصحة

تركز هذه الدراسة على تحديد مستويات التلوث في منطقة حضرية شرق مدينة الجزائر العاصمة ببلدية المحمدية عن طريق الجزيئات الدقيقة PM_{10} ، $PM_{2,5}$ ، PM_1 وبالخصوص على تشخيص وتحديد تركيز المعادن التي تحتوي عليها هذه الجزيئات

أظهرت الدراسات أن المتوسط اليومي PM_{10} يعادل $73,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و $40,72$ و $23,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ فيما يخص PM_1 و $PM_{2,5}$ على التوالي. ما يقارب 57% من PM_{10} عبارة عن جزيئات يمكن استنشاقها. كما بينت هذه الدراسة أن الجزيئات تتبع توزيعا بيموديا يختص بمنطقة حضرية ويتركز توزيعهم في حوالي $1,1 \mu\text{m}$ الجزيئات الجد دقيقة و $4 \mu\text{m}$ بالنسبة للخشنة

من بين المعادن الثقيلة المتعلقة ب PM_{10} مستويات الرصاص تتجاوز المعايير الموصى بها من قبل منظمة الصحة العالمية والمتعامل بها في بعض الدول حيث بلغ تركيزه المتوسط $1,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ما يعادل 1.44% من كتلة PM_{10} ما يسمح لهذا العنصر بالوصول إلى الحويصلات الرئوية.

وفيما يخص المعادن الأخرى فهي عموما ضمن قيم مقبولة

الكلمات الدالة : تلوث الهواء، الجزيئات الدقيقة، التلوث الحضري، PM_{10} ، $PM_{2,5}$ ، PM_1 ، XRF ، المعادن الثقيلة، الرصاص.

Abstract

Since the 1990s, emissions of major air pollutants have significantly increased and this trend has reflected a general spoilage of the air quality. The local air pollution-induced by transports has a real public health issue in urban areas.

This study focuses in the evaluation of air pollution in the East of Algiers, around the township of El Mohammadia, by the PM_{10} ، $PM_{2,5}$ and PM_1 . The specificity of this analysis remains in assessing the extent of particulate pollution and heavy metal associated with this form of pollution.

In this particular site, the daily average concentrations of PM_{10} is estimated around $73,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The levels of $PM_{2,5}$ and PM_1 amounted to $40,72$ and $23,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$. About 55% of PM_{10} consists of breathable particles. Furthermore, the study shows that the PM_{10} follows a bi-modal distribution, specific to an urban site. The mass distribution of particles centers around $1,1 \mu\text{m}$ for fine particles and around $4 \mu\text{m}$ for coarse particles.

Among PM_{10} related heavy metals, lead reaches superior levels compared to the WHO guidelines, reaching an average concentration of $1,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$, representing 1,44% of the whole mass fraction, allowing this element to end up in the alveoli. Regarding other heavy metals, they seem to fall within permitted levels.

Keywords : Air pollution, particulates matters, urban site, PM_{10} ، $PM_{2,5}$ ، PM_1 ، heavy metals, lead, XRF.

Résumé

Depuis les années 1990, les émissions des principaux polluants de l'air voient une forte progression et cette évolution s'est répercutée par une détérioration générale de la qualité de l'air ambiant. La pollution atmosphérique de proximité induite par le transport routier présente un véritable enjeu de santé publique en milieu urbain.

La présente étude porte sur la détermination des niveaux de pollution à l'Est de la ville d'Alger, dans la commune d'El Mohammadia, par les PM_{10} , $PM_{2.5}$ et PM_1 . La spécificité du présent mémoire tient dans l'évaluation des teneurs en métaux lourds contenus dans l'air.

En ce site, la teneur journalière moyenne en PM_{10} s'élève à $73,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les teneurs en $PM_{2.5}$ et PM_1 s'élèvent respectivement à $42,15$ et $23,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Environ 57% des PM_{10} sont constitués de particules respirables. L'étude montre par ailleurs que les particules étudiées suivent une distribution bimodale caractéristique d'un milieu urbain. La distribution massique des particules se concentre autour de $1,1 \mu\text{m}$ pour les particules fines et de $4 \mu\text{m}$ pour les particules grossières.

Parmi les métaux lourds associés aux PM_{10} , le plomb présente des teneurs dépassant les valeurs recommandées par l'OMS, s'élevant ainsi à une concentration moyenne de $1,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$, correspondant à une fraction massique de l'ordre de 1,44%. Ce qui permet à cet élément de se retrouver dans les alvéoles pulmonaires. Quant aux autres métaux, ils se situeraient généralement dans des teneurs admissibles.

Mots-clés : Pollution atmosphérique, pollution particulaire, espace urbain, PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 , métaux lourds, plomb, XRF.

Table des matières

Liste des tableaux	9
Table des figures	12
Introduction	16
1 Généralités sur la pollution atmosphérique	18
1.1 Composition naturelle de l'air	18
1.1.1 L'air pur	18
1.1.2 L'air pollué	19
1.2 Pollution particulaire	19
1.2.1 Définition	19
1.2.2 Fractions granulométriques	20
1.2.3 Composition chimique	23
1.2.4 Sources	27
1.3 Les mécanismes de transport des particules	33
1.4 Les facteurs climatologiques influençant la pollution atmosphérique . .	35
1.4.1 Le rôle des conditions saisonnières sur le long-terme : Le cycle annuel	35
1.4.2 Le rôle de la météorologie sur le court-terme : Le cycle journalier	36
2 Nuisances par la pollution particulaire	39
2.1 Généralités	39
2.2 Effet sanitaire	40
2.2.1 Exposition aux particules	40
2.2.2 Répercussions de l'inhalation des particules	41
2.2.3 Les incertitudes de « l'effet cocktail »	45

2.3	Effet sur la faune et la flore	45
2.4	Effet sur les matériaux	46
2.5	Impacts économiques	47
2.5.1	Sur la santé	47
2.5.2	Sur l'environnement	50
2.6	Effet des métaux lourds	50
3	Lutte contre la pollution particulaire	53
3.1	Techniques de réduction de la pollution particulaire	53
3.2	Réglementations des émissions particulières dans l'air ambiant	56
3.2.1	Recommandations européennes	56
3.2.2	Recommandations algériennes	58
3.3	Ampleur de la pollution atmosphérique	59
3.3.1	Tendances mondiales en milieux urbains	59
3.3.2	Etat de la pollution atmosphérique en Algérie	61
3.4	Réseaux de surveillance	62
3.4.1	Au niveau mondial	62
3.4.2	Réseaux de mesures en Algérie	62
4	Principales méthodes de mesure et d'analyse des particules en sus- pension	64
4.1	Echantillonnage	65
4.1.1	Les techniques de mesures en masse	68
4.1.2	Les analyses dimensionnelles	71
4.2	L'analyse des particules en suspension	74
4.2.1	Analyse physique des particules	74
4.2.2	Analyses chimiques	75
5	Méthodologie expérimentale	78
5.1	L'espace urbain d'El Mohammadia	78
5.1.1	Coordonnées géographiques et démographiques	79
5.1.2	Sources d'émission des particules au voisinage du point de prélè- vement	80
5.2	Méthodologies et outils d'analyse	80
5.2.1	Durée de prélèvement	80

5.2.2	Outil de prélèvement	81
5.2.3	Méthode de prélèvement	84
5.3	Analyse des métaux lourds	85
6	Résultats et discussions	86
6.1	Etude des niveaux de pollution par les particules	86
6.1.1	Teneurs atmosphériques en particules	86
6.1.2	Influence des conditions météorologiques	90
6.1.3	Distribution granulométrique des particules fines	94
6.1.4	Etude des corrélations entre les différentes classes granulométriques	99
6.2	Ampleur de la pollution :	
	Comparaison aux normes et aux teneurs d'autres villes	103
6.3	Etude des métaux lourds contenus dans les particules inhalables	107
6.3.1	Niveaux de pollution par les métaux lourds	107
6.3.2	Corrélation entre les métaux lourds	118
6.3.3	Exploitation statistique des teneurs atmosphériques en métaux lourds	123
	Conclusion	125
	Bibliographie	127
	Annex et tables	135

Liste des tableaux

1.1	Composés chimiques des aérosols atmosphériques	23
1.2	Estimation des sources d'aérosols primaires et secondaires parmi les sources naturelles et anthropiques d'aérosols	32
2.1	Effets sanitaires des polluants de l'atmosphère	44
2.2	Résumé des principales études sur le coût sanitaire de la pollution de l'air	49
3.1	Emissions moyennes de particules de différents types de moteurs	55
3.2	Lignes directrices relatives à la qualité de l'air	56
3.3	Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air et cibles intermédiaires pour les particules : concentrations moyennes annuelles et sur 24 heures	57
3.4	Valeurs limites pour la protection de la santé humaine selon les recommandations européennes	58
3.5	Valeurs limites des paramètres de rejets atmosphériques	58
3.6	Tolérance à certaines valeurs limites des paramètres de rejets atmosphériques selon certaines catégories des installations	59
3.7	Tendances des PM _{2,5} ou PM ₁₀ basées sur les données disponibles par régions	61
6.1	Teneurs moyennes et extrêmes des PM _i à El Mohammadia en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	87
6.2	Direction des vents, vitesses moyennes et maximales mesurées à la station météorologique de Dar-El-Beida	91
6.3	Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique	94
6.4	Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique pour le calcul des PM _{2,5}	96
6.5	Calcul de la distribution modale des particules	98
6.6	Coefficients de corrélations liant les différentes classes granulométriques	100
6.7	Normes et recommandations régissant les PM ₁₀	103

6.8	Tableau comparatif des teneurs en PM_i dans différents sites urbains au monde	106
6.9	Teneurs atmosphériques moyennes(ng/m^3) des métaux lourds mesurées	112
6.10	Teneurs atmosphériques moyennes ($\mu g/m^3$) des métaux lourds mesurées	112
6.11	Distribution des fractions massiques moyennes des métaux lourds selon la classe granulométrique	114
6.12	Distribution des fractions massiques moyennes des métaux lourds selon la classe granulométrique	114
6.13	Rapport entre certaines fractions massiques moyennes de métaux lourds (%)	117
6.14	Matrice des facteurs de corrélation des métaux contenus dans les PM_{10}	122
6.15	Matrice des facteurs de corrélation des métaux contenus dans les PM_3 .	122
6.16	Matrice des facteurs de corrélation des métaux contenus dans les PM_1 .	122
6.17	Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique pour le Pb	123
6.18	Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique pour le Fe	123
0.19	Résultats des prélèvement sur filtres(Première partie)	139
0.20	Résultats des prélèvement sur filtres(Deuxième partie)	139
0.21	Résultats de l'analyse des méteaux lourds (Première partie)	140
0.22	Résultats de l'analyse des méteaux lourds (Deuxième partie)	141
0.23	Résultats de l'analyse des méteaux lourds (Troisième partie)	142
0.24	Résultats de l'analyse des méteaux lourds (Quatrième partie)	143
0.25	Résultats de l'analyse des méteaux lourds (Cinquième partie)	144
0.26	Concentrations des méteaux lourds dans les filtres (Première partie) . .	145
0.27	Concentrations des méteaux lourds dans les filtres (Deuxième partie) .	146
0.28	Concentrations des méteaux lourds dans les filtres (Troisième partie) .	147

Table des figures

1.1	Spectre dimensionnel des particules atmosphériques et processus régissant leur évolution	21
1.2	Composition moyenne annuelle de l'aérosol	24
1.3	Proportions relatives des fractions chimiques composant les particules en fonction de leur taille	25
1.4	Composants majeurs des PM_{10} et leur proportion dans les particules fines $PM_{2,5}$ mesurées en Angleterre	25
1.5	Schéma représentant les différentes notions de mélange	26
1.6	Contributions relatives des principaux secteurs (a) aux émissions de PM_{10} , $PM_{2,5}$ et PM_1 en France	27
1.7	Composition de l'aérosol atmosphérique et ses principales sources	30
1.8	Les mécanismes de la pollution atmosphérique	33
1.9	Impact de la variation saisonnière sur la concentration d'ozone et de particules à Montréal	36
2.1	Niveau de déposition des particules inhalées dans l'appareil respiratoire selon leur taille	41
2.2	Pyramide des effets sanitaires de la pollution atmosphérique	42
3.1	Niveau des PM_{10} par région et par taille des villes, 2008-2015	60
4.1	Schéma de séparation des particules par impaction.	65
4.2	Variation de l'efficacité de collecte d'une tête de prélèvement	65
4.3	Tête de prélèvement NF X 43-021	66
4.4	Tête de prélèvement PM_{10}	67
4.5	Tête de prélèvement $PM_{2,5}$	67
4.6	Schéma de principe du prélèvement sur filtre	68
4.7	Schéma de principe d'un impacteur en cascade	69
4.8	Schéma de principe d'un compteur optique.	72

4.9	Schéma de principe d'un ADME, couplé à un CNC.	73
4.10	Principe de la spectroscopie par fluorescence X	77
5.1	Localisation de la commune d'El Mohammadia, à l'Est d'Alger	79
5.2	Localisation de la Mairie d'El Mohammadia	79
5.3	Voisinage du point de prélèvement	80
5.4	Appareil de prélèvement utilisé	81
5.5	Schéma représentatif du collecteur	82
5.6	Principe de fonctionnement d'un impacteur en cascade	83
5.7	Filtres de prélèvement	84
5.8	Principe de fonctionnement de l'analyseur	85
6.1	Evolution temporelle des teneurs journalières en PM_i (Mois de Mars)	87
6.2	Evolution temporelle des teneurs journalières en PM_i (Mois d'Avril)	88
6.3	Evolution temporelle des teneurs journalières en PM_i (Mois de Mai)	88
6.4	Teneurs moyennes des différentes classes granulométriques étudiées	89
6.5	Contribution massique par classe granulométrique	89
6.6	Proportion massique des classes granulométriques des PM_i	90
6.7	Influence du vent	91
6.8	Rose des vents des trois mois de prélèvement	92
6.9	Influence des précipitations sur les teneurs en PM_{10}	93
6.10	Evolution des PM_{10} en fonction de la température	93
6.11	Diagramme log-probabilité de la masse cumulée des particules en fonction du diamètre	95
6.12	Représentation de la fonction (PM_i/PM_{10}) en fonction de (MC_i/MC_{10})	96
6.13	Contribution (en % massique) aux PM_{10}	97
6.14	Distribution modale des particules	99
6.15	Évolution des teneurs en PM_1 , PM_3 et PM_{10} mesurées à Alger	100
6.16	Comparaison des teneurs atmosphériques en PM_{10} par rapport aux normes	104
6.17	Comparaison des teneurs atmosphériques en $PM_{2,5}$ par rapport aux normes	105
6.18	Evolution temporelle des teneurs en Pb	107
6.19	Evolution temporelle des teneurs en Fe	111
6.20	Evolution temporelle des teneurs en Ca	111
6.21	Teneurs atmosphériques moyennes des métaux lourds	113

6.22	Teneurs atmosphériques moyennes des métaux lourds	113
6.23	Pourcentage massique moyen des métaux dans chaque classe granulométrique	115
6.24	Pourcentage massique moyen des métaux dans chaque classe granulométrique	115
6.25	Comparaison : Plomb des PM ₁₀ et Norme EU	117
6.26	Corrélation entre les métaux contenus dans les PM ₁	119
6.27	Corrélation entre les métaux contenus dans les PM ₃	120
6.28	Corrélation entre les métaux contenus dans les PM ₁₀	121
6.29	Diagramme log-probabilité de la masse cumulée du Fe et du Pb en fonction du diamètre des particules collectées	124
0.30	Corrélation entre les métaux compris dans les PM ₁	136
0.31	Corrélation entre les métaux compris dans les PM ₃	137
0.32	Corrélation entre les métaux compris dans les PM ₁₀	138

Liste des abréviations

ANSES Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

AOP Aérosols organiques primaires.

AOS Aérosols organiques secondaires.

BC Black carbon.

BPCO Bronchopneumopathie chronique obstructive.

CGDD Commissariat général au développement durable.

CGSP Commissariat général à la stratégie et à la prospective.

COSV Composés organiques semi-volatils.

COV Composés organiques volatils.

CPG Chromatographie en phase gazeuse.

EC Elementary Carbon.

ECD Détecteur à capture d'électrons.

FAP Filtre à particules.

FID Détecteur à Ionisation de Flamme.

FPD Filtre de particules Diesel.

GNC gaz naturel carburant.

HAP Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

HPLC Chromatographie en phase liquide haute performance.

ICP Spectroscopie à plasma à couplage inductif.

OC Organic compound.

OMS Organisation Mondiale de la Santé.

PM Particular matter.

POM Particulate organic matter.

POP Polluants organiques persistants.

PUF Particules ultra fines.

QA qualité de l'air.

SAA Spectrométrie d'Adsorption Atomique.

TSP Total Suspended Particules.

XRF X-ray fluorescence.

Introduction

Les particules fines ont fait l'objet de plusieurs études dans le monde et sont devenues l'une des priorités politiques locales et nationales.

L'état des connaissances des effets des particules sur la santé, à partir des publications les plus récentes effectuées aux USA et en Europe, ont montré que sur le plan sanitaire, les particules fines représentent en milieu urbain, un indicateur majeur de la qualité de l'air. Leur impact sur l'environnement et les nuisances qu'elles engendrent dépendent, toutefois, de leur granulométrie et de leur composition chimique. Ces particules fines véhiculent principalement des imbrûlés et noyaux carbonés issus de processus de la combustion, des particules secondaires, des éléments minéraux ainsi que divers métaux lourds toxiques.

Selon, leur diamètre et leur composition, les particules atteignent différents niveaux du système respiratoire, engendrant différentes pathologies chez l'homme. Ce qui fait d'eux l'objet de nombreux textes réglementaires. L'amélioration de la qualité de l'air passe, notamment, par une réduction des émissions de polluants atmosphériques. Pour autant, la baisse des émissions ne se traduit pas par une diminution proportionnelle des concentrations de polluants. Le niveau de pollution variant en fonction du lieu et du temps, les conditions météorologiques contribuent donc à augmenter, ou à réduire, le niveau de la pollution locale.

En Algérie, la croissance du parc automobile induite par le développement socio-économique et la forte urbanisation ont conduit à l'apparition, chez la population citadine, de maladies chroniques liées à la dégradation de la qualité de l'air. D'anciennes études ont montré que le Grand Alger est, comme toute grande agglomération urbaine, confronté à une intense pollution atmosphérique. Cependant, depuis quelques années, aucun organisme ne surveille les taux de pollution à Alger, mise à part quelques études ponctuelles faites dans le cadre de recherches universitaires.

Le présent mémoire vise à étudier la pollution ambiante induite par la circulation routière en milieu urbain. Il s'agit d'étudier l'ampleur de la pollution particulaire au cours de la période allant de Mars à Mai 2016. En vue de réaliser l'ampleur de la pollution particulaire en site urbain, les trois questions suivantes ont été abordées :

- Quelle influence ont les conditions météorologiques sur les teneurs en particules ?
- De quelle manière se distribuent les particules fines ?
- De quels métaux lourds se composent ces particules ? Et à quelles proportions ?

Dans un premier temps, le rapport sera consacré à la mise en place d'un contexte bibliographique par la définition de notre domaine d'étude et d'analyse. En s'intéressant, tout d'abord, aux sources et mécanismes de formation et de transport des particules. En énonçant, par la suite, les impacts sanitaires, environnementaux et économiques engendrés par l'exposition aux particules globalement, et aux métaux lourds particulièrement. Enfin, la dernière partie sera consacrée à une synthèse des normes et valeurs recommandées au niveau national et international. Ceci nous permettra de nous situer par rapport aux niveaux de pollutions mondiaux.

La deuxième partie de ce travail sera consacrée, quant à elle, à la mise en place d'une étude de l'évolution des teneurs en aérosols dans la commune d'El Mohammadia. Elle se décomposera en trois parties. La première, résumera les principales méthodes de mesure et d'analyses. La seconde, sera consacrée à la description de la zone étudiée et méthode d'analyse utilisée. Enfin, la dernière partie de ce mémoire sera destinée à la présentation et discussion des résultats.

Chapitre 1

Généralités sur la pollution atmosphérique

1.1 Composition naturelle de l'air

L'atmosphère naturelle est constituée, de manière permanente et en tous lieux à la surface du sol, de gaz en même proportions. La composition naturelle de l'air peut se modifier seulement dans des lieux où se produisent des décompositions de substance au sol ou des émanations du sous-sol, surtout dans les terrains volcaniques et marécageux. [1]

Sur les hauteurs se modifie seulement la densité de l'air, les quantités de gaz à l'unité de volume d'air et les proportions de ceux-ci restent constantes. De même, en fonction du temps et de l'espace, il existe des différences de composition seulement en ce qui concerne la vapeur d'eau, qui se trouve d'habitude en proportion de 1-3%. Les gaz entrant dans la composition naturelle de l'air se maintiennent à une concentration constante. Cette composition a les pourcentages suivants :

Azote 78.09%; oxygène 20.94%; argon 0.93%; gaz carbonique 0.03%; néon 0.0018%; hélium 0.0005%; méthane 0.0001%; krypton 0.0001%; monoxyde d'azote 0.00005%; hydrogène 0.00005%; xénon 0.00008%; bioxyde d'azote 0.000002%; ozone 0.000001%-0.000004% [1].

1.1.1 L'air pur

L'air est considéré comme pur lorsqu'il ne contient pas de substances autres que celles qui entrent dans sa composition naturelle. Dans les derniers temps, ce concept a subi des modifications, dues à certaines découvertes, qui ont montré le risque provoqué par l'augmentation de concentration de certains gaz de la composition naturelle de l'air (le gaz carbonique et l'ozone) qui peuvent constituer des indications de pollution d'origine artificielle. L'air pur ayant une composition naturelle constante est une notion

théorique : en réalité il est à peu près impossible de trouver un air absolument pur même dans les bassins les plus isolés de l'atmosphère comme sont la surface des océans ou des massifs forestiers. Même dans ces conditions et même à des altitudes de milliers de mètres, l'air contient des traces d'impuretés sous forme de particules ou de gaz [1].

La notion relative d'air pur signifie qu'il est dépourvu d'impuretés atteignant une concentration qui affecte d'une manière évidemment différente, en comparaison avec l'air naturel, tous les êtres vivants ou les objets. [1]

1.1.2 L'air pollué

La présence de substances étrangères dans la composition de l'air et les modifications de la concentration normale des gaz dans celui-ci se nomment, pollution de l'air. Le passage de l'air pur à l'air pollué se fait lentement, de telle sorte que la différence entre ces deux est au début peu sensible. Une différence très nette s'enregistre quand les substances de pollution arrivent à une concentration nocive pour l'organisme. L'air pollué se rencontre actuellement surtout à la partie inférieure de l'atmosphère terrestre, dans les grandes villes, dans les zones industrielles et leurs alentours. A cause des développements technique et industriel, la pollution de l'atmosphère tend à s'intensifier et à s'étendre à tous les lieux habités.

Plus encore, la pollution de l'air peut s'étendre à de grandes régions, comprendre des pays entiers et même la totalité de l'atmosphère terrestre.

Parmi toutes ces modifications, la préoccupation particulière de notre époque est tournée vers la pollution produite par les poussières et gaz de l'air extérieur, surtout dans les localités industrielles très agglomérées ainsi que dans les grands centres urbains.

1.2 Pollution particulaire

1.2.1 Définition

Ce sont les particules solides (autres que les cristaux de glace) en suspension dans l'air.

Les aérosols sont des vecteurs d'éléments chimiques entre les sphères de l'environnement. Ils constituent notamment un terme important de la composition chimique des précipitations. Ils participent au bilan radiatif de la Terre par leur capacité d'absorption du rayonnement IR (effet de serre) et de réflexion et d'absorption du rayonnement visible (albédo). Ils constituent des noyaux de condensation nuageuse et des noyaux glaçogènes qui initient la formation des gouttelettes d'eau nuageuses et des cristaux de glace. A forte concentration, les aérosols (notamment secondaires) peuvent être des polluants toxiques dommageables pour la santé humaine.

Elles sont principalement caractérisées par leur diamètre aérodynamique dont la dimension est de l'ordre de $10\ \mu\text{m}$ au plus dans l'air au repos, et de quelques centaines de microns dans l'air en mouvement (tempête, orages, etc.). [2]

1.2.2 Fractions granulométriques [3]

Dans la littérature, et pour traduire la grande diversité des particules dans leur origine, leur composition et leur comportement aérodynamique, on utilise différents termes pour qualifier la pollution particulaire. Les termes les plus employés sont [4, 5] : aérosol, fumées noires, poussières, brumes, suies, cendre volantes, particules, etc.

Cette diversité dans le type de particules étudiées a fait qu'il était difficile de comparer les niveaux de pollution mesurés d'une région à une autre et d'un pays à un autre. C'est pourquoi ces dernières années et suite à la standardisation des échantillonneurs de prélèvement et de collecte, aux recommandations des études épidémiologiques et à l'adoption dans plusieurs pays de seuil limites à ne pas dépasser, on assiste à une certaine uniformisation et homogénéisation dans l'étude des particules aéroportées. Les anciennes définitions sont de plus en plus délaissées au profit de nouvelles qui portent plus sur leurs fractions granulométriques. L'objectif visant à sélectionner les particules qui pénètrent dans l'appareil respiratoire a conduit à abandonner les premiers indices particuliers que furent les Total Suspended Particules (TSP) qui correspondaient à un échantillonnage allant jusqu'à des diamètres de $40\ \mu\text{m}$. De plus, la coupure granulométrique des échantillonneurs était mal définie, ce qui rendait également les comparaisons entre sites peu fiables.

Le spectre dimensionnel des particules atmosphériques est très large puisqu'il recouvre plusieurs ordres de grandeur, allant de 0.001 à 100 micromètres. La figure 1.1 montre que les particules atmosphériques se distribuent selon trois modes principaux :

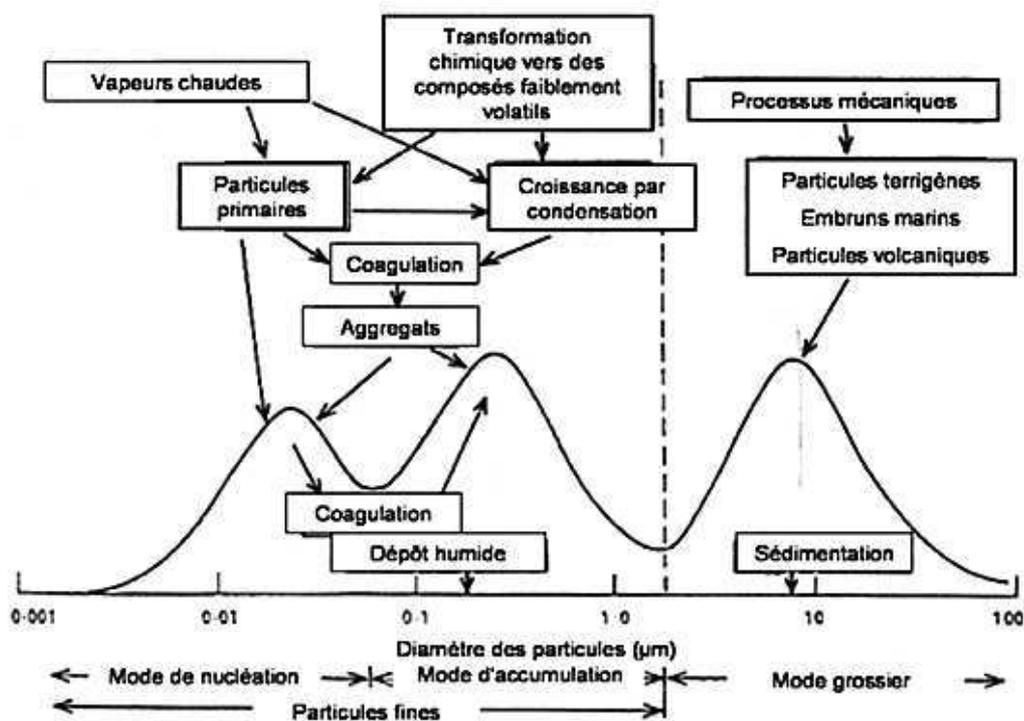


FIGURE 1.1: Spectre dimensionnel des particules atmosphériques et processus régissant leur évolution

- Le mode « nucléation » qui correspond aux particules de diamètre inférieur à 50 nanomètres (nm). Les particules du mode nucléation sont définies comme étant celles inférieures à 50 nm ou, de façon plus restrictive, inférieures à 10 nm. Dans le deuxième cas, les particules de tailles comprises entre 10 et 50 nm seront définies comme appartenant au mode « Aitken ». Ces particules (dont les plus petites se comportent pratiquement comme des gaz), grossissent assez rapidement par collision et par condensation de gaz peu volatils à leur surface. Dans le cas des émissions provenant des véhicules et probablement dans le cas d'autres combustions, cette phase de grossissement va être précédée par une phase de rétrécissement par évaporation sous l'effet de la dilution atmosphérique.
- Le mode « accumulation » qui correspond aux particules de diamètre compris entre 50 nm et environ 1 μm . Ces particules résultent des phénomènes de coagulation et de condensation des particules du mode nucléation. Leur durée de vie est élevée car elles ne coagulent pas, ne sont pas sujettes au dépôt sec ni au mouvement brownien. Par contre, elles sont sensibles au lessivage de l'atmosphère par les précipitations. Ainsi, leur durée de vie peut dépasser une semaine et elles peuvent ainsi transporter des composés toxiques sur de très longues distances.

- Le mode « coarse » (grossier) qui recouvre les particules de diamètre supérieur à $1\ \mu\text{m}$. Il s'agit en général de particules formées par des processus mécaniques (abrasion, usure, mise en suspension par le vent) ; c'est le cas de particules minérales venant du sol (érosion, remise en suspension), de l'aérosol marin, d'émissions industrielles (carrières), de particules provenant de travaux de construction et de démolition (pour les zones urbaines). En raison de leur masse, ces particules se déposent relativement vite sous l'effet de la gravité. Néanmoins, certaines vont être transportées sur de longues distances (poussières du Sahara). Elles comprennent également les pollens, les moisissures, les spores et autres matériaux biologiques.

Les PM_{10} correspondent donc à la prise en compte de l'ensemble des trois modes « nucléation », « accumulation » et « coarse » en limitant ce dernier mode à $10\ \mu\text{m}$ afin de sélectionner uniquement la fraction thoracique de l'aérosol susceptible de pénétrer dans l'appareil respiratoire. Actuellement, en milieu urbain le mode grossier représente environ de 20 à 40 % de la masse totale des PM_{10} quel que soit le site de mesure, urbain de fond ou proche des voies de circulation.

Les $PM_{2,5}$ sont aussi appelées « particules fines » cette fraction de particules en suspension a une granulométrie inférieure à $2,5\ \mu\text{m}$ et correspondent à la prise en compte des modes « nucléation » et « accumulation ». Cependant, comme le montre la figure 1.1, les particules $PM_{2,5}$ sont aussi constituées pour partie de composés liés à des processus d'usure ou de remise en suspension sous l'action de phénomènes mécaniques. Ces particules pénètrent profondément dans le système respiratoire pour atteindre les alvéoles.

Les PM_1 ont fraction a l'avantage d'isoler plus efficacement les particules fines issues des sources de combustion et/ou des conversions gaz-particules. Différentes études ont, en effet, montré que près de 90 % de la masse des PM_1 sont constituées de carbone élémentaire et organique ainsi que d'ions sulfates, nitrates et ammonium. Cette fraction granulométrique serait donc a priori un indicateur plus spécifique des sources anthropiques de combustion et de l'aérosol secondaire que les $PM_{2,5}$.

Les (Particules ultra fines (PUF)) sont définies comme les particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à $0,1\ \mu\text{m}$ et correspondent donc aux modes « nucléation » (Aitken), et aux plus petites particules du mode accumulation de l'aérosol atmosphérique. Leur masse est globalement très faible mais en nombre, elles constituent l'essentiel des particules présentes dans l'atmosphère (plus de 90 %). Elles sont considérées de plus en plus comme des marqueurs d'exposition aux émissions d'échappement fraîchement émis.

L'intérêt se porte aujourd'hui vers cette fraction ultrafine présentant une grande surface réactive et susceptible de pénétrer au plus profond de l'appareil respiratoire pour y transporter des composés toxiques.

1.2.3 Composition chimique

Connaître la composition chimique des aérosols atmosphériques permet de cibler non seulement, quelles ont été les sources influentes à l'origine de ces aérosols mais aussi, quels ont été les processus de vieillissement chimique subi au cours du transport. Cette spéciation chimique des aérosols n'est possible qu'à travers différentes techniques analytiques appropriées aux multiples composés chimiques présents et recherchés. Les principaux composés sont resumés en tableau 1.1 la figure 1.2 illustre la composition moyenne d'un aérosol de particules.

TABLE 1.1: Composés chimiques des aérosols atmosphériques [6, 7, 8]

Composés carbonés	L'aérosol carboné est constitué d'une composante organique (Organic compound (OC)) d'origine primaire et secondaire Aérosols organiques secondaires (AOS), regroupant plusieurs centaines de composés organiques différents, et d'une composante (Black carbon (BC)) également appelé carbone-suie ou carbone élémentaire (Elementary Carbon (EC)), principalement d'origine primaire. Si différentes études en laboratoire indiquent que, globalement, la fraction carbonée des particules est vraisemblablement nocive, les composés spécifiques de cette fraction particulière ne sont pas encore bien caractérisés sur le plan de leurs mécanismes toxiques. Au sein de cette fraction, une famille de composés chimiques semble cependant se distinguer pour ses effets : les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP).
Composés minéraux et sels	Tel que les carbonate de calcium, chlorure de sodium, etc. issus de phénomènes érosifs et de remises en suspension de poussières (érosions des sols et des routes, poussières désertiques, embruns, travaux de chantiers, etc.).
Composés inorganiques	Tels les sulfates et les nitrates essentiellement formés secondairement dans l'atmosphère à partir de l'ammoniac et de formes acides (sulfurique et nitrique) produits par oxydation de soufre et d'azote.
Métaux lourds	Provenant d'émissions industrielles (sidérurgie), de phénomènes abrasifs (freinage des véhicules, remise en suspension, etc.) et de la combustion (chauffages, incinération, etc.).
Composés d'origine biogène	Comme par exemple les pollens, les spores et divers microorganismes (champignons et bactéries).

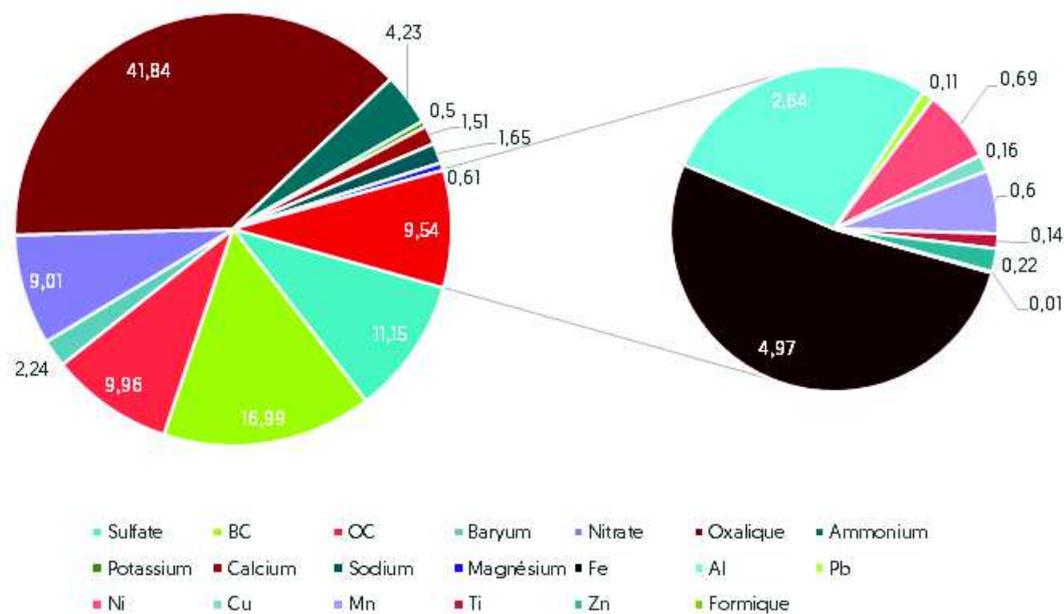


FIGURE 1.2: Composition moyenne annuelle de l'aérosol

De ce fait, il est possible de regrouper les constituants de l'aérosol en quatre fractions majeures :

- Une fraction carbonée : Composée de matière organique particulaire notée Particulate organic matter (POM), incluant des chaînes carbonées à divers degrés d'oxydation (plus ou moins d'atome d'oxygène présents dans la structure moléculaire) issues de processus de combustion incomplets et de Carbone Suie (noté BC pour Black Carbon).
- Une fraction inorganique dominée par les sulfates en atmosphère polluée, pouvant contenir des nitrates, de l'ammonium, du calcium, du magnésium, du potassium, du sodium, du chlore, etc. dans des proportions plus ou moins importantes en fonction de la source influente.
- Des éléments dits en trace du fait de leur présence en faible quantité dans l'aérosol comme par exemple les métaux lourds (plomb, chrome, nickel, etc.) ou l'aluminium, le fer ou la silice retraduisant l'influence d'aérosols terrigènes.
- La fraction organique : Elle se trouve sous forme d'alcane lourds, d'alcools, d'esters et de composés aromatiques polycycliques HAP. Il s'agit de composés organiques à chaînes longues de 8 à 30 atomes de carbones.

La répartition des fractions diffère de façon importante suivant la taille des particules (figure 1.3), ainsi :

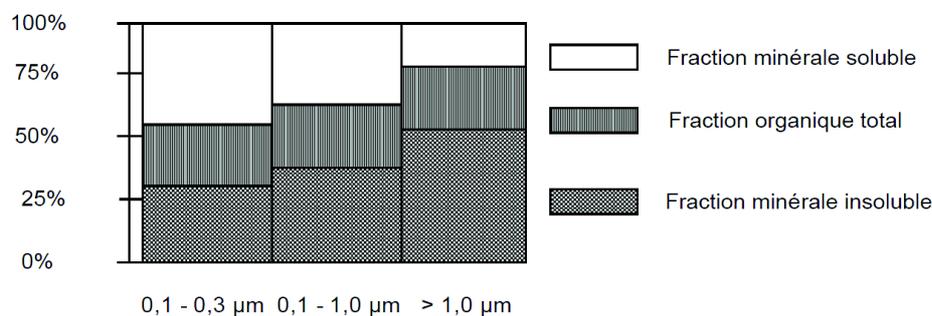


FIGURE 1.3: Proportions relatives des fractions chimiques composant les particules en fonction de leur taille [9]

- La fraction insoluble augmente régulièrement quand la taille augmente ;
- La fraction soluble diminue quand le diamètre augmente ;
- L'importance relative des fractions carbonées et organiques varie beaucoup, mais la somme de ces deux fractions reste approximativement constante.

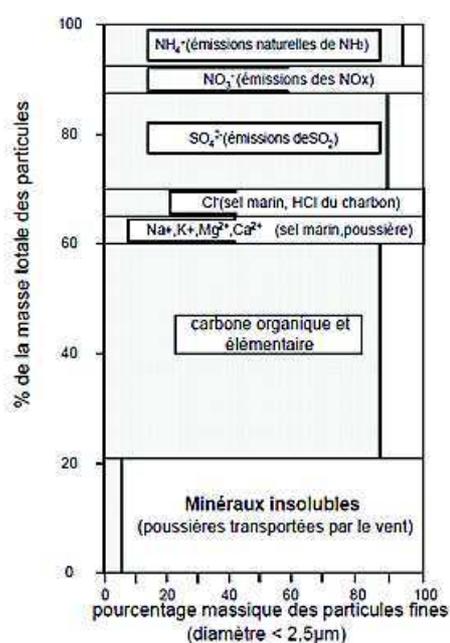


FIGURE 1.4: Composants majeurs des PM₁₀ et leur proportion dans les particules fines PM_{2,5} mesurées en Angleterre [10]

Globalement, il est estimé que plus de 80% du carbone élémentaire, du carbone organique et des aérosols secondaires se trouvent dans les PM_{2,5}. Les particules d'un

diamètre compris entre 2,5 et 10 μm contiennent environ 50% de ces substances et un taux important de minéraux insolubles. [10]

Cependant, il reste difficile de s'imaginer comment ces composés chimiques sont répartis ou mélangés au sein d'une particule d'aérosols. Plusieurs approches théoriques de la notion de mélange sont considérées à l'heure actuelle (figure 1.5). Le mélange dit 'externe' suppose que chaque particule de la population n'est constituée que d'un seul composé chimique. Le 'mélange' des composés chimiques se fait donc au sein de la population d'aérosols et non au sein d'une particule d'aérosols. Le mélange dit 'interne' suppose que, pour une particule d'un diamètre donné pour lequel on connaît les teneurs des différents composés chimiques, ces derniers sont mélangés de façon homogène au sein du volume de la particule. Enfin le mélange dit 'core/shell' suppose que, pour une particule d'un diamètre donné pour lequel on connaît les teneurs des différents composés chimiques, ces derniers forment, un à un, un cœur puis une succession de couches additionnelles. Le schéma ci-dessous illustre ces propos. [11]

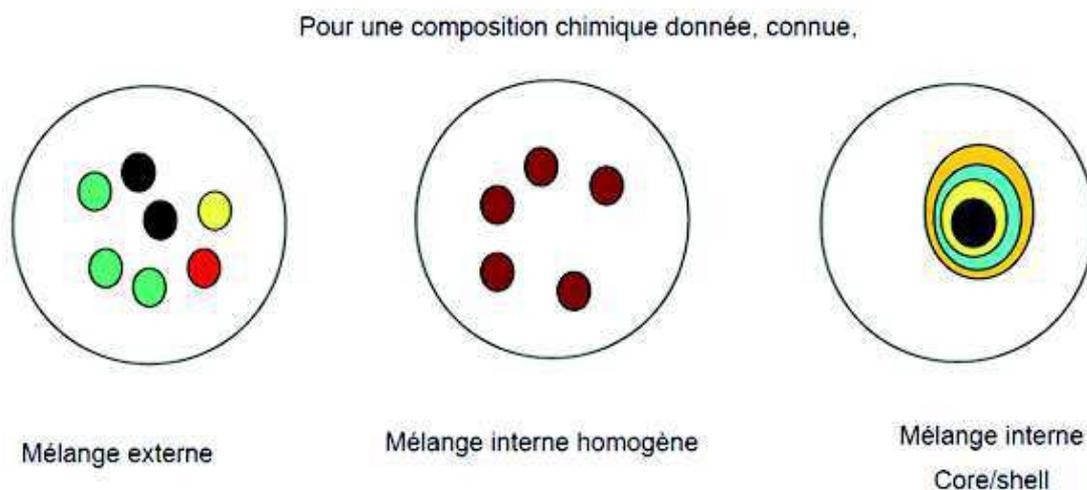


FIGURE 1.5: Schéma représentant les différentes notions de mélange

Le mélange interne core / shell semble être le plus réaliste vu les processus potentiels subis au cours du transport. Par validation des propriétés optiques des aérosols associées à ces différents types de mélange, le core/shell semble aussi le plus réaliste.

1.2.4 Sources

Du fait de leur diversité, les sources de particules atmosphériques sont à l'origine d'un mélange complexe multi-polluant sur un grand domaine de tailles de particules. Aujourd'hui encore, certaines sources sont mal quantifiées. C'est le cas des émissions fugitives, de certaines activités industrielles (carrières) ou agricoles, des émissions naturelles [10] et de certaines émissions diffuses. Aussi, la méconnaissance des particules organiques secondaires conduit à de grandes incertitudes dans les modèles et les inventaires [12]. Ces sources peuvent être à l'origine de particules primaires, c'est-à-dire directement émises, et de particules secondaires formées par la suite dans l'atmosphère à partir de précurseurs gazeux. Les sources de particules peuvent aussi être divisées en deux autres groupes selon qu'elles soient formées à partir d'activités anthropiques ou à partir de sources naturelles la figure 1.6 illustre par exemple la contribution des principaux secteur aux émissions des PM en France.

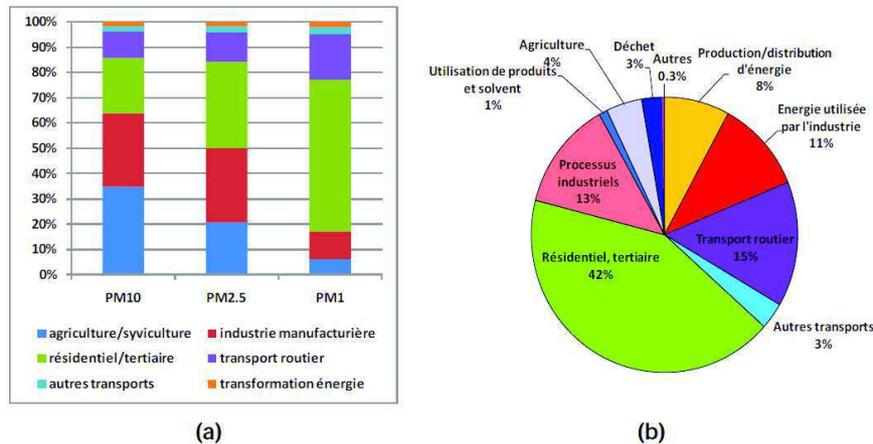


FIGURE 1.6: Contributions relatives des principaux secteurs (a) aux émissions de PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁ en France; (b) aux émissions de PM_{2,5} en Europe [13]

Il convient de noter qu'à une échelle plus locale, comme celle d'une agglomération, le poids relatif de ces différentes contributions peut être très différent.

1.2.4.1 Sources de particules primaires

- Sources anthropiques Les quatre grandes sources anthropiques d'émission de particules primaires sont les activités industrielles, les transports, le secteur résidentiel et tertiaire et le secteur de l'agriculture (en particulier les remises en suspension lors du travail des terres agricoles). Ce dernier secteur contribuerait surtout au budget de PM₁₀, beaucoup moins de PM_{2,5}.

– **Activités industrielles** : Les émissions industrielles de particules atmosphériques sont principalement le résultat de quatre mécanismes :

- Combustion de combustibles dans des installations industrielles ou commerciales.
- Broyage ou concassage de matériaux tels le ciment mâchefer.
- Évaporation de composés peu volatils depuis des matériaux chauffés comme des verres ou des métaux non-ferreux.
- Entraînement dans des écoulements gazeux de particules fines provenant de gouttelettes asséchées.

D'après le dernier inventaire du CITEPA (2010), le sous-secteur des minéraux non métalliques et des matériaux de construction représente à lui seul près de la moitié des émissions de l'industrie manufacturière.

– **Transports** : Les émissions des transports routiers comportent les émissions à l'échappement et les émissions « hors-échappement ». Ces dernières recouvrent les émissions associées à l'abrasion, l'usure et la corrosion des pneus, des freins, du châssis, des catalyseurs et de la chaussée et celles dues à la resuspension par le trafic des particules accumulées sur la chaussée.

Des travaux récents ont montré que les émissions de PM_{10} liées à la resuspension sont du même ordre de grandeur, voire supérieures à celles émises à l'échappement, [14, 15] tandis que les émissions associées à l'abrasion des matériaux seraient plus faibles. En zones urbaines, les émissions de PUF sont dominées par les transports routiers.

Les émissions particulières des autres modes de transports - maritimes, aériens et ferroviaires- d'une part, et des engins de construction et d'usage agricole d'autre part, commencent à être documentées [16]. Pour la France et l'Europe, les inventaires du CITEPA et EMEP-CORINAIR (figure 1.6) montrent de plus faibles émissions que celles des transports routiers tandis que, d'après un inventaire récent, la somme des émissions totales de particules à l'échappement des engins de construction et des engins agricoles serait équivalente à celle des transports routiers. [17]

– **Chauffage domestique** : Certains types de chauffage émettent plus de particules par quantité de carburant consommé que les émissions industrielles en raison de la plus faible efficacité de la combustion et de l'absence de systèmes de traitement des fumées. La quantité de particules émise va dépendre du combustible et du type d'appareil de combustion utilisé, notamment pour le chauffage au bois. Les travaux de recherche de sources ont révélé l'importance de ces émissions dans certaines régions en période hivernale. [18]

- **Secteur agricole** : En plus des émissions de particules à l'échappement des engins agricoles, les émissions agricoles incluent la mise en suspension de particules depuis les terres agricoles et les émissions de particules par les élevages d'animaux. Les émissions des cultures représenteraient les deux tiers des émissions de PM_{10} du secteur agricole (inventaire CITEPA). Les épandages d'engrais chimiques sont à l'origine de concentrations élevées en nitrate particulaire au printemps.
- Sources naturelles : Les sources naturelles peuvent contribuer de façon significative aux niveaux de concentrations de Particulate matter (PM), avec pour certaines un impact régional substantiel (transport à longues distances). Annuellement et à l'échelle mondiale, la production de particules naturelles est estimée à environ $2096 \times 10^6 t$. [19]

Il est possible de citer, pour les plus importantes, les embruns marins, les feux de forêt, la mise en suspension de poussières par le vent et les éruptions volcaniques. Les émissions de ces sources sont difficiles à quantifier d'autant plus que la plupart sont aléatoires tant en fréquence qu'en quantité, mais il existe des estimations satellitaires. Leurs impacts sur les concentrations en PM_{10} sont généralement évalués par les travaux de recherche sur les sources. [20]

Cependant, en général, on attribue une importance moindre à la pollution due aux sources naturelles et ce, à cause de la faible nocivité des substances qu'elle produit généralement et qui se transforment assez rapidement en composés inoffensifs entrant dans les cycles biologiques naturels. De surcroît, ces particules proviennent de sources émettrices dispersées et souvent éloignées des grandes agglomérations urbaines. [19]

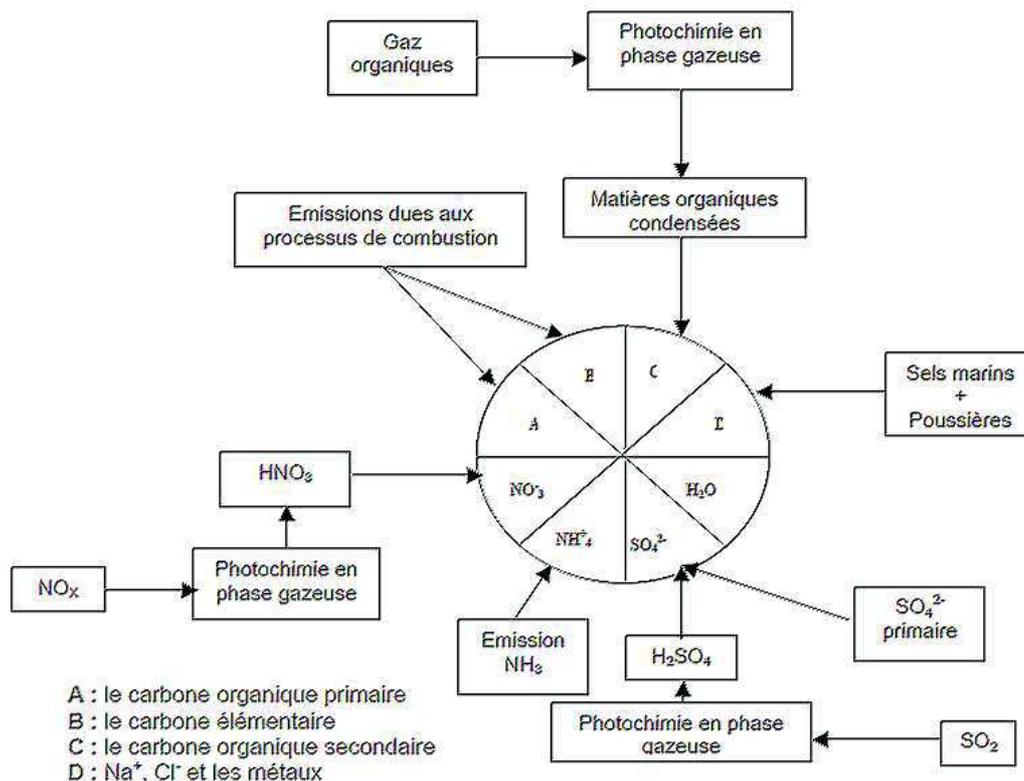


FIGURE 1.7: Composition de l'aérosol atmosphérique et ses principales sources [21]

1.2.4.2 Sources de particules secondaires

Les particules secondaires sont formées par des processus de conversion gaz / particules, faisant suite à la formation de produits de faible volatilité ou de forte solubilité à partir de l'oxydation en phase gazeuse ou en phase hétérogène des gaz précurseurs. Les composés majeurs de l'aérosol secondaire sont le sulfate, les nitrates et l'ammonium pour l'aérosol inorganique. L'aérosol organique secondaire est constitué d'une multitude de composés organiques pour la plupart non-identifiés. L'aérosol secondaire va constituer une forte proportion de l'aérosol régional dont les concentrations vont être assez homogènes sur de grandes zones géographiques.

- Le précurseur majeur des sulfates est le SO_2 qui provient principalement de la combustion de combustibles solides et de produits pétroliers, principalement pour la production d'énergie (71 % des émissions pour la distribution et 13 % pour l'industrie). [13]
- Les nitrates sont des produits de l'oxydation des oxydes d'azote qui proviennent principalement de la combustion de carburants fossiles.

- Le précurseur de l'ammonium est l'ammoniac (NH_3) qui est principalement émis par des sources agricoles (à 94 %) dont l'élevage (décomposition de l'urée et de l'acide urique). NH_3 est le gaz alcalin le plus abondant de l'atmosphère et en conséquent il joue un rôle important dans la neutralisation des aérosols acides conduisant à la formation de sulfate et de nitrate d'ammonium à l'origine de nanoparticules. Aussi, NH_3 est un des acteurs du processus de nucléation ternaire des sulfates conduisant à la formation de nanoparticules. Le nitrate d'ammonium est un composé semi-volatile dont la présence sous forme gazeuse ou particulaire va dépendre de la température, de l'humidité relative et des concentrations ambiantes.
- L'aérosol organique secondaire (AOS) est formé par oxydation de (Composés organiques volatils (COV)) ou (Composés organiques semi-volatils (COSV)) générant ainsi des composés oxygénés de plus faible volatilité ou de plus forte solubilité. Les produits de l'oxydation sont des composés de plus fort poids moléculaires, contenant un ou plusieurs groupements fonctionnels polaires. Les COSV de l'(Aérosols organiques primaires (AOP)) sont oxydés après évaporation lors de leur dilution dans l'atmosphère pour contribuer à l'AOS [12]. Les voies de formation en phase condensée et à l'interface gaz-liquide peuvent impliquer des petits COV (tel le glyoxal CHOCHO et ses précurseurs) qui s'associent à d'autres composés organiques pour contribuer à la masse d'AOS. [22]

Le tableau 1.2 présente une estimation des émissions globales des particules primaires et secondaires selon leur source.

TABLE 1.2: Estimation des sources d'aérosols primaires et secondaires en Mt/an parmi les sources naturelles et anthropiques d'aérosols [11]

Sources d'aérosols	Emissions totales (particules de diamètre inférieur à 25 μm)	Emissions de particules submicroniques ($d < 1 \mu\text{m}$)
Anthropiques		
Primaires		
Poussières industrielles	40-130	20-65
Suies	10-30	10-30
Combustions de biomasse	50-190	50-190
Poussières éoliennes	820	140
Conversion gaz-particules		
SO ₂ (chaudières, usines)	120-180	120-180
NO _x (trafic routier, usines)	20-50	5-10
COV anthropiques	5-25	5-25
Total sources anthropiques	1 065-1 325	565-640
Naturelles		
Primaires		
Poussières éoliennes	1 000-3 000	265
Feux de Forêt	3-150	2-75
Sels marins	1 000-10 000	20-100
Volcans	4-10 000	0,4-100
Aérosols organiques	26-50	
Conversion gaz-particules		
DMS, H ₂ S	60-110	60-110
SO ₂ volcanique	10-30	10-30
NO _x biogénique	10-40	10-40
COV biogénique	40-200	40-200
NH ₃ en NH ⁺ ₄	80-270	80-270
Total sources naturelles	2 233-23 850	397-1 390

1.3 Les mécanismes de transport des particules

Les phénomènes de pollution atmosphérique se manifestent principalement dans la plus basse couche de l'atmosphère : la troposphère et plus particulièrement au sein de sa couche limite. Elle peut aussi se manifester, moins fréquemment, dans la stratosphère dans le cas de polluants ayant une durée de vie plus longue [23]. Les niveaux de particules dans l'air dépendent de leur nature (primaires ou secondaires) et des conditions de rejet de ceux-ci dans l'atmosphère (intensité de la source, météorologie, etc.). La figure 1.8 représente les mécanismes qu'il est possible de caractériser en quatre grandes phases : les émissions, la diffusion ou le transport, la transformation et la dépollution de l'air.

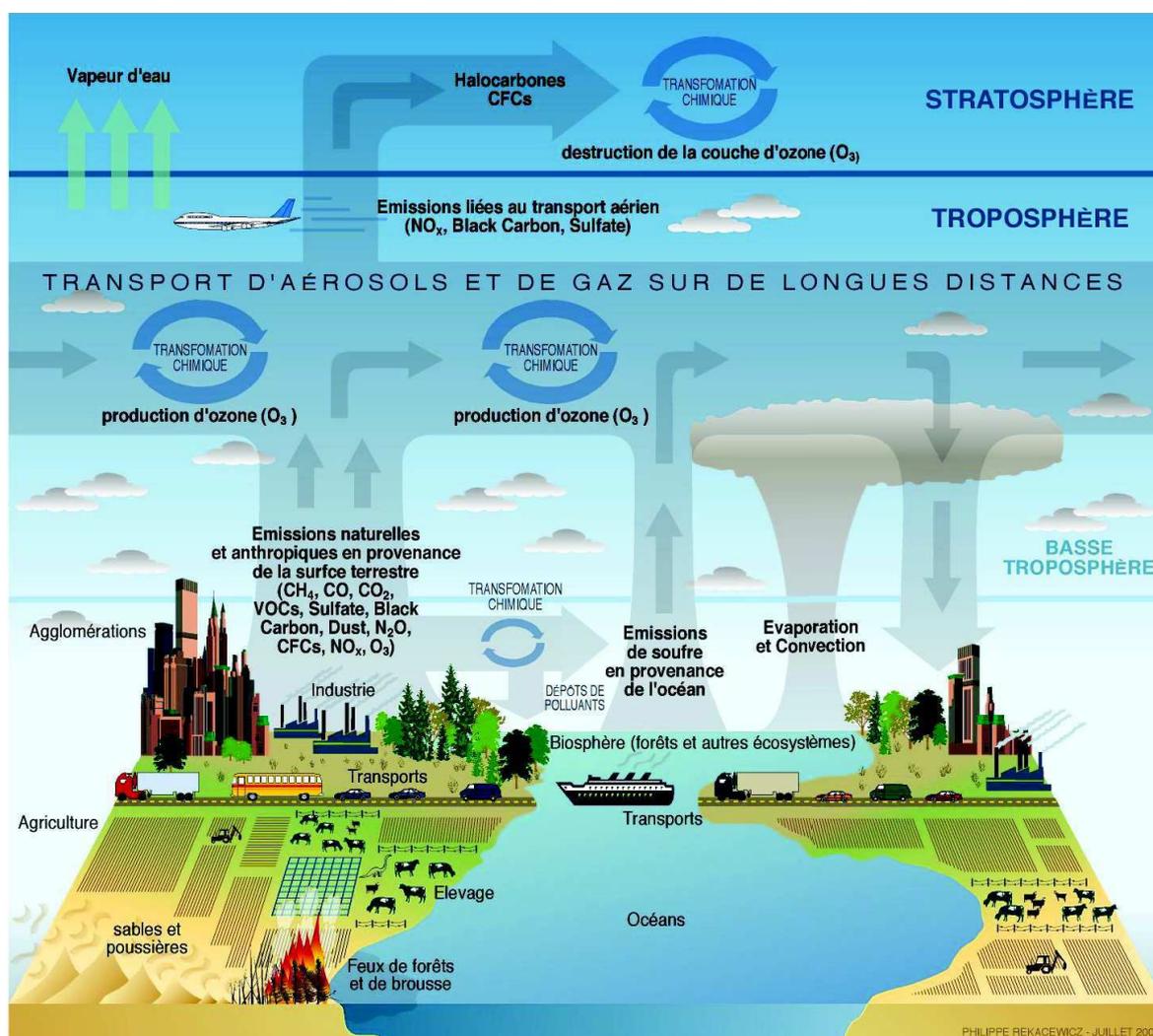


FIGURE 1.8: Les mécanismes de la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique par les particules se manifeste, tout d'abord, en fonction des émissions de particules primaires dans l'air. L'intensité de ces sources va conditionner la présence plus ou moins prononcée de ceux-ci dans l'atmosphère. Ces particules sont directement reliées à leurs sources qui peuvent être soit diffuses (circulation automobile), ou ponctuelles (installations industrielles, chauffage résidentiel). Ces émissions ont un impact direct sur la qualité de l'air (QA) à proximité des sources d'émissions. Une fois les particules libérées dans l'atmosphère, des processus mécaniques et chimiques vont régir le transport ou la diffusion des polluants (vents, turbulences, gradients thermiques). Ceux-ci sont principalement de deux origines : dynamique due aux vents, au relief et aux obstacles naturels ou anthropiques ; ou thermique due à la variation de la température de l'air (gradients thermiques et de pression). A cette étape, les particules vont progressivement s'éloigner de la source d'émission.

Néanmoins, cette capacité des polluants à se déplacer sur de plus ou moins longues distances tient compte de leur temps de résidence. Plus la durée de vie d'un polluant est longue, plus il pourra se déplacer sur de longues distances, à l'inverse plus sa durée de vie est courte plus il sera proche de sa source d'émission [23]. On parlera de pollution de proximité à cette étape. La transformation des polluants n'intervient pas systématiquement.

Les particules primaires libérées dans l'atmosphère peuvent subir une série de transformations chimiques conduisant à la formation de particules secondaires qui se forment en présence d'autres polluants et sous l'action du rayonnement solaire, de la chaleur, ou de l'humidité. Ce processus est plus caractéristique des pollutions estivales et printanières [24]. Les deux dernières phases, en combinaison des émissions et du transport des particules, vont être plus caractéristiques de la pollution de fond urbaine et régionale. La phase de dépollution intervient en dernier lieu et correspond au dépôt des polluants sous deux formes : secs ou humides. [25]

- Les dépôts secs correspondent aux retombées au sol sous l'effet de la diffusion, des turbulences atmosphériques ou de la gravité. Le temps de séjour des particules dans l'air est très variable et dépend de leurs caractéristiques physico-chimiques. Par exemple, les particules de taille inférieure au micromètre, donc très légères, peuvent rester plusieurs semaines dans l'atmosphère. [24]
- Les dépôts humides englobent, quant à eux, les retombées de particules se faisant sous l'action des précipitations (pluies, neige, brouillard, etc.). Lors de la tombée des précipitations, celles-ci vont lessiver l'atmosphère en interceptant et entraînant les particules au sol. On estime qu'environ un tiers des polluants présents dans l'atmosphère retourne au sol sous cette forme. [23]

1.4 Les facteurs climatologiques influençant la pollution atmosphérique

Les facteurs climatiques jouent un rôle primordial sur les épisodes de pollution dont les concentrations de polluants évoluent au fil des mois et des journées. Ils permettent de mettre en évidence une influence directe ou indirecte des sources d'émissions à la pollution atmosphérique [26]. Deux problématiques climatiques ressortent : les conditions saisonnières et les conditions météorologiques jouant, respectivement, un rôle à moyen et à court terme sur les épisodes de pollution atmosphérique. [23]

1.4.1 Le rôle des conditions saisonnières sur le long-terme : Le cycle annuel

La pollution atmosphérique se manifeste toute l'année, quelle que soit la saison. Toutefois, certains épisodes apparaissent plus particulièrement à certaines saisons. Ainsi, il est possible de distinguer deux épisodes de pollution qui sont la conséquence des conditions saisonnières jouant un rôle à moyen terme sur la QA. En fonction de la saison, la contribution du transport routier par exemple, à la pollution peut être directe ou indirecte. C'est en situation hivernale que la contribution du transport routier est la plus directe, à l'inverse lors des périodes estivales, la contribution du transport routier est plus indirecte. C'est pourquoi, nous pouvons distinguer deux types de pollution liée à la variabilité saisonnière (figure 1.9).

- La pollution photochimique : La pollution photochimique, ou la pollution à l'ozone, se produit essentiellement en été. Notamment provoquée par les fortes températures estivales et la circulation automobile en ville, elle se manifeste en cas de fort ensoleillement et de stagnation de l'air [24]. Les concentrations d'ozone sont donc les plus importantes au cours des après-midi estivales allant de Mai à Septembre.
- La pollution acido-particulaire : En hiver, les épisodes de pollution ne sont pas la conséquence de la transformation des polluants primaires. On parle de pollution acido-particulaire caractérisée par la présence de NO_x, SO₂ et particules [23]. Elle se manifeste, entre autres, par des émissions de polluants, en présence d'inversion thermique et en situation anticyclonique favorisant ainsi la concentration des polluants dans l'air. En ville, en combinaison d'un trafic routier important, ce phénomène peut entraîner des pics de pollution très importants. L'inversion de température est un événement météorologique plus particulier [25]. En temps normal, la température de l'air décroît avec l'altitude, ce qui favorise la dispersion des polluants. En situation d'inversion de température, à partir d'une certaine altitude, la température croît. Cette inversion de température agit un peu comme

un couvercle. Cette situation est très défavorable à la dispersion verticale des polluants qui sont alors bloqués à basse altitude. La pollution hivernale se caractérise spécifiquement par une concentration importante de polluants primaires dans l'air provenant de sources multiples.

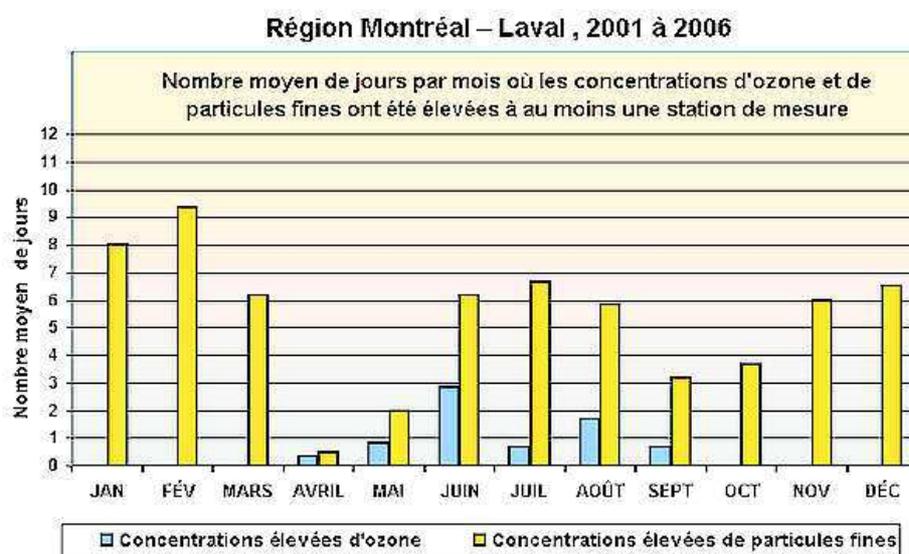


FIGURE 1.9: Impact de la variation saisonnière sur la concentration d'ozone et de particules à Montréal

Toutefois, outre l'influence à moyen terme des conditions saisonnières, d'autres variables météorologiques influent sur les concentrations des particules au cours d'une même journée. Plus spécifiquement liées aux conditions météorologiques locales comme le vent, les précipitations, ou les températures. Ces facteurs vont influencer à court terme la concentration, ou non, des particules dans l'atmosphère.

1.4.2 Le rôle de la météorologie sur le court-terme : Le cycle journalier

Comme cité dans 1.3 la dispersion des particules émis dépend de phénomènes se manifestant dans les plus basses couches de l'atmosphère.

Différents processus météorologiques jouent ainsi un rôle sur les polluants atmosphériques au cours d'une même journée [23, 25] :

- La pression atmosphérique : Elle se traduit par deux situations : les situations dépressionnaires traduisent une turbulence de l'air dont les conditions sont relativement favorables à la dispersion des particules. A l'inverse, lors de situations anticycloniques la stabilité de l'air ne limite pas la dispersion des polluants et favorise le développement d'épisodes de pollution atmosphérique.

- Les gradients thermiques : La pression atmosphérique varie rapidement en fonction de l'altitude. Le gradient thermique permet de déterminer si l'air est stable ou instable. Celui-ci favorise ou non la dispersion des particules en altitude par un mécanisme physico-chimiques des particules. On va parler de gradient adiabatique de l'air qui est soit humide soit sec. Ce phénomène traduit la variation de la température de l'air avec l'altitude jouant un rôle sur la diffusion et le transport des polluants [23]. Ainsi, pour un air sec, le gradient thermique de l'air est de $0,98\text{ }^\circ\text{C}$ tous les 100 mètres d'altitude et à l'inverse, pour un air humide il est de $0,65\text{ }^\circ\text{C}/100$ mètres.
- Le vent : un facteur essentiel pour la dispersion des particules dans l'atmosphère. Il agit sur la dispersion des polluants dans deux dimensions : par sa direction, orientant le transport et par sa vitesse favorisant une dispersion plus ou moins rapide.
- La turbulence de l'air : L'agitation et le mélange des différentes portions des masses d'air ayant des caractères différents, sous forme de tourbillons qui s'interpénètrent, ont été nommés turbulence. Ce phénomène est le résultat de certains processus mécaniques complexes provoqués par des différences de température, mouvement et frottement. La diffusion et la dilution des polluants dans la masse d'air se réalisent sous son influence d'autant plus rapidement que la turbulence est proportionnelle à la vitesse du vent, compte tenu de l'existence de constructions au sol, des différences de relief et de la capacité d'emménagement de la chaleur. La turbulence minimum se rencontre au-dessus des grandes surfaces lisses et homogènes : mers, massifs forestiers, etc.
- La température et le rayonnement : Comme cité précédemment au sujet des influences saisonnières, ces facteurs favorisent la transformation des polluants. De basses températures favorisent la présence et la concentration de particules primaires, alors qu'à l'inverse des températures plus importantes combinées à un rayonnement solaire sont plus favorables à la réaction photochimique.
- Les précipitations : La pluie, la neige et les autres formes de précipitations atmosphériques réalisent le lavage, l'absorbance et l'entraînement vers le sol des impuretés de l'air de façon d'autant plus marquée que la durée et l'intensité de ces précipitations sont plus grandes. A cause de cela, l'atmosphère peut être considérée comme pure après une période suffisamment longue de précipitations. La pluie réalise le lavage de l'atmosphère, spécialement des gaz, et la neige des impuretés solides. Les précipitations sont insuffisantes pour épurer l'atmosphère des particules plus petites que $2\text{ }\mu\text{m}$. [1]

- L'humidité : La présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère est considéré comme un facteur météorologique défavorable au phénomène d'autopurification parce qu'elles empêchent la diffusion des impuretés et qu'elles réagissent avec celles-ci de telle sorte que peuvent en résulter des impuretés plus agressives. Une humidité élevée favorise la formation du brouillard et la concentration des impuretés. Les oscillations inégales de température des particules de l'air par rapport à celles du reste de la masse d'air, donnent lieu à des condensations de vapeurs sur ces particules qui servent des noyaux de condensation. Ceci favorise la formation du brouillard qui prend naissance même sans que soit atteint le niveau de saturation de l'humidité.
- Les nuages : L'existence d'un plafond compact et stagnant de nuages, à une altitude peu élevée, crée un espace fermé dans lequel la dilution des impuretés ne se produit plus dans des conditions satisfaisantes. Plus cela dure, plus cela se répète souvent au cours de l'année et plus la pollution est grande. Il existe des années et des périodes où les nuages se trouvent fréquemment à faible altitude, empêchant le phénomène d'autopurification.

Chapitre 2

Nuisances par la pollution particulaire

2.1 Généralités

Une pollution devient une nuisance dès le moment où elle nuit à son environnement dans le sens le plus large. Cet environnement comprend l'homme, la vie animale et végétale, les bâtiments et constructions.

Une personne adulte respire en moyenne, au repos, 15 m³ d'air par jour. Le système respiratoire est l'organe cible par excellence des polluants atmosphériques. Les particules fines et ultrafines peuvent pénétrer dans l'organisme à travers les poumons, la peau ou la paroi intestinale ; chacun présentant une barrière à cette pénétration. [27]

Ces particules présentes dans l'atmosphère proviennent de la combustion d'hydrocarbures, charbon et bois. L'exposition de longue durée à ces particules représente, selon les auteurs, le risque sanitaire le plus important de pollution par l'air ambiant. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) estime que 102.000 à 368.000 décès de personnes âgées de 35 ans et plus, vivant dans des villes européennes sont imputables, chaque année, à une exposition prolongée de ces particules en suspension. Des études ont permis d'établir une causalité entre l'apparition de symptômes bronchiques chez les enfants, la diminution de la fonction pulmonaire chez les enfants et les adultes et des niveaux de pollution de l'air ambiant.

L'épidémiologie de la pollution de l'air a abordé plusieurs problèmes de santé : mortalité et morbidité, infections aiguës, cancer des poumons, déficit des fonctions pulmonaires, hospitalisation, maladies respiratoires chroniques, et anomalies reproductives [28]. Des associations ont également été observées entre la pollution de l'air et une espérance de vie réduite, une augmentation de la mortalité quotidienne, des admissions à l'hôpital, l'apparition de crises d'asthme[29].

Les personnes les plus à risques sont les enfants, parce qu'ils respirent plus vite, se trouvent plus près du sol et ont des alvéoles pulmonaires encore en développement, et les personnes âgées, qui ont une capacité ventilatoire diminuée. Certaines professions (chauffeurs routiers, employés de péage, mineurs de charbon) ainsi que les personnes souffrant d'asthme, d'une maladie cardiovasculaire, d'une maladie respiratoire comme une broncho pneumopathie chronique sont les plus sensibles aux effets néfastes sur la santé des particules fines. [27]

2.2 Effet sanitaire

2.2.1 Exposition aux particules

L'appareil respiratoire peut se subdiviser en trois parties principales : le naso-pharynx, partie supérieure, le segment trachéo-bronchique et dans la partie inférieure, le segment pulmonaire (figure 2.1). Les particules de taille supérieure au PM_{10} sont captées au niveau du segment naso-pharyngien puis évacuées par mouchage ou déglutition. Les particules grossières dépassent cette première barrière pour pénétrer jusqu'au segment trachéo-bronchique. Ce segment est protégé par les cellules ciliées et des cellules caliciformes produisant du mucus. Dans un mouvement ondulatoire, les poils des cellules ciliées transportent le film muqueux et les corps étrangers qui y sont englués jusqu'au pharynx où ils sont déglutis en permanence. Certains polluants, comme la fumée de tabac, peuvent contrarier l'efficacité de ce système de défense. Les particules fines peuvent pénétrer dans le système respiratoire jusqu'aux alvéoles terminales et être transférées au sang, jusqu'à atteindre des organes vitaux tels que les reins, le foie, etc. Comparativement à un adulte, la proportion de particules fines qui parviennent jusqu'aux alvéoles est trois fois supérieure chez les enfants et jusqu'à huit fois chez les nouveau-nés car chez eux, l'arbre respiratoire n'est pas autant ramifié. [30]

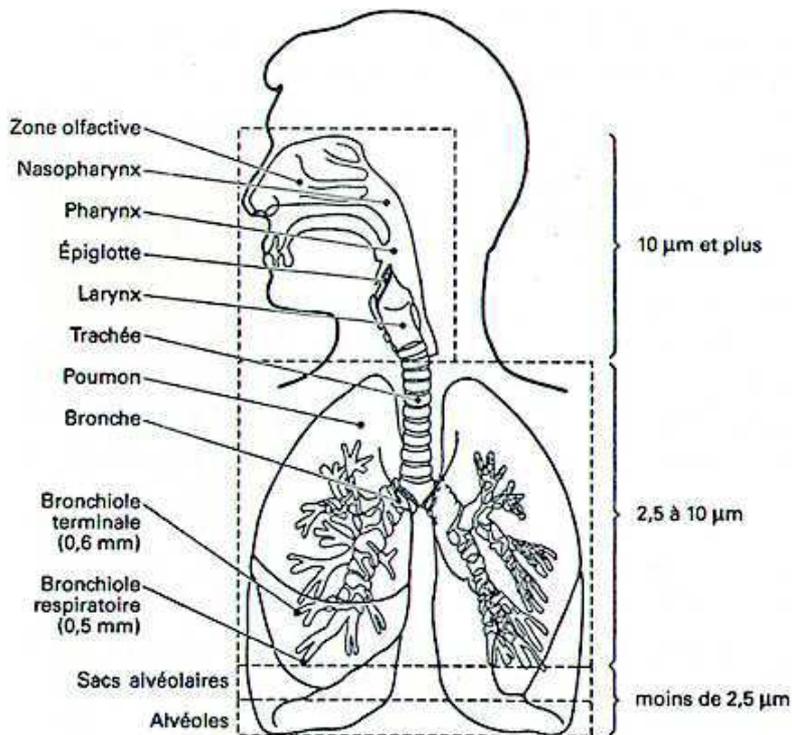


FIGURE 2.1: Niveau de déposition des particules inhalées dans l'appareil respiratoire selon leur taille

2.2.2 Répercussions de l'inhalation des particules

Les effets des particules PM_{10} et $PM_{2,5}$ ont largement été étudiés ces deux dernières décennies. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), il apparaît suite aux études épidémiologiques qu'il n'existe pas de seuil ou de concentration minimale en deçà de laquelle il n'y aurait pas d'effet significatif sur l'augmentation de la mortalité. La relation entre les concentrations des contaminants et les effets sur la santé est en effet linéaire [31]. Les études ont également mis en évidence des liens à court-terme et à long-terme entre les concentrations ambiantes des particules et les aggravations, pouvant aller jusqu'au décès, des pathologies cardio-respiratoires.

- Répercussions immédiates : Les particules fines provoquent des manifestations respiratoires survenant quelques jours à quelques semaines après leur exposition. Elles sont également responsables d'une réaction inflammatoire au niveau des bronches, aggravant des signes cliniques préexistants tels que l'asthme ou les déclenchant. Plusieurs études ont également attribué l'augmentation de la concentration des particules à des manifestations telles que l'augmentation du nombre de consultations, d'hospitalisations et la fréquence de décès prématurés d'adultes âgés[32].

- Répercussions sur le long terme : Une exposition régulière aux particules fines est responsable d'une diminution de l'espérance de vie, d'une augmentation des cancers bronchiques et de maladies cardio-vasculaires.

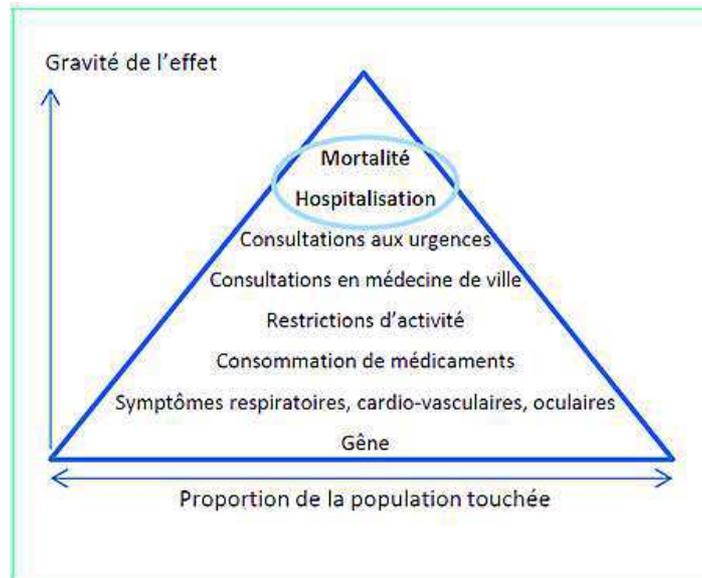


FIGURE 2.2: Pyramide des effets sanitaires de la pollution atmosphérique

Des études épidémiologiques en France ont démontré un lien direct entre les concentrations ambiantes des particules et les différents types de maladies, qui peuvent être regroupées comme suit :

- Maladies cardiovasculaires : Dans l'hypothèse d'un passage des particules dans le sang, elles pourraient avoir des effets directs sur les cellules endothéliales, les plaquettes sanguines et les plaques d'athérome et être ainsi directement à l'origine des accidents cardiovasculaires dont l'incidence est augmentée lors des pics de pollution particulaire. Les particules les plus fines seraient plus dangereuses pour le système cardiovasculaire car elles sont en plus grand nombre pour une masse plus faible, elles comportent une quantité plus grande de composés à activité redox à leur surface et elles ont une rétention pulmonaire plus longue. [33] Les études ont montré une augmentation des risques de certaines maladies telles que les insuffisances cardiaques, les cardiopathies ischémiques, la thrombose, la modification de la pression artérielle, l'infarctus du myocarde ou les maladies cérébro-vasculaires.
- Pathologies pulmonaires : Les particules fines sont également à l'origine d'autres pathologies pulmonaires, comme l'asthme et la Bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO). En effet, plus elles sont fines, plus les particules en suspension dans l'air sont agressives et rentrent loin dans les bronches, créant une inflammation. Les bronches s'épaississent alors et sécrètent des glaires qui rendent difficile la circulation de l'air et provoquent l'essoufflement.

- Pathologies pulmonaires : Les particules fines sont également à l'origine d'autres pathologies pulmonaires, comme l'asthme et la BPCO. En effet, plus elles sont fines, plus les particules en suspension dans l'air sont agressives et rentrent loin dans les bronches, créant une inflammation. Les bronches s'épaississent alors et sécrètent des glaires qui rendent difficile la circulation de l'air et provoquent l'essoufflement. Les particules fines ont été reconnues responsables du cancer du poumon par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en 2012.

Evaluation publiée par l'Organisation mondiale de la santé en mars 2014 - Burden of disease from ambient and household air pollution

L'évaluation comporte une ventilation des décès attribués à ces maladies, indiquant que la grande majorité des décès liés à la pollution atmosphérique sont dus aux maladies cardiovasculaires :

Décès dus à la pollution extérieure :

- 40 % – cardiopathies ischémiques ;
- 40 % – accident vasculaire cérébral ;
- 11 % – bronchopneumopathies chroniques obstructives (BPCO) ;
- 6 % - cancer du poumon ;
- 3 % – infections aiguës des voies respiratoires inférieures chez l'enfant.

TABLE 2.1: Effets sanitaires des polluants de l'atmosphère

Polluant	Effet	Source
CO	Le CO est mortelle au-delà de 1000 ppm, il agit à des teneurs beaucoup plus basses, par son affinité pour l'hémoglobine du sang, 210 fois plus élevée que celle de l'oxygène. Quand il est inhalé, le CO entre dans la circulation sanguine et peut provoquer des troubles dans l'oxygénation des tissus. Certains effets neurologiques peuvent être observés : diminution de l'apprentissage, réduction de la vigilance et de la dextérité manuelle, capacité moindre à accomplir des tâches complexes et troubles du sommeil. A des concentrations entre 2,9 et 4,5%, des troubles cardiovasculaires peuvent se développer chez les personnes à risque, les personnes âgées, les enfants et les fœtus. Le CO peut aussi présenter une toxicité à long terme. L'intoxication chronique se traduit par des symptômes non spécifiques : maux de tête, vertiges, nausées quand il atteint 20 % d'hémoglobine et même des pertes de conscience dangereuses quand ce taux atteint 50%, la mort survenant pour 70%.	[34]
SO ₂	Le SO ₂ est un irritant modéré fortement hydrophile et donc facilement dissous dans le mucus nasal, avec peu de risque d'atteinte des poumons. Dans les tissus, il se transforme en bisulfate et, après oxydation enzymatique, est éliminé par les reins sous forme de sulfate. Il agit par contre sur les mécanismes de défense et peut ainsi potentialiser les effets d'autres polluants (NO ₂ , HAP, métaux).	[34]
COV	Certains composés organiques tels que les aromatiques, les oléfines provoquent des irritations des yeux. Les aldéhydes sont de puissants irritants des muqueuses. Certains COV tels que le benzène, sont cancérigènes.	[35]
Les particules Diesel	Les particules de suie du diesel, le benzène, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) font partie des polluants atmosphériques cancérigènes. Ils sont toxiques pour l'homme à partir de doses infimes. Elles ont une double action liée aux particules proprement dites et aux polluants qu'elles transportent (métaux, hydrocarbures, dioxyde de soufre, etc.). Une concentration seuil de non-toxicité n'existant pas. Selon un rapport d'experts publié en Allemagne, les particules de suie du diesel contribuent pour 60 à 70 %, les HAP pour 15 % et le benzène pour 10 % au risque de cancer provoqué par les polluants atmosphériques [9]. Une étude menée aux États-Unis a clairement démontré la relation entre la charge de PM _{2,5} et la mortalité due au cancer des poumons.	[34]
Polluants organiques persistants (POP)	Les conséquences de la présence de POP observées chez l'homme sont : cancers et tumeurs, troubles du système nerveux, déficiences du système immunitaire, augmentation de cas de stérilité et modification de comportements sexuels, diminution de la production de lait chez les mères, augmentation des maladies type diabète, etc.	[34]

L'impact sanitaire de la pollution atmosphérique extérieure est donc important et multifformes. Il se traduit ainsi soit par des effets de court terme, soit de long terme, soit en devenant un facteur d'aggravation de pathologies déjà existantes ou de fragilisation des populations les plus vulnérables. En outre, cet impact, dans toute son ampleur, est très certainement aujourd'hui largement minimisé dans la mesure où l'on ne connaît pas la part attribuable à ce qu'on appelle « l'effet cocktail », c'est-à-dire le mélange de polluants atmosphériques ou de plusieurs types de pollutions dans l'air extérieur. Cette part n'étant pas prise en compte, il est raisonnable de penser que l'impact sanitaire est beaucoup plus important que ce que l'on sait aujourd'hui mesurer.

2.2.3 Les incertitudes de « l'effet cocktail »

Le spectre limité des polluants étudiés ne garantit pas une prise en compte satisfaisante de l'impact sur la santé humaine de la pollution atmosphérique. L'effet combiné des différents types de pollution, que l'on appelle aussi « l'effet cocktail » reste encore inconnu. [36]

Par exemple, une récente étude internationale menée en Chine et publiée le 25 Août 2014 dans la revue américaine PNAS montre que les polluants émis par les pots d'échappements combinés au carbone suie provoqué par la combustion domestique de bois ou de charbon augmente la pression artérielle.

De plus en plus de travaux sont menés sur l'évaluation des risques sanitaires provoqués par des substances chimiques en mélange. Des effets additifs, synergiques, antagonistes, de potentiation ou d'indépendance sont observés par les chercheurs.

2.3 Effet sur la faune et la flore

La pollution de l'air peut créer des troubles graves dans les mécanismes régulateurs des fonctions qui régissent la vie d'une plante (nutrition, croissance, reproduction). Les polluants pénètrent dans les végétaux par les stomates et les lenticelles des feuilles, ou indirectement par le sol. L'obstruction des stomates, par les fines particules, provoque un lent dépérissement des végétaux.

La pollution de l'air affecte la santé de nombreux êtres vivants évolués, et même d'espèces réputées primitives et résistantes (lichens, algues, invertébrés.). Elle peut directement tuer des organismes (ex. : lichens sensibles à la pollution acide de l'air). Elle a aussi des impacts indirects (par exemple en dégradant les odeurs, fragrances florales, hormones ou phéromones avant qu'elles atteignent leurs cibles), ce phénomène pouvant pour partie expliquer le déclin de certaines populations pollinisatrices (dont certains oiseaux, chauve-souris nectarivore) constaté dans tous les pays industriels et agricoles. Il pourrait aussi expliquer les difficultés qu'ont les individus de certaines espèces (lézards, serpents, amphibiens, certains mammifères) à se reproduire (mâle et

femelles ne se retrouvant plus ou moins bien) ou de certaines espèces à se nourrir (l'individu ne percevant plus aussi bien l'odeur qui le conduisait à sa source de nourriture). Certaines phytohormones pourraient moins bien jouer leur rôle de médiateur biochimique, rendant certains végétaux plus fragiles et vulnérables à leurs prédateurs. Les relations prédateurs-proies pourraient être également affectées là où l'air est pollué. Les pluies acides se combinent avec l'exposition aux embruns routiers salés, aux embruns marins pollués (biofilm) et aux polluants dont des désherbants, fongicides ou insecticides transportés par l'air puis lessivés par les pluies. Ces polluants affectent les plantes directement, ou indirectement à la suite de disparition ou régression de certains champignons, ou d'espèces pollinisatrices comme les abeilles.

Les poussières alcalines provenant des composés de calcaire traités dans une usine de ciment peuvent provoquer des troubles chez les animaux par les lésions du tube digestif. De telles indications se sont déjà produites en Allemagne[37].

Les poussières de ciment, sont également nocives pour la végétation. On relève la présence de croûtes grisâtres sur les plantes situées autour des cimenteries, d'épaisseur variable selon l'importance des retombées. Les croûtes empêchent toute fonction métabolique des feuilles qui finira par la mort des plantes[38].

Les poussières accumulées sur les feuilles des végétaux peuvent étouffer et entrave la photosynthèse. A proximité de certains sites générateurs de pollution (site industriel, grosses infrastructures routières), on observe également des baisses de rendements des terres agricoles. En outre, on peut parfois observer localement une contamination des sols où s'accumulent des métaux, comme le plomb en bordure de route.

2.4 Effet sur les matériaux

L'impact de la pollution sur le bâti par exemple, dépend du degré de sulfatation ou de carbonatation des matériaux. Le SO_2 ainsi que l'acidité de la pluie contribue à la perte de masse des calcaires, à la dégradation des édifices, monuments ou façades d'immeubles ainsi qu'à la perte de transparence du verre.

En revanche, l'impact d'autres types de polluants comme ceux émis par les transports routiers, notamment les oxydes d'azote et les particules fines constitue une inconnue importante. Enfin, une étude établissant une projection pour la fin du XXIème siècle, montre que la dissolution des façades par les eaux chargées de CO_2 devrait augmenter pour devenir supérieure à celle due au SO_2 et aux pluies acides, aussi bien dans les zones urbaines que rurales. Les concentrations atmosphériques en CO_2 deviendraient le facteur principal d'érosion des façades des bâtiments en calcaire[38].

2.5 Impacts économiques

2.5.1 Sur la santé [38]

La pollution de l'air a un coût sanitaire intangible qu'il est difficile de mesurer car, contrairement aux biens et services marchands, il n'y a pas de marché ni de prix associé à la douleur ou à un décès. Or l'économie raisonne sur des valeurs, qui peuvent être inférées à partir soit de marchés existants et de biens marchands considérés comme équivalents, soit d'autres méthodes de valorisation.

Cependant, plusieurs études sont venues approfondir cette démarche. En 2013, une commission au sein du Commissariat général à la stratégie et à la prospective (Commissariat général à la stratégie et à la prospective (CGSP)), a publié un rapport visant à mettre à jour et à enrichir les techniques d'évaluation socio-économique des projets d'investissements publics. Ce rapport a actualisé la valeur de la vie humaine et retenu un montant de 3 millions d'euros. Il refuse par ailleurs de différencier la valeur de la vie humaine en fonction de l'âge. Ainsi, l'effet consenti pour sauver une vie est rapporté à une valeur unique, quel que soit l'âge de la personne dont la vie est sauvée. Par ailleurs, ce rapport recommande une valeur de l'année de vie sauvée de 115 000 euros.

Le coût de la pollution atmosphérique pour la société dans les 34 pays membres de l'OCDE, compte tenu de la valeur que les gens attribuent au fait de ne pas mourir précocement d'un cancer, d'une maladie cardiaque ou de problèmes respiratoires, s'élève à environ 1 700 milliards de dollars ; il approche 1 400 milliards de dollars en Chine et 500 milliards de dollars en Inde.

S'agissant du coût pour le système de santé français du traitement des pathologies associées à la pollution de l'air, les différents travaux conduits, en particulier ceux de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) et du Commissariat général au développement durable (Commissariat général au développement durable (CGDD)), se corroborent pour l'évaluer entre 1 et 2 milliards d'euros par an, ce qui représente entre 15 % et 30 % du déficit de la branche « maladie » de la sécurité sociale. Ce coût inclut les dépenses d'hospitalisation, les soins de ville mais aussi les indemnités journalières versées en cas d'arrêt de travail, dont le montant peut être évalué à 165 millions d'euros par an. Il faut toutefois souligner, que ce coût est fortement sous-évalué, en raison du faible nombre de polluants ou de pathologies associées retenus par ces études et du périmètre des coûts pris en compte qui exclut un certain nombre de dépenses de santé.

Ainsi, en tenant compte des différentes limites présentées, le coût sanitaire tangible de la pollution de l'air peut être estimé à minima à 3 milliards d'euros par an.

Selon les polluants étudiés, les types de coûts et les valeurs tutélaires retenus, le coût social annuel de la pollution atmosphérique en France est estimé entre 20 et 30 milliards d'euros par le CGDD, à 50 milliards d'euros par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), ou entre 70 et 100 milliards d'euros par le programme « Clean air for Europe » mis en œuvre par la Commission européenne.

TABLE 2.2: Résumé des principales études sur le cout sanitaire de la pollution de l'air [36]

Organisme ayant conduit l'étude		Date de publication	Types de polluants étudiés	Pathologies/coûts pris en compte	Coûts annuels
<i>Le coût de dépenses de santé</i>					
AFFSET		2007	-	Asthme Cancers	0,3 à 1,3 milliard d'euros
CGDD		2015	-	Maladies respiratoires Cancers Hospitalisations pour causes respiratoires et cardiaques	0.9 à 1.8 milliard d'euros
CNAMTS	Assurance maladie obligatoire	2015	-	Maladies respiratoires Cancer	0.5 à 1.4 milliard d'euros
	Travailleurs exposés			Maladies professionnelles	1 milliard d'euros
<i>Le coût socio-économique</i>					
APHEKOM		2012	Ozone PM ₁₀ PM _{2,5}	Décès différés Hospitalisations évitées	4,8 milliards d'euros
Anses-OQAI		2014	PM ₁₀ et PM _{2,5} CO TCE Radon Benzène Fumée de tabac environnemental	Coûts de mortalité Coûts de morbidité tangibles et intangibles Coût des pertes de production Coûts des politiques de lutte contre la pollution	19 milliards d'euros
OMS-OCDE		2015	PM _{2,5}	Décès prématurés Coûts de morbidité	48 milliards d'euros

2.5.2 Sur l'environnement [38]

La pollution de l'air n'est pas seulement responsable de dommages sanitaires. Elle a également des conséquences non sanitaires directes qui ont un coût économique certain. Il s'agit en particulier de la dégradation du bâti, qui entraîne des coûts de réparation et de nettoyage des bâtiments, de la baisse des rendements des cultures agricoles et de la dégradation des écosystèmes.

En sommant les données les plus tangibles s'agissant du coût économique de l'impact de la pollution de l'air sur les rendements agricoles et sur les bâtiments, ainsi que les coûts liés aux politiques de prévention et de surveillance de la qualité de l'air, un premier chiffrage permet d'estimer à minima le coût non sanitaire de la pollution de l'air à 4,3 milliards d'euros par an en France.

2.6 Effet des métaux lourds

Les métaux lourds peuvent être absorbés directement par le biais de la chaîne alimentaire entraînant alors des effets chroniques ou aigus : Ils remplacent ou substituent les minéraux essentiels, changent notre code génétique, produisent des radicaux libres, neutralisent les acides aminés utilisés pour la détoxification, causent des allergies et endommagent les cellules nerveuses.

Les métaux lourds ne sont pas dégradables, sont enrichis au cours de processus minéraux et biologiques et par conséquent s'accumulent dans la nature.

- Le plomb : Inhibiteur des biosynthèses enzymatiques permettant la formation de l'hémoglobine du sang, le plomb est un des métaux ayant été à l'origine de nombreux débats et de nombreuses publications. Une des raisons étant les conséquences sur le développement psychique de l'enfant suite à des expositions à long terme à des teneurs jugées inoffensives en milieu professionnel. En effet, une fois ingéré, 94% du plomb se fixe dans les os (avec un temps de séjour de 30 ans), le reste se répartissant entre le cerveau, les muscles, les reins (2%) et le sang (4%). Le plomb est donc l'un des rares métaux à n'avoir aucune utilité biologique en tant qu'oligoélément.

La suppression progressive du plomb dans les carburants pourrait réduire de 20 à 30% la plombémie des adultes et pourrait être décisive pour certains sujets sensibles, en particulier les enfants en bas âge. [39]

- Zinc : Le zinc n'est généralement pas considéré comme un élément toxique aux concentrations rencontrées dans l'air. Présent naturellement dans beaucoup d'aliments ainsi que dans l'eau potable, il inhiberait même l'effet toxique de métaux comme le cadmium et le cuivre. Le zinc est vital et joue un rôle important dans le fonctionnement du métabolisme humain. La dose journalière de zinc recommandée est de 12 mg/jour pour une femme adulte et 15 pour un homme adulte. Une carence en zinc engendrerait une diminution des sensations de goût et d'odeur ainsi qu'un ralentissement de la cicatrisation des blessures. Un excès de zinc peut par contre provoquer des problèmes sanitaires importants tels que des crampes d'estomac, une irritation de la peau, vomissements et nausée. Il peut également provoquer une anémie, endommager le pancréas et perturber le métabolisme des protéines. [39]
- Cuivre : Le cuivre est un oligoélément indispensable à la croissance des plantes et des animaux. Chez l'être humain, il favorise la production d'hémoglobine [40]. Une absorption de 2 mg serait donc nécessaire. Chez les plantes, il joue un rôle particulièrement important dans la production de graine et la régularisation de l'eau. Il est par contre très toxique pour les champignons et les algues. Les composés solubles du cuivre forment la plus grande menace pour la santé humaine et se retrouvent dans l'environnement après y avoir été rejeté lors de son application dans l'agriculture en tant que fongicide ou agent de préservation du bois. Une concentration de cuivre très élevée peut être toxique pour les animaux, être humain y compris, et entraîne des effets délétères. La détérioration des globules rouges, des poumons, du foie et des fonctions pancréatiques est le symptôme le plus courant d'un empoisonnement par le cuivre. Une exposition au cuivre à long terme peut provoquer une irritation au nez, à la bouche et aux yeux, des maux de têtes et d'estomac, des vertiges, des vomissements et des diarrhées. La concentration en cuivre de l'air est néanmoins généralement assez faible. L'exposition au cuivre par la respiration est donc négligeable. De plus, le cuivre ne serait ni cancérogène, ni tératogène. [41]

- Cadmium : Le cadmium est un élément très toxique, une fois transporté vers le foie par le sang, il se lie aux protéines pour former des complexes transportés jusqu'aux reins où il s'accumule et endommage les mécanismes de filtration. Ce qui entraîne l'excrétion de protéines essentielles et de sucre hors de l'organisme. Le cadmium accumulé dans les reins prend beaucoup de temps avant d'être excrété du corps. Il provoque d'autres symptômes tels que la diarrhée, les douleurs d'estomac, des vomissements importants, fracture des os, échec de reproduction, problèmes au niveau du système nerveux central, du système immunitaire, altération de l'ADN et développement de cancer. Les composés du cadmium présentent des effets toxiques variables selon leur solubilité et leur facilité d'assimilation par l'organisme. Les sels de cadmium, très peu volatils, sont présents dans l'air sous forme de très fines particules solides (fumées ou poussières). L'absorption d'une petite quantité engendre des troubles gastro-intestinaux, avec possibilité de complication et de déshydratation grave de l'organisme. L'inhalation de ces substances respirables à des concentrations supérieures à 200 mg/m^3 et de façon prolongée peut provoquer des troubles pulmonaires graves.
- Cobalt : L'intoxication par le Cobalt peut entraîner des manifestations respiratoires comme les dyspnées, rhinites avec atteinte du parenchyme pulmonaire, des troubles digestifs et des dermatites allergiques. [41]
- Les autres métaux : Chrome, nickel, manganèse, métaux précieux : Le trafic automobile émet ces métaux en quantités infimes en comparaison avec les émissions actuelles du plomb. [42] Le manganèse, sous forme de l'élément ou de ses dérivés minéraux, est un des produits les moins toxiques pour les mammifères et les oiseaux [43]. A forte dose, comme dans les mines de Mg, il peut occasionner pneumonie et atteinte du système nerveux central [42]. Le nickel est considéré comme un élément carcinogène, jouant un rôle d'initiateur et de promoteur, provoquant des cancers des sinus, des fosses nasales et des branches chez les sujets fortement exposés. Les autres phénomènes constatés concernent surtout les allergies. Le chrome présente quelques analogies avec le nickel : il agit sur le foie, les reins et est aussi un élément carcinogène [44]. Les autres métaux précieux utilisés dans les catalyseurs automobiles (Pt, Pd, Rh) ne sont généralement pas considérés comme toxiques à l'état métallique et le risque de méthylation par les microorganismes est infime, d'après la National Academy of Sciences [45] seuls leurs sels, dont certains complexes chlorés pouvant provoquer des allergies [46], ont une action physiologique et sont peu employés en pharmacologie. [47]

Chapitre 3

Lutte contre la pollution particulaire

La pollution de l'air ambiant, due à des concentrations élevées de petites particules et de particules fines, est le principal risque environnemental pour la santé, elle cause plus de 3 millions de décès prématurés chaque année dans le monde. La plupart des sources de pollution de l'air extérieur en milieu urbain ne sont pas du ressort des personnes et exigent l'intervention des municipalités, ainsi que des décideurs nationaux et internationaux afin de promouvoir des modes de transport plus écologiques, une production d'énergie plus efficace et une bonne gestion des déchets.

Parmi les villes faisant l'objet d'une surveillance, plus de la moitié dans les pays à revenu élevé et plus du tiers dans les pays à revenu faible ou intermédiaire ont réduit leurs niveaux de pollution atmosphérique de plus de 5% en 5 ans. [48]

3.1 Techniques de réduction de la pollution particulaire

Ce sont donc, dans les pays industrialisés, que des efforts sont consentis afin de lutter contre la pollution particulaire. Il existe des techniques très performantes de dépoussiérage (filtres électrostatiques, filtres à manches, système de lavage, etc.) des émissions industrielles et notamment celles issues des usines d'incinération et des cimenteries. Ces techniques évoluent pour répondre aux normes d'émission qui, au fur et à mesure que l'effet des particules sur la santé est mieux connu, deviennent de plus en plus sévères.

En ce qui concerne les particules issues du trafic routier et plus particulièrement les fines particules diesel, les moyens de lutte sont plus réduits et ne se mettent que lentement en place. C'est ainsi que, des contraintes plus strictes sur la composition des carburants, notamment l'exigence d'une teneur maximale en soufre dans le diesel de 50ppm, et les caractéristiques des véhicules concourent à la baisse des concentrations de particules dans les agglomérations.

impact important réside dans la mise en place de filtres à particules diesel.

- Le filtre à particules diesel [49] : Pour réduire les émissions de suies issues des véhicules diesel, les constructeurs ont commencé récemment à équiper les véhicules haute gamme d'un filtre à particules. Filtre à particules (FAP) qui assure une oxydation continue des suies avant rejet dans l'atmosphère via le tuyau d'échappement. Le filtre à particule contient deux éléments :
 - Le filtre proprement dit, formé d'un substrat poreux résistant à la chaleur (en monolithe céramique) qui retient plus de 95% des particules des gaz d'échappement.
 - Un dispositif de régénération (électrique ou à l'aide d'additifs) qui calcine périodiquement les cendres pour maintenir une efficacité optimale.

Les filtres à particules sont conçus pour une « auto régénération » lorsqu'ils sont saturés de particules. Ce processus s'effectue par élévation de la température du flux gazeux. Lorsque celle-ci dépasse 550 ° C, les dépôts de particules commencent à se calciner. Divers procédés permettent d'atteindre la température voulue. En général, il s'agit d'injecter un additif en amont du filtre.

La combustion de ces suies et résidus d'huile produit une petite quantité de cendres qui doit être éliminée après une plus ou moins longue utilisation du véhicule (tous les 100.000 km par exemple). Avec de tels filtres, la norme Euro 4 qui fixe pour les véhicules de tourisme 0,025g PM₁₀/km et pour les poids lourds 0,03 g/kWh, est largement satisfaite. Pour illustrer l'impact positif d'une généralisation future des Filtre de particules Diesel (FPD), l'Association Transport et Environnement de la Suisse estime que si tous les véhicules lourds étaient équipés de filtres à particules, on éviterait 100 décès prématurés, 1375 cas de bronchites chez les enfants et plus de 80.000 jours d'absentéisme [50].

- Les filtres fermés : Les filtres « fermés » sont généralisés sur les véhicules neufs depuis janvier 2011. Ils permettent d'éliminer au moins 95 % en masse, et 99,7 % en nombre, des particules de plus de 23 nm (0,023 micromètres donc 100 fois plus petites que le seuil des PM_{2,5}) émises par les moteurs Diesel y compris le carbone suie, ce qui les ramène à un niveau équivalent à celui des moteurs à essence. Pour les particules de moins de 23 nm, l'efficacité des filtres à particules reste mal connue, mais les premiers résultats tendraient à montrer une filtration jusqu'à 7 nm (0.007 μm). [51]
- Les filtres ouverts : Les filtres à particules dits « ouverts » ne permettent de filtrer que 30% à 50% des émissions de particules. Par conséquent, ils ne permettent pas de respecter la réglementation applicable aux véhicules neufs lourds ou légers. [51]

- Filtres à particules catalysés : Certains filtres à particules fermés, dits « catalysés », sont à l'origine de surémissions de dioxyde d'azote (NO_2), un polluant qui dépasse régulièrement les seuils autorisés dans les grandes agglomérations. Néanmoins, des progrès ont déjà été réalisés sur ce point. De plus, pour les véhicules légers, la norme Euro 6 imposa dès 2015 l'abaissement des rejets en NO_x à 80 mg/km au lieu de 180 mg/km pour Euro 5. Les filtres à particules fermés de type « additivés », moins courants, ne souffrent pas de ce phénomène. [51]
- Rétrofit : Afin de réduire les émissions de polluants du parc existant, il est envisageable, sous certaines conditions, d'installer des filtres à particules fermés sur des véhicules lourds déjà en service. A défaut, des filtres ouverts peuvent être utilisés, mais leur efficacité reste très inférieure. L'installation en retrofit sur des véhicules légers n'est en revanche pas possible. [51]
- Autre méthode : Un autre moyen non négligeable pour réduire les suies issues du trafic routier consiste à utiliser le gaz naturel carburant (GNC) avec lequel on atteint une réduction d'émission de 98% de particules fines. Dans plusieurs villes européennes, des flottes de bus de transport public sont équipées pour rouler au gaz naturel. A signaler aussi dans le même contexte, les progrès réalisés dans la construction des véhicules à moteurs « hybrides » (électrique + carburant).

TABLE 3.1: Emissions moyennes de particules de différents types de moteurs [50]

Type de moteur	Particules (nombre/km)	Particules (mg/km)	Diamètre moyen des particules (μm)
Diesel	$5 \cdot 10^{13}$	20	0,2
Diesel avec Filtre à Particules	$2 \cdot 10^{11}$	0,5	0,36
Essence classique	$1 \cdot 10^{11}$	0,5	0,46
Essence injection directe sans FAP	$8 \cdot 10^{12}$	4	0,21

3.2 Réglementations des émissions particulières dans l'air ambiant

Les effets de la pollution de l'air sur la santé augmentent en fonction des concentrations des substances polluantes dans l'air et de la durée d'exposition. La réglementation définit, pour certains indicateurs de la pollution, des concentrations de références pour guider l'action des pouvoirs publics. Il s'agit des valeurs limites et des seuils d'alerte.

3.2.1 Recommandations européennes [51]

Afin de protéger la santé humaine et l'environnement dans son ensemble, il est particulièrement important de lutter contre les émissions de polluants à la source, ainsi que de définir et de mettre en œuvre les mesures de réduction les plus efficaces au niveau local, national et communautaire. Il convient dès lors d'éviter, de prévenir ou de réduire les émissions de polluants atmosphériques nocifs, et de définir des objectifs appropriés en matière de qualité de l'air ambiant en tenant compte des normes, des orientations et des programmes de l'Organisation mondiale de la santé. Une concentration moyenne annuelle de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a été choisie comme valeur indicative à long terme pour la teneur en $\text{PM}_{2,5}$. Elle représente l'extrémité inférieure de la fourchette pour laquelle il a été observé des effets importants sur la survie dans l'étude de l'American Cancer Society (ACS) [52].

TABLE 3.2: Lignes directrices relatives à la qualité de l'air

	Moyenne annuelle	Moyenne sur 24 heures
$\text{PM}_{2,5}$	10	25
PM_{10}	20	25

En dehors de cette valeur indicative, l'OMS a défini trois cibles intermédiaires pour la concentration en $\text{PM}_{2,5}$ (Tableau 3.3). L'utilité de ces valeurs intermédiaires réside dans leur facilité de mesure des progrès réalisés dans le temps au cours du processus difficile consistant dans la réduction régulière de l'exposition de la population aux particules.

Une concentration moyenne annuelle de $\text{PM}_{2,5}$ de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a été choisie comme première cible intermédiaire. Elle correspond aux concentrations moyennes maximales rapportées dans les études sur les effets à long terme sur la santé où l'on a montré que cette concentration était associée à une mortalité importante dans le monde développé.

La deuxième cible intermédiaire de protection est fixée à $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et repose sur les études sur l'exposition à long terme et la mortalité. Atteindre cette deuxième

cible intermédiaire permettrait de réduire d'environ 6 % les risques pour la santé de l'exposition à long terme par rapport à la valeur de la première cible intermédiaire.

La troisième cible intermédiaire recommandée est de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette valeur est proche des concentrations moyennes rapportées dans les études sur l'exposition à long terme et permet de réduire d'encore 6 % le risque de mortalité par rapport à la deuxième cible intermédiaire.

Des lignes directrices relatives à la qualité de l'air et des cibles intermédiaires correspondantes sont également recommandées pour les PM_{10} (Tableau 3.3) parce qu'une ligne directrice concernant uniquement les $\text{PM}_{2,5}$ ne permettrait pas de protéger contre les effets nocifs des particules grossières (fraction comprise entre 10 μm et 2,5 μm). Cependant, on estime que les données quantitatives relatives aux particules grossières sont insuffisantes pour en tirer les lignes directrices séparées. En revanche, il existe une littérature abondante sur les effets des expositions à court terme aux PM_{10} , qui a servi de base à l'élaboration des lignes directrices relatives à la qualité de l'air et des cibles intermédiaires pour les concentrations de particules sur 24 heures (voir ci-dessous).

TABLE 3.3: Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air et cibles intermédiaires pour les particules : concentrations moyennes annuelles et sur 24 heures

	Concentrations moyennes annuelles		Concentrations sur 24 heures	
	PM_{10}	$\text{PM}_{2,5}$	PM_{10}	$\text{PM}_{2,5}$
Cible intermédiaire 1	70	35	150	75
Cible intermédiaire 2	50	25	100	50
Cible intermédiaire 3	30	15	75	37.5
Lignes directrices relatives à la qualité de l'air	20	10	50	25

La directive 2008/50, du 21 Mai 2008 de l'Union Européenne fixe des objectifs contraignants en matière de qualité de l'air et de lutte contre les polluants atmosphériques. Elle impose aux États-membres de mesurer, de suivre et de rapporter les données de suivi d'un ensemble de polluants le NO_2 , les NO_x , le plomb, le SO_2 , les particules fines PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$, le monoxyde de carbone, l'ozone O_3 et le benzène. Cette directive fixe des objectifs en matière de valeurs limites d'exposition et de seuils d'information et d'alerte pour la protection de la santé et de l'environnement. Elle impose aussi une information du public et la mise à disposition de ces données. Elle prévoit également la mise en place de plan relatifs à la qualité de l'air dans toutes les zones où des dépassements de valeurs limites sont constatés afin d'atteindre ou de revenir en dessous des valeurs limites. Ces seuils limites horaires et annuels sont résumés dans le tableau ci-après :

TABLE 3.4: Valeurs limites pour la protection de la santé humaine selon les recommandations européennes

Composant	Valeur limite	Marge de dépassement
PM ₁₀ Jour	50 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 35 fois par année civile	100%
PM ₁₀ Année civile	40 µg/m ³	20%

3.2.2 Recommandations algériennes

Le décret exécutif n ° 06-138 du 15 Avril 2006, régleme les émissions de gaz dans l'atmosphère ainsi que les fumées, vapeurs, particules liquides ou solides et les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle. Il prend également en considération l'ancienneté des installations industrielles et détermine une tolérance pour les rejets atmosphériques en émanant, en attendant la mise à niveau des installations industrielles anciennes.

TABLE 3.5: Valeurs limites des paramètres de rejets atmosphériques

Substance	Valeurs limites (mg/m ³)	Tolérance des valeurs limites des industries anciennes (mg/m ³)
Poussières totales	50	100
Oxydes de soufre (exprimés en dioxyde de soufre)	300	500
Oxydes d'azote (exprimés en dioxyde d'azote)	300	500
Composés organiques volatils (non méthaniques)	150	200
Métaux et composés de métaux	5	10
Cadmium, mercure, thallium et leurs composés	0.25	0.5
Arsenic, sélénium et tellure et de leurs composés autres que ceux visés parmi les rejets de substances cancérigènes	1	2
Antimoine, chrome, cobalt, cuivre, étain, manganèse, nickel, vanadium et zinc, et de leurs composés autres que ceux visés parmi les rejets de substances cancérigènes	5	10

La réglementation algérienne a établi également des valeurs plus tolérantes selon le type d'industrie et d'installation.

TABLE 3.6: Tolérance à certaines valeurs limites des paramètres de rejets atmosphériques selon certaines catégories des installations

Industrie	Substance	Valeurs limites (mg/Nm ³)	Tolérance des valeurs limites anciennes installations
Transformation des produits dérivés du pétrole	Oxyde de soufre	800	1000
	Oxyde d'azote	200	300
	Oxyde de Carbone	150	200
	COV	150	200
	Particules	30	50
Cimenterie, plâtre et chaux	Oxyde de soufre	500	750
	Oxyde d'azote	1500	1800
	Oxyde de Carbone	150	200
	Métaux lourds	5	10
	Poussières	30	50
Sidérurgies	Oxyde de soufre	500	750
	Oxyde de soufre	1200	1000
	Oxyde d'azote	850	1200
	Oxyde de Carbone	100	150
	Métaux lourds (Hg, Pb, Cd, As)	5	10
	Poussières	100	150

3.3 Ampleur de la pollution atmosphérique

3.3.1 Tendances mondiales en milieux urbains [48]

Selon le rapport du 12 Mai 2016 de l'OMS, plus de 80% des gens vivant dans des zones urbaines où la pollution atmosphérique est surveillée sont exposés à des niveaux de qualité de l'air ne respectant pas les limites fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Si toutes les régions du monde sont touchées, les habitants des villes à revenu faible seraient ceux qui en subissent le plus les conséquences.

D'après la dernière base de données sur la qualité de l'air en milieu urbain, 98% des villes de plus de 100 000 habitants dans les pays à revenu faible ou intermédiaire ne respectent pas les lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air. Néanmoins, dans les pays à revenu élevé, ce pourcentage tombe à 56%.

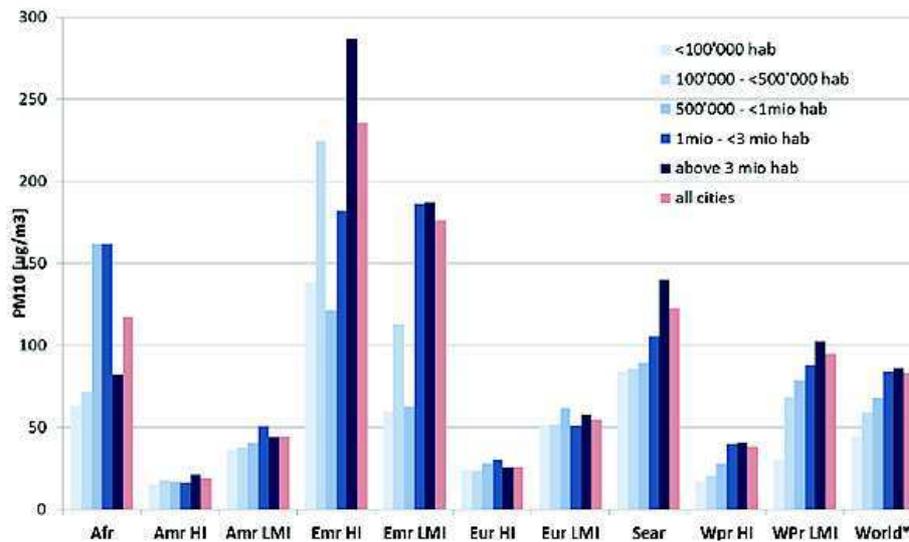


FIGURE 3.1: Niveau des PM₁₀ par région et par taille des villes¹, 2008-2015 [48]

L’OMS a pu comparer les niveaux de petites particules et de particules fines (PM₁₀ et PM_{2,5}) dans 795 villes de 67 pays sur une période de 5 ans (2008-2013). Les PM₁₀ et les PM_{2,5} comprennent des polluants comme le sulfate, les nitrates et le carbone noir. Les données ont ensuite été analysées afin d’établir les tendances régionales.

En général, les niveaux de pollution atmosphérique en milieu urbain étaient moins importants dans les pays à revenu élevé, les niveaux les plus faibles étant enregistrés dans la région européenne, dans la région des américaines et dans la région du Pacifique Occidental. Cependant, malgré les améliorations enregistrées dans ces régions, les niveaux mondiaux de pollution en milieu urbain ont augmenté de 8%.

Les niveaux les plus élevés de pollution atmosphérique en milieu urbain étaient constatés dans les pays à revenu faible ou intermédiaire des régions OMS de la Méditerranée Orientale et de l’Asie du Sud-Est, où les niveaux annuels moyens dépassaient souvent entre 5 et 10 fois les limites fixées par l’OMS ; les pays à revenu faible de la région du Pacifique occidental les suivaient de près.

Dans les régions de la Méditerranée orientale et de l’Asie du Sud-Est, ainsi que dans les pays à revenu faible de la région du Pacifique occidental, les niveaux de pollution atmosphérique en milieu urbain ont augmenté d’au moins 5% dans plus de deux villes sur trois.

1. Afr : Afrique - Amr : Amérique - Emr : Eastern Mediterranean (Méditerranée orientale) Eur : Europe - Sear : South-East Asia (Asie du Sud Est) - Wpr : Western Pacific (Pacifique occidental) - LMI : Low- and middle-income (Bas et moyen revenu) - HI : high-income (revenu élevé).

TABLE 3.7: Tendances des $PM_{2,5}$ ou PM_1 basées sur les données disponibles par régions [48]

Région	Tendances entre 2008 et 2013
Afrique(sub-sahara)	NA
Amérique, LMI ¹	→ ²
Amérique, HI ³	↘ ⁴
Méditerranée orientale, LMI	↗ ⁵
Méditerranée orientale, HI	↗
Europe, LMI	↘
Europe HI	↘
Asie du Sud-Est	↗
Pacifique occidentale, LMI	↗
Pacifique occidentale, HI	↘
Monde ⁵	↗

3.3.2 Etat de la pollution atmosphérique en Algérie

Avec un parc automobile de plus de 5,5 millions de véhicules dont 1 million sur Alger, estimée fin 2014, et un taux de 65% de véhicules essence et une forte augmentation des véhicules diesel au cours de la dernière décennie [53], l'Algérie se montre comme un pays qui n'est pas fortement motorisé, mais qui présente une pollution particulaire plus importante que dans les pays développés, où le trafic routier est plus intense. Les analyses des métaux lourds véhiculés par les aérosols particuliers révèlent que les teneurs en plomb atteignent souvent des niveaux supérieurs aux normes en vigueur dans certains pays.

Selon le dernier rapport de l'Office Nationale des Statistiques, seul 23% des véhicules algériens auraient moins de 5 ans et plus de 49% auraient plus de 20 ans, sachant que ces véhicules ne répondent pas aux normes actuelles exigées. Les normes anti-pollution s'arrêteraient en Algérie entre Euro 2 et 3 alors que dans les pays de l'UE, la norme Euro 6 a été mise en service le 1er Septembre 2015, la norme Euro 7 serait déjà prévue pour 2019. Par conséquent, la plupart des véhicules commercialisés en Algérie sont polluants y compris ceux du diesel.

-
1. Low- and middle-income (Bas et moyen revenu).
 2. Un changement de moins de 5% sur la période des 5 années.
 3. High-income (revenu élevé).
 4. Diminution de plus de 5% sur les 5 années.
 5. Augmentation de plus de 5% sur les 5 années.

L'ampleur de cette pollution est le résultat de la mauvaise combustion d'un parc automobile qui n'est pas fortement dieselisé, mais âgé et peu équipé pots catalytiques, roulant dans sa presque totalité à l'essence plombée. La situation peut être améliorée par des actions telles que le rajeunissement du parc automobile, l'utilisation accrue de la bicarburation GPL et du gaz naturel.[54]

3.4 Réseaux de surveillance

3.4.1 Au niveau mondial

Au cours des deux dernières années, la base de données de l'OMS – qui couvre maintenant 3000 villes dans 103 pays – a presque doublé de volume, avec davantage de villes mesurant les niveaux de pollution atmosphérique et reconnaissant les répercussions de cette dernière sur la santé.

Dans la région africaine, la base de données contient maintenant des mesures de PM pour un nombre de villes deux fois plus important que les versions précédentes. Cependant, les données relatives à la pollution atmosphérique en milieu urbain restent très lacunaires.

Au niveau mondial, il existe de plus en plus d'organismes établissant des projets de surveillance et de recherche pour éclaircir les problèmes de la pollution atmosphérique, notamment l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), en plus de l'OMS. [48]

3.4.2 Réseaux de mesures en Algérie

Aujourd'hui, les niveaux de pollution dans les principales zones urbaines en Algérie sont encore méconnus, hormis certaines études ponctuelles effectuées dans le cadre de projets de recherches au niveau d'Alger ou de Constantine.

Certains réseaux ont été mis en place au début des années 2000, notamment le projet « Sama Safia » qui visait à connaître et surveiller l'état de la qualité de l'air à Alger et Annaba ainsi que de déduire l'impact éventuel des sources de pollution urbaine sur la santé des populations dans ces deux grandes agglomérations. Suite à l'arrêt de ce projet en 2008 et avec la croissance démographique et celle du parc automobile algérien, un manque d'informations se fait ressentir et il est nécessaire de mettre en place des réseaux de mesures continues de certains polluants, notamment les particules diesel.

Il est, néanmoins, indéniable que depuis le rapport sur l'état de l'environnement publié en 2000, un certain nombre d'actions ont été entreprises dans l'objectif d'une meilleure maîtrise des problèmes de l'environnement dans le pays. Il s'agit entre autres : [55]

- De l'adoption de nouveaux textes législatifs et réglementaires définissant le cadre juridique pour une prise en charge de certains aspects qui ont un impact direct ou indirect sur l'environnement (Loi sur les déchets, loi sur le littoral, loi sur l'environnement et le développement durable, etc.).
- De la mise en place de nouvelles institutions d'études et de formation (Observatoire National de l'Environnement, Centre National des Technologies de Production plus propres, Agence Nationale des déchets, Conservatoire des métiers de l'environnement, etc.).
- D'engagements de certaines unités industrielles pour le contrôle de leurs rejets dans le cadre des contrats de performance (plusieurs contrats ont été signés avec différentes industries).

Chapitre 4

Principales méthodes de mesure et d'analyse des particules en suspension

Les particules ont un impact important sur la qualité de l'air à travers des effets sur la santé, sur les écosystèmes, sur l'environnement et à une échelle plus large sur le climat. Pour appréhender ces impacts, il est important d'avoir des informations sur l'évolution spatiotemporelle des divers polluants, dont les aérosols. Puis, de développer des indicateurs pertinents à partir de mesures pour la surveillance et la prévision. Ces mesures doivent être spécifiques, sensibles, précises et basées sur les propriétés des aérosols (concentration massique, granulométrie et composition chimique).

La première nécessité est de disposer de mesures donnant des informations sur la masse des particules dans le domaine granulométrique intéressant : particules de diamètre aérodynamique respectivement inférieur à 10, à 2,5 μm et à 1 μm . Cela implique donc de choisir des dispositifs d'échantillonnage adéquats pour la détermination des concentrations massiques des fractions correspondantes. [56]

En second lieu, cette approche globale doit être complétée par la détermination des principaux constituants de l'aérosol atmosphérique urbain [56] :

- Métaux (Pb, Cd, Ni, As, etc.) selon l'environnement concerné.
- Composante acide (sulfates, ammoniums, chlorures, nitrates).
- Composante organique.

C'est ainsi que la caractérisation des aérosols dans l'air exige le passage par les étapes suivantes :

4.1 Echantillonnage

Les prélèvements de particules nécessitent l'utilisation d'une ligne d'échantillonnage qui conserve l'intégrité de l'échantillon avant le prélèvement et/ou l'analyse. Cette ligne d'échantillonnage est souvent équipée d'une tête d'échantillonnage qui permet de limiter éventuellement la mesure à des particules en dessous d'une taille donnée. La tête d'échantillonnage (figure 4.1) est constituée d'un cyclone ou buse d'entrée et d'une plaque d'impaction. La séparation par taille est basée sur la capacité des petites particules de suivre les lignes de courant divergentes et d'éviter la plaque d'impaction retenant les particules de taille supérieure à un rayon donné (par exemple 2,5 ou 10 μm).

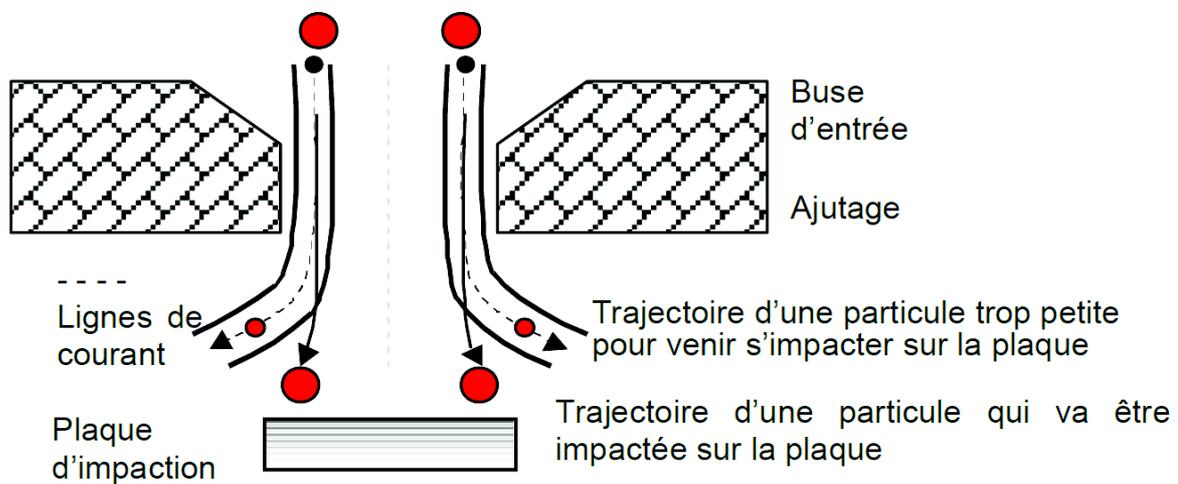


FIGURE 4.1: Schéma de séparation des particules par impaction. [57]

L'efficacité de collecte d'une particule varie suivant son diamètre aérodynamique comme l'indique la figure 4.2. Le seuil de coupure granulométrique d'une tête est la valeur du diamètre aérodynamique correspondant à une efficacité de 50%.

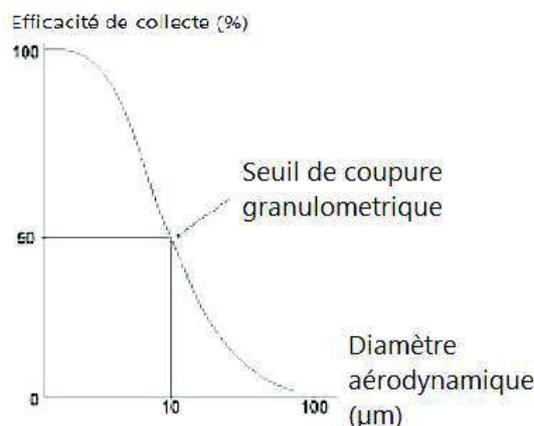


FIGURE 4.2: Variation de l'efficacité de collecte d'une tête de prélèvement

Aucune tête de prélèvement n'est donc strictement sélective, c'est-à-dire, laisse passer 100% des particules inférieures à une valeur annoncée et exclut 100% des particules plus grandes que celle-ci. Le seuil de coupure est fonction du débit d'aspiration, du colmatage du filtre et des conditions de température et de pression ambiante. Les appareils de mesure de concentrations en particules doivent donc maintenir le débit d'aspiration imposé (ex : 1 m³/h) de façon à avoir un seuil de coupure constant au niveau de la tête.

Il existe à cet effet plusieurs types de tête de prélèvements :

La tête de prélèvement française normalisée AFNOR NF X43-021 [58] : Cette tête, décrite sur la figure 4.3, équipait l'ensemble du parc d'appareils de type PPA60 et jauge bêta jusqu'en 1995. Elle fonctionne avec un débit d'aspiration de 1,5 m³/h. La coupure granulométrique annoncée à 10 µm serait plutôt aux alentours de 13 µm, d'après les essais réalisés en Grande-Bretagne par le Warren Spring Laboratory [59]. De plus, elle est fonction du vent.

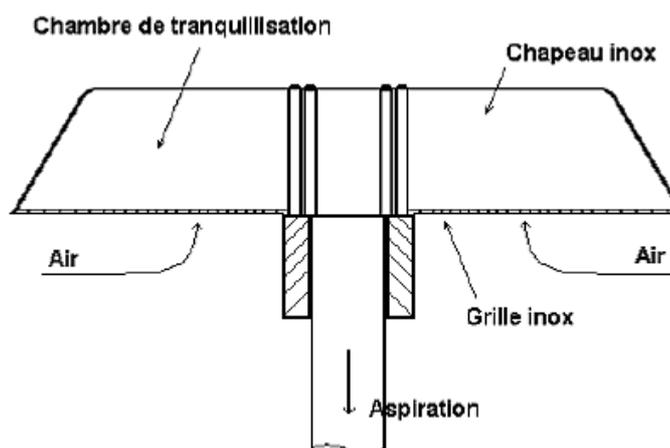


FIGURE 4.3: Tête de prélèvement NF X 43-021 [56]

La tête type PM₁₀ d'origine américaine : le principe de séparation de la tête PM₁₀, schématisée sur la figure 4.4, est l'impaction par effet aérodynamique induit par un système de chicane. Les particules plus grosses que le seuil de coupure percutent, par inertie, une surface d'impaction graissée pour éviter tout phénomène de réenvol. Le seuil de coupure granulométrique est annoncé à 10 µm pour un débit d'aspiration fixé à 1 m³/h. Les caractéristiques de la tête seraient peu influencées par la vitesse du vent, selon des travaux menés aux Etats-Unis [60]. Cette tête équipe l'ensemble des appareils récemment implantés dans les réseaux (jauge bêta depuis 1995, microbalance à variation de fréquence).

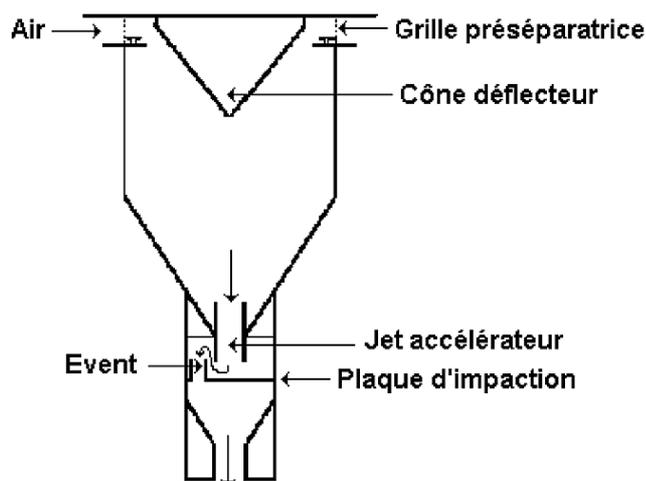


FIGURE 4.4: Tête de prélèvement PM₁₀ [56]

La tête type PM_{2,5} d'origine américaine : Cette tête, représentée sur la figure 4.5, est proposée par les constructeurs sur des appareils tels que la microbalance à variation de fréquence. La coupure granulométrique, annoncée à 2,5 μm pour un débit d'aspiration fixé à 1 m^3/h , est obtenue par un système de type « cyclone », les particules de diamètre supérieur étant récupérées dans un récipient amovible. Contrairement à la tête PM₁₀, ce dispositif n'est pas démontable en vue d'un éventuel nettoyage.

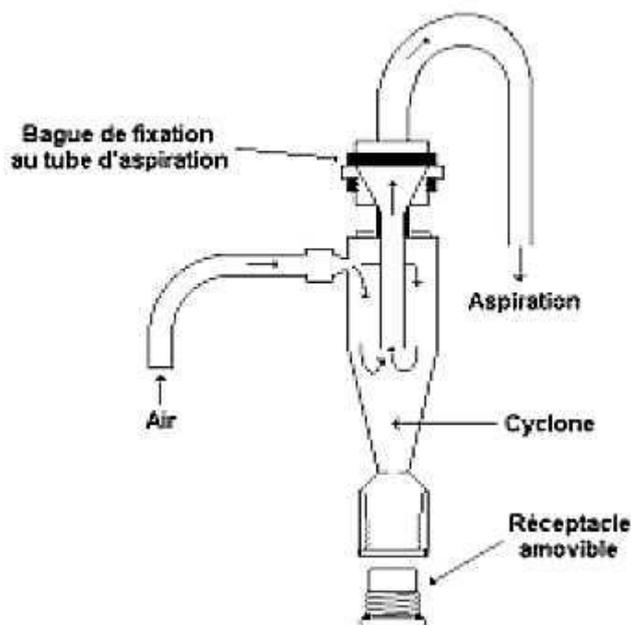


FIGURE 4.5: Tête de prélèvement PM_{2,5} [56]

Les particules les plus fines sont entraînées vers le système de prélèvement proprement dit par un tuyau d'adduction de l'air. Celui-ci sera le plus court possible, en évitant les coudes afin d'éviter la perte de particules sur les parois et la discrimination en taille : on parle de prélèvement isocinétique.

4.1.1 Les techniques de mesures en masse

4.1.1.1 Prélèvements sur filtre

Ce type de prélèvement permet d'obtenir la masse d'aérosols localement (un point de mesure) et sur une certaine période (intégration dans le temps). Les mesures sur la quantité prélevée sont réalisées ultérieurement en laboratoire (pesée et analyses). Ceci implique de veiller à la conservation de l'échantillon en le protégeant en particulier d'un éventuel vieillissement chimique ou photochimique (mise à l'abri de la lumière, conservation au froid par réfrigération ou congélation). Le système (figure 4.6) est constitué d'une tête d'échantillonnage, d'un porte-filtre, d'un contrôle du débit (régulation et mesure) et d'une pompe. Le porte-filtre comprend une grille et un filtre sur lequel sont déposées les particules. La qualité du filtre est adaptée à la nature de l'aérosol à prélever et au type d'analyse à réaliser.

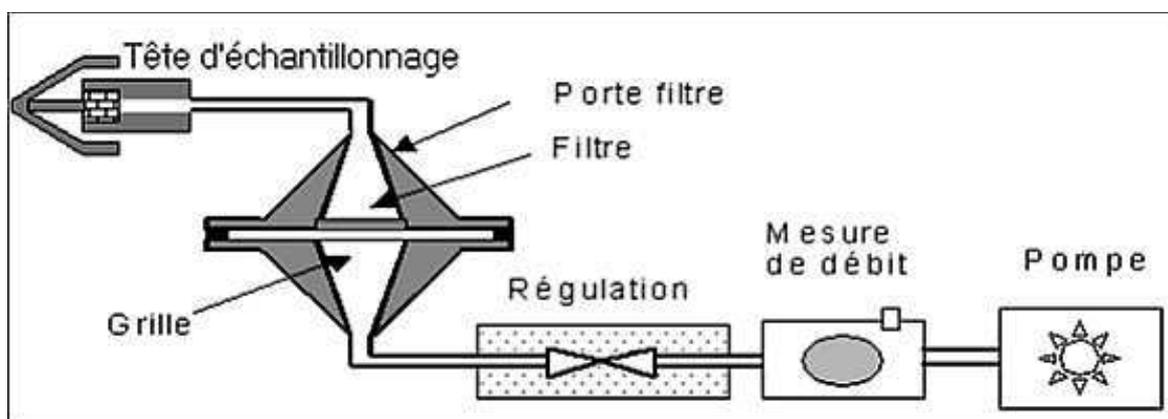


FIGURE 4.6: Schéma de principe du prélèvement sur filtre

4.1.1.2 Méthodes aérodynamiques

Comme pour les têtes de prélèvement, ces méthodes sont basées sur l'inertie des particules et permettent de réaliser une classification en dimension des particules. Le système (Figure 4.2) fonctionne avec des impacteurs à N étages ($N = 8$ ou 12) : chaque étage est représentatif d'une taille de coupure et équipé d'un filtre de piégeage. Ce type de préleveur permet a posteriori de déterminer la composition chimique des aérosols sur chaque étage avec donc une spéciation en taille (de 30 nm à quelques μm).

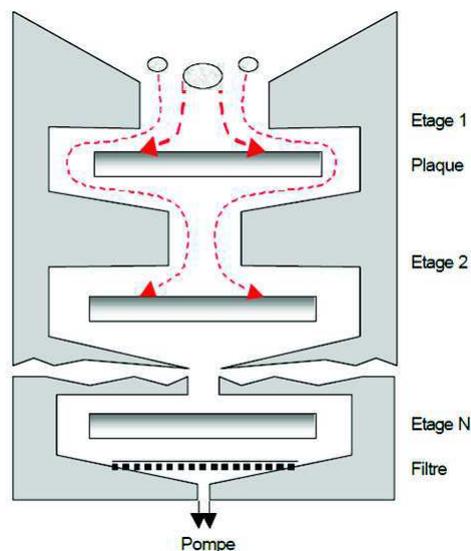


FIGURE 4.7: Schéma de principe d'un impacteur en cascade [57]

Les filtres et membranes de rétention [61]

Les filtres utilisés dans la collecte des particules en suspension doivent remplir trois conditions :

- Une efficacité de collection d'au moins 99% pour les particules de diamètre égale à $0,3 \mu\text{m}$ et plus.
- Une hygroscopicité faible.
- Un taux d'impureté aussi faible que possible afin d'éviter les interférences dans l'analyse quantitative des composés métalliques que véhiculent les poussières.

Les filtres les plus utilisés sont :

- Les filtres à fibre de verre : Ils ont une efficacité de collection de 99% pour les particules de diamètre supérieur à $3 \mu\text{m}$. Cette efficacité est mesurée sur les particules d'aérosols du dioctyl-phalate. L'hygroscopicité de ces filtres est faible. L'inconvénient majeur de ces filtres provient du fait qu'ils contiennent divers éléments métalliques à des teneurs variables. Dans ce contexte, l'élément le plus gênant est le zinc qu'on retrouve lors de la minéralisation des filtres à de teneurs élevées. Les filtres Gelman type A et Whatman GF-A contiennent par exemple plus de $50 \mu\text{g Zn/m}^2$.
- Les filtres membranes : Ce sont des filtres nitro-cellulose (Sartorius et Milipore) ou acétate et ester de cellulose (Gelman GA-3) qui sont solubles dans les éthers et les alcools. On peut ainsi dissoudre les filtres dans l'acétone et récupérer totalement les particules après évaporation du solvant organique. L'étape de minéralisation

est ainsi facilitée. Les filtres membranes les plus utilisés pour la collecte des particules ont une porosité de l'ordre de 8 μm . Ces filtres sont plus hygroscopiques que les filtres en fibres de verre, mais présentent l'avantage d'avoir des teneurs extrêmement faibles en éléments métalliques. Leur inconvénient est qu'ils présentent une forte résistance à l'écoulement de façon qu'on ne puisse pas les utiliser dans les HVS pour les prélèvements à fort débit.

Avec les deux types de filtres (en fibres de verre et membranes) on recueille avec une bonne efficacité même les particules très fines de 0,1 μm de diamètre.

4.1.1.3 Prélèvements gravimétriques

Ils permettent de réaliser un prélèvement et la mesure de la masse prélevée simultanément. Deux techniques sont utilisées basées sur des principes différents : la jauge bêta et la microbalance oscillante. Dans les deux cas, l'échantillon est déposé par aspiration sur un filtre au travers d'une tête d'échantillonnage. La méthode de la jauge bêta repose sur la mesure de l'absorption de rayonnements de faible énergie par la matière. Ainsi, une mesure de l'intensité du rayonnement bêta est réalisée avant et après le dépôt des particules sur un filtre ruban.

L'atténuation du rayonnement est proportionnelle à la masse déposée à travers un coefficient d'absorption massique (K) obtenu par étalonnage. Cette méthode n'est cependant pas valable pour la mesure d'éléments chimiques très lourds.

$$M = K \cdot \ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right)$$

Avec :

- M : Masse prélevée.
- K : Coefficient d'étalonnage de la jauge.
- N1 et N2 : Signal enregistré avant et après prélèvement de particules.

La microbalance oscillante (TEOM ou FDMS) est constituée d'un élément conique oscillant à sa fréquence naturelle (f_0). La méthode de mesure est basée sur la modification de cette fréquence par accumulation de matière sur un filtre posé en haut du cône. La variation de fréquence au cours du temps est enregistrée et permet d'atteindre la variation de masse du dépôt (Δm) pendant ce même intervalle.

$$f = \sqrt{\frac{K_0}{M}}$$

Avec :

- f : fréquence d'oscillation.
- K_0 : coefficient propre à l'élément oscillant.
- M : masse de l'élément.

Et :

$$\Delta m = K_0 \cdot \left(\frac{1}{f^2} - \frac{1}{f_0^2} \right)$$

Avec :

- Δm : variation de masse liée au prélèvement.
- f_0 et f : fréquences mesurées sur l'intervalle de prélèvement.

4.1.2 Les analyses dimensionnelles

Ces analyses sont développées autour des propriétés optiques, électriques et aérodynamiques des aérosols.

4.1.2.1 Méthodes optiques

Ces méthodes sont basées sur les lois de diffusion et d'absorption de la lumière par les particules. En effet, l'intensité de lumière absorbée ou diffusée est proportionnelle à la concentration des particules en suspension. Différents types d'instruments ont été développés qui permettent des mesures locales ou intégrées dans l'espace ou résolues dans l'espace. Les mesures locales sont principalement réalisées par des compteurs optiques de type APS ou GRIMM. Le principe de mesure est basé sur la mesure de la lumière diffusée par une particule selon certaines hypothèses : particules sphériques, indice de réfraction homogène pour l'échantillon, échantillon peu absorbant en termes de rayonnement.

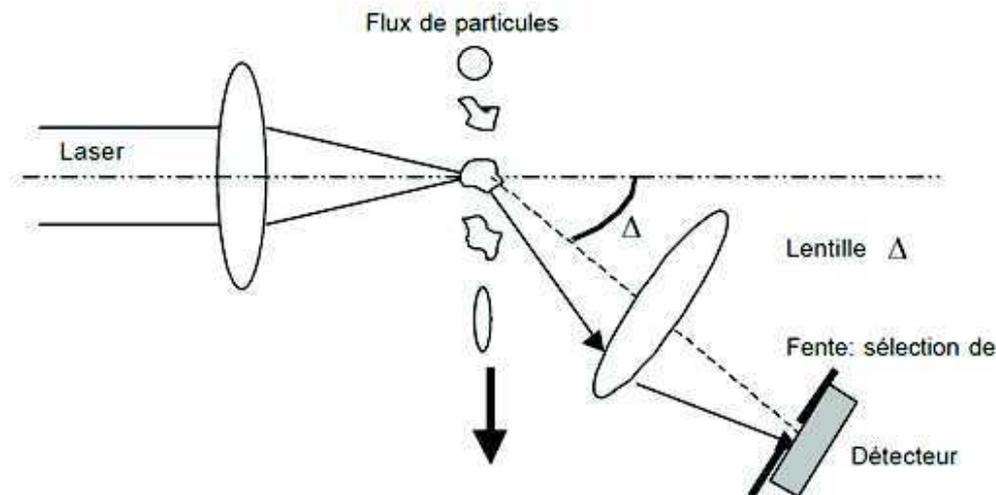


FIGURE 4.8: Schéma de principe d'un compteur optique.

Le flux de particules (figure 4.8) est soumis à un rayonnement laser focalisé. La lumière diffusée par chaque particule sous un certain angle Δ est mesurée par un détecteur. La taille de la particule est déduite d'un traitement mathématique du spectre de diffusion. Cette technique est limitée par ces hypothèses de base qui sont difficilement respectées en particulier pour des particules vieillissantes et peu humides. D'autres instrumentations (PCASP, néphélomètre), basées sur le même principe, permettent d'obtenir le coefficient de diffusion des particules. La mesure associée est celle de la lumière diffusée par chaque particule dans un grand angle de détection.

4.1.2.2 Méthodes électriques

Elles sont basées sur les propriétés électrostatiques (naturelles ou artificielles) des particules. Pour l'instrumentation ELPI (Electrical Low Pressure Impactor), les particules sont chargées électriquement à l'entrée d'un impacteur multi étages. L'enregistrement du signal électrique sur chacun des étages (piégeage entre 15 nm et 10 μm) permet, après inversion, de remonter sous certaines hypothèses à la taille des particules, donc à la granulométrie de l'échantillon. Dans l'ADME (Analyseur Différentiel de Mobilité Electrique), les particules sont chargées par une source radioactive en amont de la cellule. Elles passent ensuite dans un champ électrique variable.

Le mouvement des particules provient de l'entraînement par le fluide porteur et d'une dérive liée au champ électrique et à la mobilité dynamique (inversement proportionnelle au rayon de la particule). Les particules répondant aux paramètres prédéfinis de l'instrument sont entraînées par des orifices dans le système de comptage. La gamme de mesure est entre 0,003 et 1 μm pour les particules ; l'agitation brownienne et la gravité étant limitantes en dehors de cette plage.

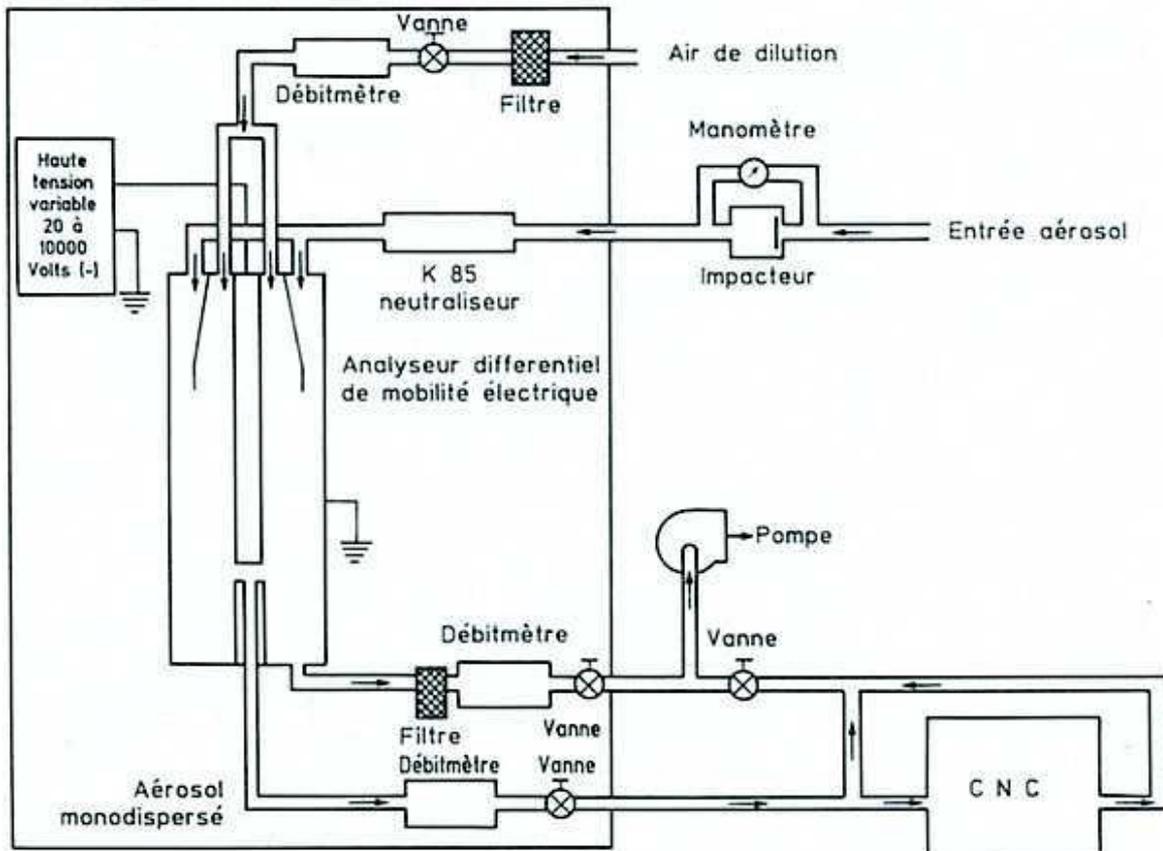


FIGURE 4.9: Schéma de principe d'un ADME, couplé à un CNC.

Le système de comptage est soit un électromètre, soit un compteur de noyaux de condensation (CNC). Le principe de ce dernier est de faire grossir les particules par condensation de vapeur d'eau sursaturée pour permettre leur détection avec un compteur optique. Il est donc adapté pour dénombrer les plus petites particules (0,003 nm à 1 μm) vues comme des gouttes individuelles ; l'efficacité de mesure est de 50 % pour les particules de 0,003 nm et supérieure à 90 % à partir de 0,005 nm.

4.2 L'analyse des particules en suspension

4.2.1 Analyse physique des particules

Les mesures physiques concernent la masse, le nombre, la taille et la morphologie des particules :

4.2.1.1 Mesures de masses

Cette mesure a pour but de déterminer la concentration en particules par m³d'air. Dans le cas d'échantillonnage manuel (échantillonneur à haut débit), le filtre est pesé avant et après collecte des particules. La différence de masse rapportée au volume d'air aspiré permet d'accéder à la teneur atmosphérique en particules. Pour les analyseurs automatiques (jauge bêta et TEOM), la teneur est donnée directement par l'appareil. [62]

4.2.1.2 Détermination du nombre de particules

Elle se fait entre autres à l'aide d'un compteur de particules de condensation ou d'un compteur optique (qui peut également mesurer la taille). La première méthode s'effectue en trois étapes :

- Sursaturation d'une vapeur (eau, alcool, etc.),
- Grossissement des particules par condensation de cette vapeur.
- Détection des particules, après croissance, par une source lumineuse couplée à une photo détectrice. Cette méthode permet de compter des particules qui à la base font 3 nm. [62]

4.2.1.3 Mesure de la taille des particules

Pour ce paramètre, plusieurs techniques existent également, associant souvent la mesure de la taille au nombre de particules. La méthode inertielle permet, par exemple, de compter et de mesurer la distribution selon la taille de particules allant de 3 nm à 10 µm. L'échantillon, contenant les particules, passe dans un premier temps par un chargeur électrique puis pénètre dans un impacteur en cascade basse pression dont les étages sont électriquement isolés. Les particules chargées, collectées sur chaque plateau sont comptées en temps réel grâce à la mesure du courant électrique qu'elles produisent. [63]

4.2.2 Analyses chimiques

Un autre facteur qui conditionne la nocivité des particules est la nature des polluants associés (aérosol acide, HAP, métaux, etc.). Les composantes acide et organique sont généralement associées aux particules les plus fines. Ceci montre l'intérêt d'analyses chimiques spécifiques s'ajoutant à la détermination d'indicateurs globaux [56]. C'est ainsi, qu'il existe des méthodes plus au moins développées qui permettent de déterminer certains constituants ainsi que leur concentration, après une préparation préliminaire de l'échantillon [64] :

4.2.2.1 Analyse de la matière organique

La matière organique est généralement extraite du filtre par ultrasons ou dans un Soxhlet par l'utilisation de solvants polaires ou non polaires avant d'être concentrée. L'échantillon est ensuite préparé en fonction de la méthode d'analyse [63]. Deux méthodes sont principalement utilisées pour l'analyse :

- Chromatographie en phase gazeuse (CPG) : La CPG est souvent couplée avec un détecteur universel comme (Détecteur à Ionisation de Flamme (FID)) ou à la spectrométrie de masse. Plus spécifiquement, pour les composés soufrés on utilise un (FPD) et pour les composés halogénés et pesticides un (Détecteur à capture d'électrons (ECD)). [65]
- Chromatographie en phase liquide haute performance (HPLC) : Par cette méthode, un grand nombre de composés organiques peuvent être séparés et analysés. Toutefois, en pratique elle est utilisée pour l'analyse des composés lourds. Du fait de la variété des détecteurs, il est possible de réaliser des analyses très spécifiques et très sensibles de la plupart des familles de composés. Par exemple, le spectromètre UV ou le spectromètre à fluorescence sont particulièrement sensibles lors de l'analyse des HAP. [66]

4.2.2.2 Analyse des éléments inorganiques et des métaux

- Spectrométrie d'Adsorption Atomique (SAA) : Cette méthode est largement employée pour l'analyse des métaux contenus dans les particules. Elle nécessite un traitement et une destruction préalable du filtre par attaque acide. Elle se base sur l'absorption de photons par des atomes à l'état fondamental. Cette méthode d'analyse élémentaire impose que la mesure soit faite à partir d'un analyte transformé à l'état d'atomes libres. L'échantillon est porté à une température de 2000 à 3000 degrés pour que les combinaisons chimiques dans lesquelles les éléments sont engagés soient détruites. Un faisceau lumineux produit par une lampe spécifique, traverse la flamme et atténué proportionnellement à la concentration de l'élément présent dans la flamme, suivant la loi de Beer-Lambert.

- Spectroscopie à plasma à couplage inductif (ICP) : C'est une méthode physique d'analyse chimique permettant de doser la quasi-totalité des éléments simultanément. La méthode consiste à ioniser l'échantillon en l'injectant dans un plasma d'argon, ou parfois d'hélium, autrement dit, les atomes de la matière à analyser sont transformés en ions. Les atomes sont ensuite injectés dans l'analyseur, puis détectés. Les deux principales techniques utilisées sont la spectrométrie d'émission optique et la spectrométrie de masse.
- X-ray fluorescence (XRF) [67] : La spectrométrie de fluorescence des rayons X est une méthode d'analyse chimique utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X. Elle est utilisée pour la détection et la quantification des éléments présents dans des échantillons liquides, solides ou en poudre. Elle permet de doser tous les éléments dont le numéro atomique « Z » est supérieur ou égal à 13. Le principe de la fluorescence X est montré en la figure 4.10 :
 - Un électron des couches internes est excité par un photon de la région des rayons X.
 - Pendant le processus de désexcitation, un électron saute d'un niveau d'énergie supérieur pour remplir la lacune ainsi formée. La différence d'énergie entre les deux couches apparaît comme un rayon X émis par l'atome.
 - Le spectre des rayons X accumulé pendant ce processus révèle un certain nombre des pics caractéristiques. Les énergies des pics nous permettent d'identifier les éléments présents dans l'échantillon (analyse qualitative), tandis que les intensités des pics fournissent la concentration relative ou absolue (analyse semi-quantitative ou quantitative).
 - Un système typique pour la spectrométrie [XRF] contient une source de radiation primaire (d'habitude un radio-isotope ou un tube X) et un équipement pour la détection des rayons X secondaires.

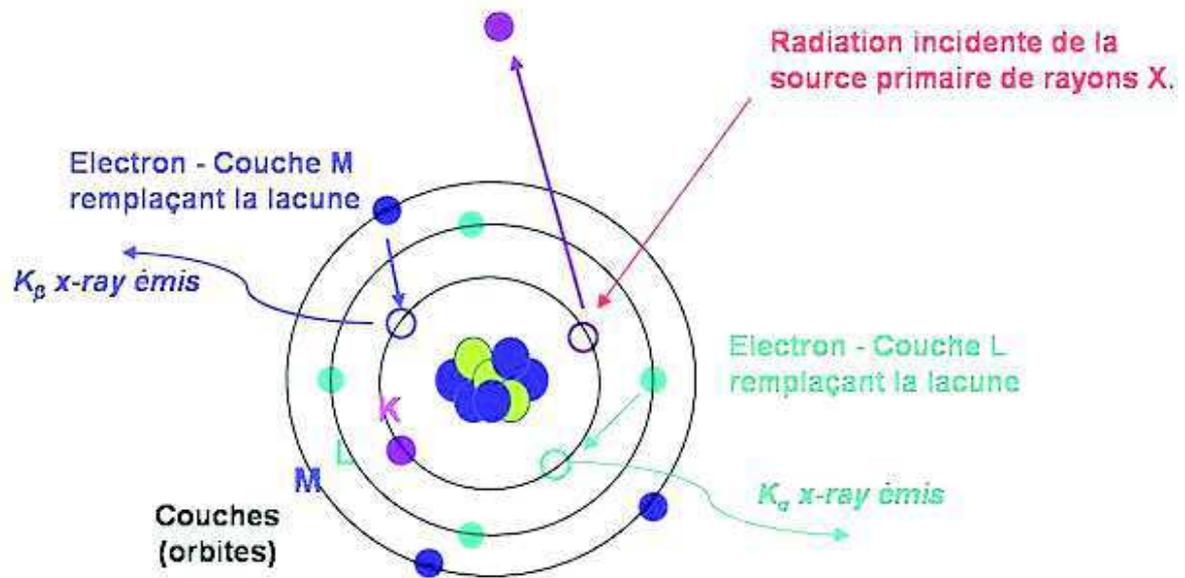


FIGURE 4.10: Principe de la spectroscopie par fluorescence X

Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon. En analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire, les concentrations massiques en éléments. L'analyse du spectre peut se faire de deux manières :

- Par analyse dispersive en longueur d'onde (WD-XRF, wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry).
- Par analyse dispersive en énergie (ED-XRF, energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry).

Chapitre 5

Méthodologie expérimentale

Afin d'estimer l'ampleur de la pollution par les métaux lourds au niveau de la Wilaya d'Alger et plus précisément aux alentours de la commune d'El Mohammadia, les prélèvements ont été faits à l'aide de la méthode de prélèvement par impacteur en cascade, une méthode aérodynamique. Les métaux lourds contenus dans les filtres de prélèvement ont ensuite été analysés par Fluorescence à rayons X (XRF). Cette partie indique les méthodes de prélèvement et d'analyse utilisées, leur mode opératoire, ainsi que les caractéristiques géographiques et météorologiques de la zone étudiée.

5.1 L'espace urbain d'El Mohammadia

En vue d'une analyse des métaux lourds et de l'ampleur de leur pollution dans l'agglomération d'Alger, une zone d'étude correspondant à un site de type « zone urbaine » a été retenue, d'après la classification européenne. Le site de mesure choisi est situé à l'APC de la commune d'El Mohammadia, à environ 10 Km à l'Est d'Alger (figure 5.1).

Le poste de prélèvement est implanté sur la terrasse de la Mairie (figure 5.2), à environ 10m d'altitude, en l'absence de tout obstacle. L'endroit fait l'objet d'une bonne ventilation naturelle. Les photos présentées en figure 5.3 montrent l'environnement du poste de mesure. Ce site, sécurisé et situé au milieu du tissu urbain, est loin de toute source directe de pollution, assurant ainsi une bonne qualité des mesures.

Notre travail a consisté à exploiter les données obtenues dans le but de prendre connaissance des concentrations en particules dans l'air ambiant, existant dans cette zone à forte densité de population résidente ou de passage (présence de plusieurs HLM, trois lycées, plusieurs écoles et CEM, centre commerciaux, etc. dans un rayon de moins de 1KM autour du site de mesure).

5.1.1 Coordonnées géographiques et démographiques

La superficie de la commune d'El Mohammadia est de 7,99 km², pour une population de 65 013 habitants (en 2008). Avec un taux de croissance annuel de 3%, la population est estimée à 82 356 habitants en 2016. Sa densité serait donc dans les environs de 10 307 habitants/km². Les données géographiques ainsi que la photo satellite (figure 5.1 et figure 5.2) relative au site sont obtenues grâce à Google Earth. L'endroit est situé à une latitude de 36°43' 51" et de longitude 3°08' 50".



FIGURE 5.1: Localisation de la commune d'El Mohammadia, à l'Est d'Alger



— Chantier de la Grande Mosquée Lieu de prélèvement

FIGURE 5.2: Localisation de la Mairie d'El Mohammadia



FIGURE 5.3: Voisinage du point de prélèvement

5.1.2 Sources d'émission des particules au voisinage du point de prélèvement

Comme mentionné précédemment, les particules en suspension dans l'air sont aujourd'hui principalement issues des véhicules automobiles, des usines productrices d'énergie non nucléaire ainsi que des réactions chimiques entre gaz atmosphériques et l'humidité de l'air.

En dehors du parc automobile, quelques sources sont comptées - au voisinage de la commune d'El Mohammadia - potentiellement émettrices de particules, parmi lesquelles figurent : la zone industrielle de Oued Smar qui est à environ 7 km de la station de prélèvement, le chantier de la Grande Mosquée d'Alger (figure 5.2), se situant à moins d'un kilomètre ainsi que les deux cimenteries (Rouiba et Mefteh) relativement éloignées, à une distance de plus de 20 km. Le point de prélèvement est également à une distance d'environ 500m de la route nationale N11 et à environ 9 km de l'aéroport d'Alger - Houari Boumediene.

5.2 Méthodologies et outils d'analyse

5.2.1 Durée de prélèvement

Le prélèvement du filtre est effectué pendant 24 heures ± 15 minutes, tous les 3 à 4 jours. Il est emmené en fin de prélèvement au laboratoire pour une pesée puis une analyse chimique. La période du prélèvement s'est étalée sur la période du 1^{er} Mars 2016 jusqu'au 15 Mai de la même année. Obtenant ainsi 16 prélèvements journaliers, l'équivalent de 4 classes granulométriques, soit 56 filtres à analyser.

5.2.2 Outil de prélèvement

Afin de suivre l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques des particules fines par classe granulométrique, les prélèvements ont été effectués à l'aide d'un échantillonneur à fort débit. Il s'agit du HVS-PM-10 (High volume sampler), équipé d'un cascadeur Sierra-Andersen de marque Graseby USA, doté de 4 étages, qui par sa conception, ne capte, en théorie, que des particules dont le diamètre est inférieur à $10\ \mu\text{m}$ (figures 5.4a et 5.4b).



FIGURE 5.4: Appareil de prélèvement utilisé

Le dispositif présenté en figure 5.5 est composé essentiellement de trois parties principales :

- Le high volume sampler (HVS) qui représente le corps de cet échantillonneur, composé d' :
 - Une turbine d'aspiration d'air.
 - Etages de sélection qui servent de porte filtres et qui permettent le tri par impaction des particules selon leur taille.
 - Un contrôleur électronique de débit, le MFC (Mass Flow Controller), qui permet de maintenir constant le débit d'aspiration d'air. En cas de colmatage du média filtrant, le MFC agit sur la puissance de moteur par ajustage électronique du voltage.

- La tête sélective PM₁₀ qui constitue la zone où le fractionnement à 10 µm se fait par impaction directe. Cette impaction repose sur l'effet aérodynamique induit par la présence de 9 buses circulaires placées au-dessus d'une surface lisse d'impaction. Les particules inférieures au seuil de coupure de 10 µm sont entraînées par le flux de l'air dans les buses et sont collectées sur le filtre. Tandis que les particules plus grosses s'écartent du flux et impactent sur la surface plane d'impaction en raison de leur inertie plus élevée. Afin d'éviter le réentraînement des particules grosses, la surface d'impaction est graissée par l'huile de silicone et nettoyée régulièrement.
- Le cascadeur d'Anderson qui permet d'avoir un prélèvement de particules par fraction granulométrique, est équipé de quatre étages et permet d'accéder aux 5 classes granulométriques suivantes : 10 à 7 µm, 7 à 3 µm, 3 à 1,5 µm, 1,5 à 1 µm et la classe finale inférieure à 1 µm (voir figure 5.5).

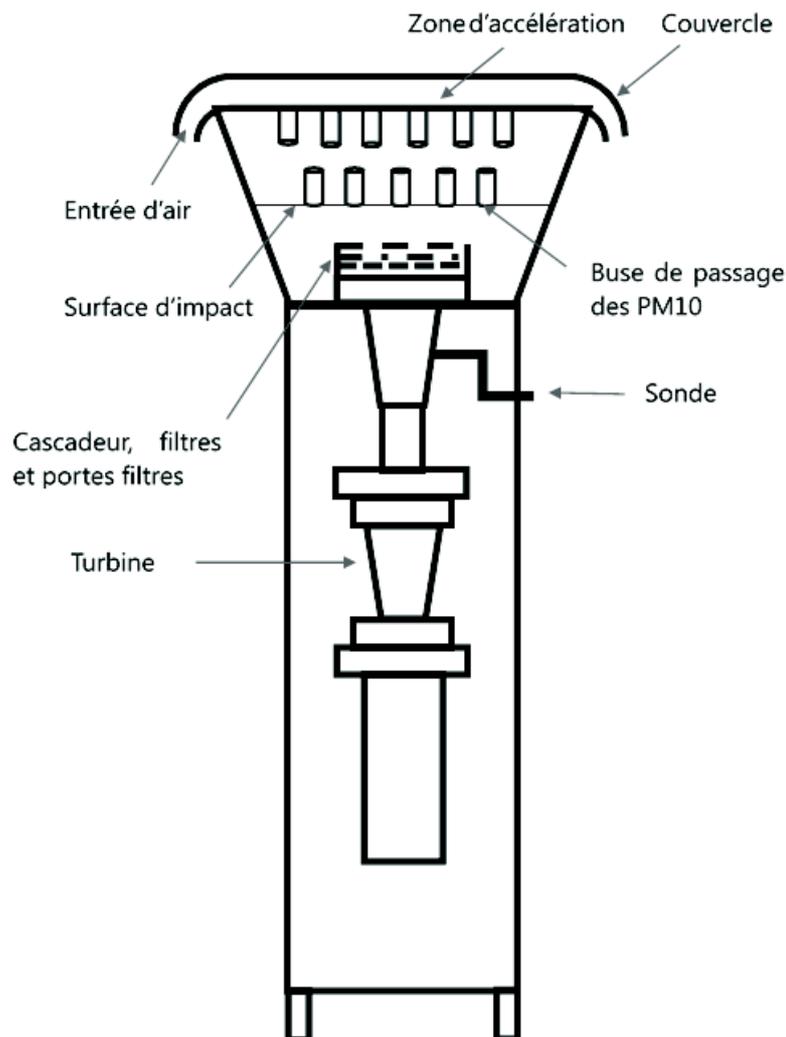


FIGURE 5.5: Schéma représentatif du collecteur

5.2.2.1 Principe de fonctionnement

Les impacteurs trient les particules suivant leur taille. Le principe se base sur la différence de quantité de mouvement des particules. L'une des conditions nécessaires au tri est que la vitesse du fluide soit contrôlée et connue. En raison de leur inertie, les particules ont tendance à effectuer un trajet direct alors que le flux d'air est dévié par un obstacle. Les particules d'une taille définie vont s'impacter sur cet obstacle et les plus légères (et donc plus petites) traverseront l'obstacle et viendront s'impacter sur l'étage suivant correspondant à un diamètre de coupure plus petit. Le tri s'effectue à énergie cinétique des particules constante :

A la sortie de la première buse, pour une vitesse V_1 , les particules de masse m_1 (masse élevée) sont impactées. Puis on augmente la vitesse de l'effluent ($V_2 > V_1$) en réduisant la taille de la buse d'entrée et les particules de masse m_2 (avec $m_2 < m_1$) sont alors impactées, et ainsi de suite. Le tri est correct si les particules ont des densités voisines. Dans ce cas, le tri par masse est équivalent à un tri par volume, donc par diamètre aérodynamique D_p (Figure 5.6). En pratique, on interpose sur le flux d'air plusieurs plaques percées de trous ou de fentes de tailles de plus en plus petites (impacteurs en cascade). Plus la particule est grande, donc plus sa masse est importante, plus tôt elle sera arrêtée. Ainsi, on recueille les grosses particules sur les premières plaques et les petites sur les dernières. [68]

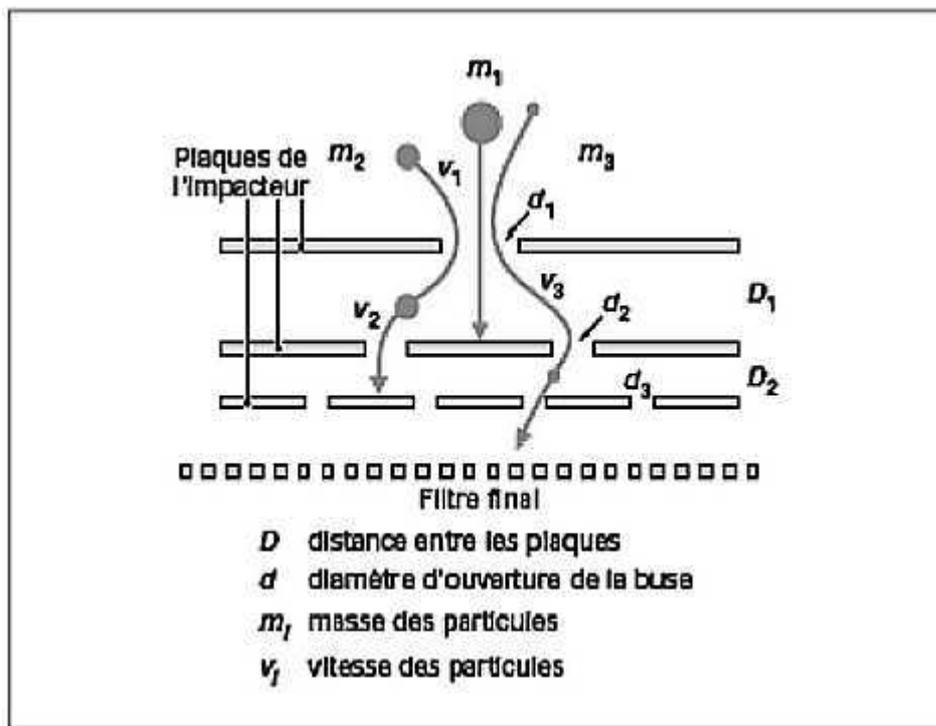


FIGURE 5.6: Principe de fonctionnement d'un impacteur en cascade

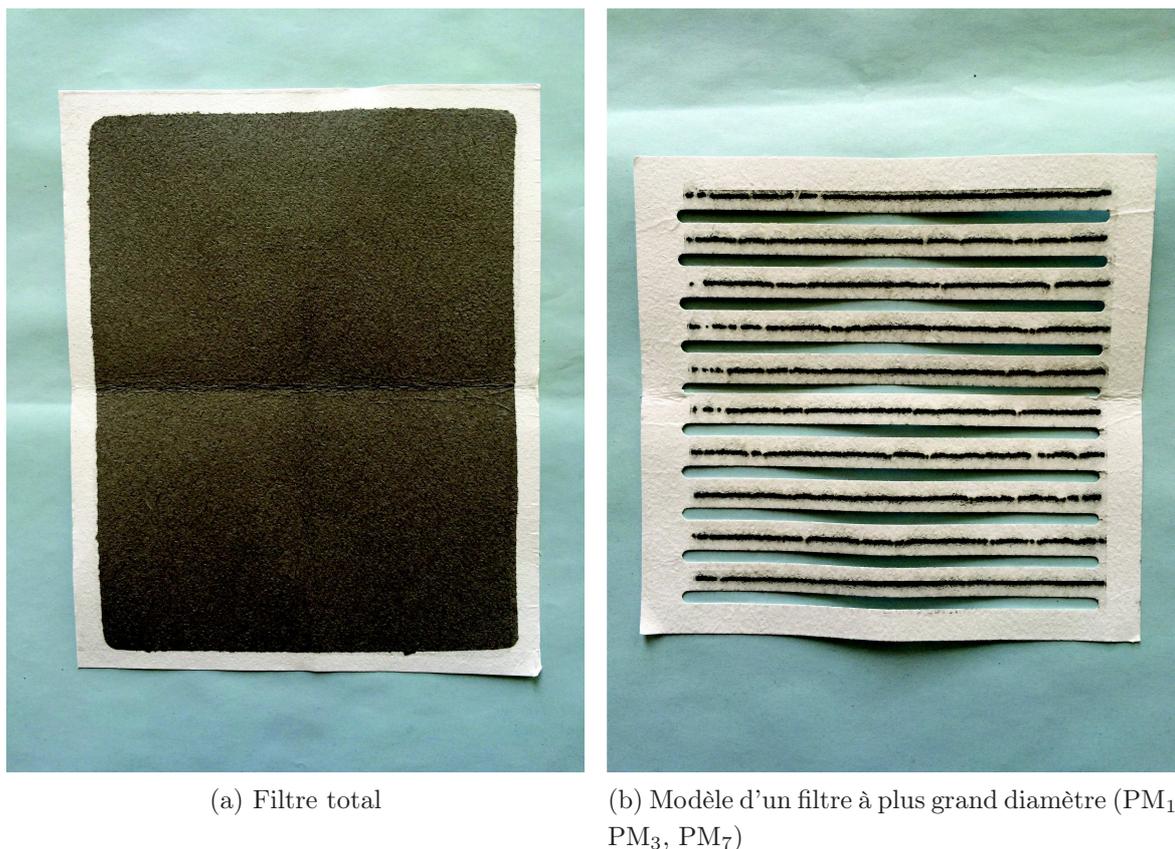


FIGURE 5.7: Filtres de prélèvement

Les impacteurs sont posés sur un grand porte filtre sur lequel on met un filtre classique, dit « filtre total », qui recueille les très fines particules.

5.2.3 Méthode de prélèvement

Le débit de prélèvement est fixé à $1\text{m}^3/\text{min}$. Les particules sont collectées sur des filtres membranes en fibre de verre de type Whatman de dimension $20 \times 25 \text{ cm}$ pour le filtre final (figure 5.7a) et $10 \times 12 \text{ cm}$ pour les filtres des étages du cascadeur (figure 5.7b). Pour la détermination de la teneur en PM_i, les filtres de chaque étage granulométrique sont pesés avant et après collecte à $0,1 \text{ mg}$ près.

En fonction du volume d'air prélevé, on détermine alors la teneur atmosphérique des particules qui est alors exprimée en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

5.3 Analyse des métaux lourds

Les métaux lourds Fe, Pb, Cu, Ni, Mn, Co, et Cd qui du point de vue sanitaire ont une incidence importante, ont été alors analysés à l'aide de l'appareil XL3t de la marque Thermo Scientific, un analyseur à XRF par énergie dispersive, contenant un tube à rayons X, émettant des radiations quand l'appareil est allumé.

Les photons X sont captés par un détecteur solide (semi-conducteur) et provoquent des ionisations dans ce dernier, les paires électrons-trous libres migrent sous l'effet du champ électrique de polarisation et provoquent des impulsions de courant dont la hauteur est proportionnelle à l'énergie du photon. Les impulsions sont séparées par un discriminateur selon leur hauteur, et les photons incidents sont dénombrés selon leur énergie. Pour déterminer l'intensité on utilise des méthodes mathématiques de déconvolution pour séparer les pics, ou plus précisément de simulation de spectre : on simule un spectre à partir d'un échantillon fictif ayant des concentrations a priori, et on ajuste les concentrations afin que le spectre simulé soit le plus proche possible du spectre mesuré. Son utilisation est simple et les données collectées suite à l'analyse des filtres peut être stockée sur l'appareil et recueilli par la suite sur son logiciel[67].

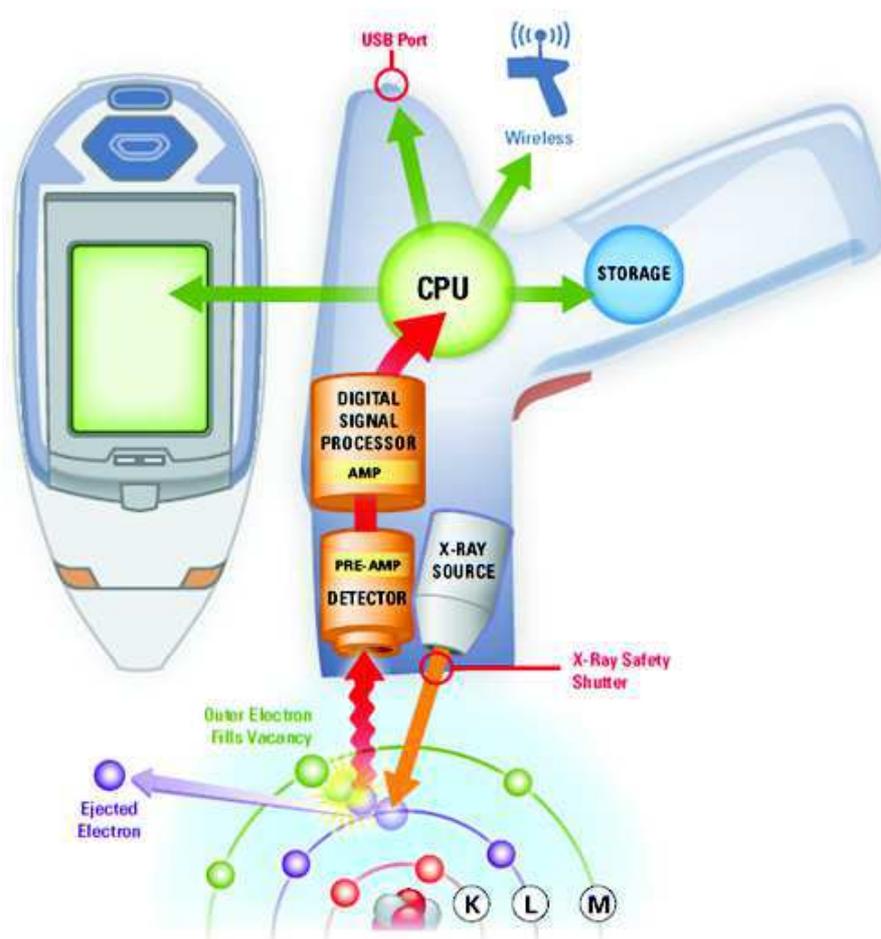


FIGURE 5.8: Principe de fonctionnement de l'analyseur

Chapitre 6

Résultats et discussions

Deux aspects ont été abordés dans cette étude : la pollution par les poussières en suspension d'une part, et les teneurs en métaux lourds d'autre part.

Les résultats obtenus suite à l'exploitation des données des prélèvements ont permis de suivre l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en particules, la distribution granulométrique de ces particules et enfin, les corrélations entre les teneurs suivant les classes.

Par la suite, les données traitées concerneront la composition chimique des particules, plus précisément leur composition en métaux lourds, analysés par XRF.

6.1 Etude des niveaux de pollution par les particules

L'analyse visuelle des filtres montre que les couches de particules collectées sur les filtres chargés - lors des prélèvements - ont souvent une couleur marron pour les classes granulométriques supérieures à 3 et 7 μm , grise pour celles inférieures à 1 et noire pour celles comprises entre 3 et 1, démontrant ainsi la présence de particules de la croûte terrestre mélangées à des suies et d'imbrûlés issus des émissions du trafic routier.

6.1.1 Teneurs atmosphériques en particules

Le niveau de pollution par les particules et leurs teneurs atmosphériques sont illustrés en figures 6.1, 6.2 et 6.3 Les teneurs moyennes, les teneurs extrêmes ainsi que les écarts types sont résumés en tableau 6.1. Pour les PM_{10} , les concentrations oscillent entre 35 et 121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sa teneur moyenne s'élevant à 73,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Les teneurs moyennes des particules respirables PM_3 et des particules très fines PM_1 sont estimées à 42,4 et 23,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement.

TABLE 6.1: Teneurs moyennes et extrêmes des PM_i à El Mohammadia en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Diamètre	Concentration Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Maximum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Minimum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ecart type	Rapport PM_i/PM_{10}
PM_1	23,655	44,571	9,280	9,098	0,321
PM_3	42,394	84,659	23,422	18,670	0,576
PM_7	64,238	105,827	39,141	22,762	0,873
PM_{10}	73,581	121,547	35,290	26,017	1,000

Les résultats obtenus ont fait l'objet de plusieurs fluctuations, comme c'est souvent le cas en pollution atmosphérique, exprimant ainsi des concentrations très différentes, variant très certainement en fonction des facteurs météorologiques et des activités anthropologiques.

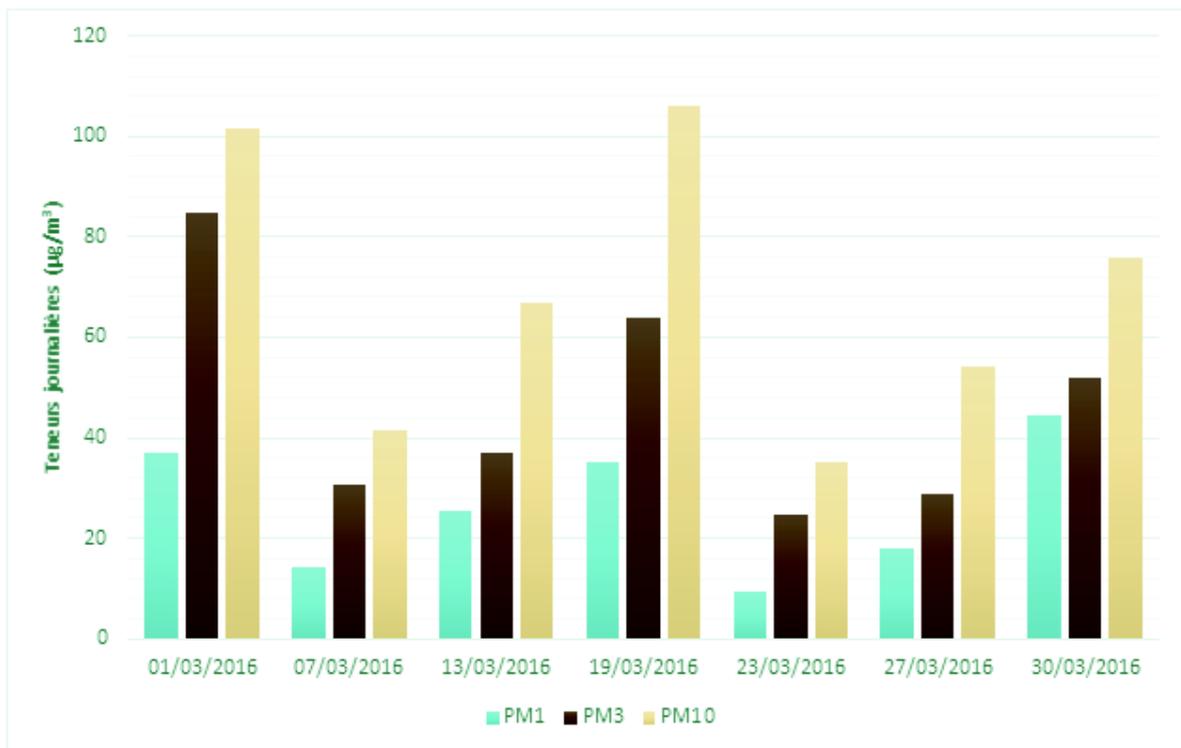


FIGURE 6.1: Evolution temporelle des teneurs journalières en PM_i (Mois de Mars)

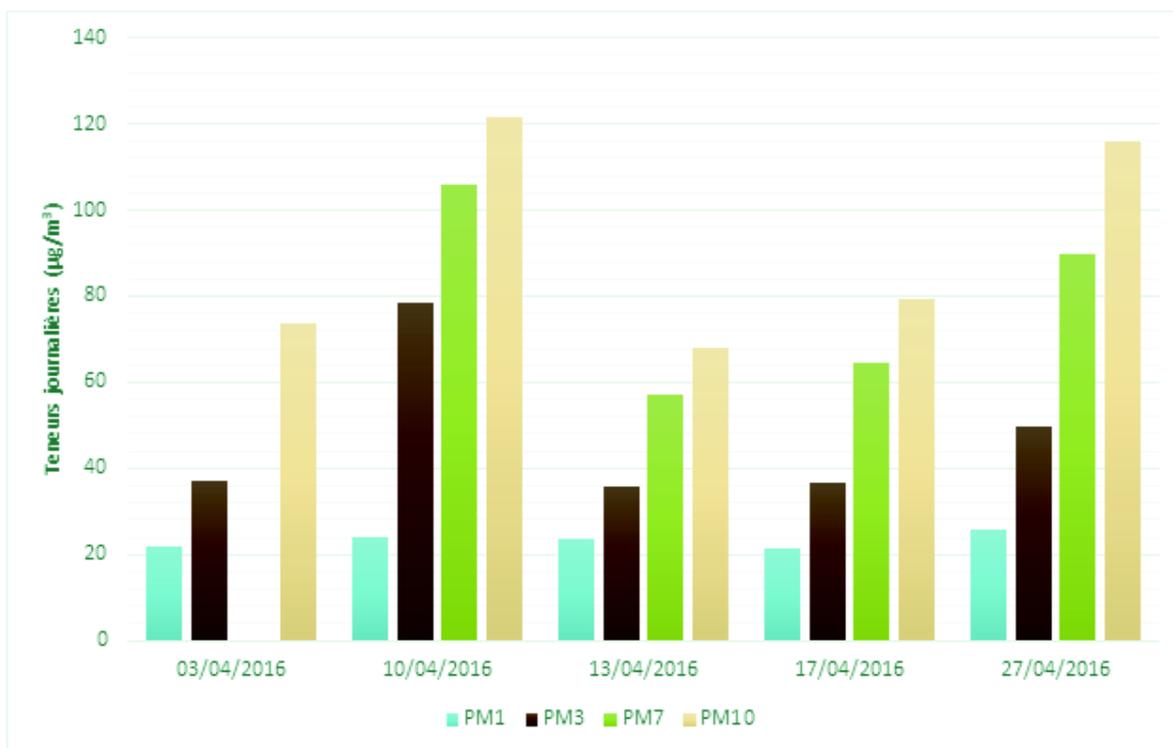


FIGURE 6.2: Evolution temporelle des teneurs journalières en PM_i (Mois d'Avril)

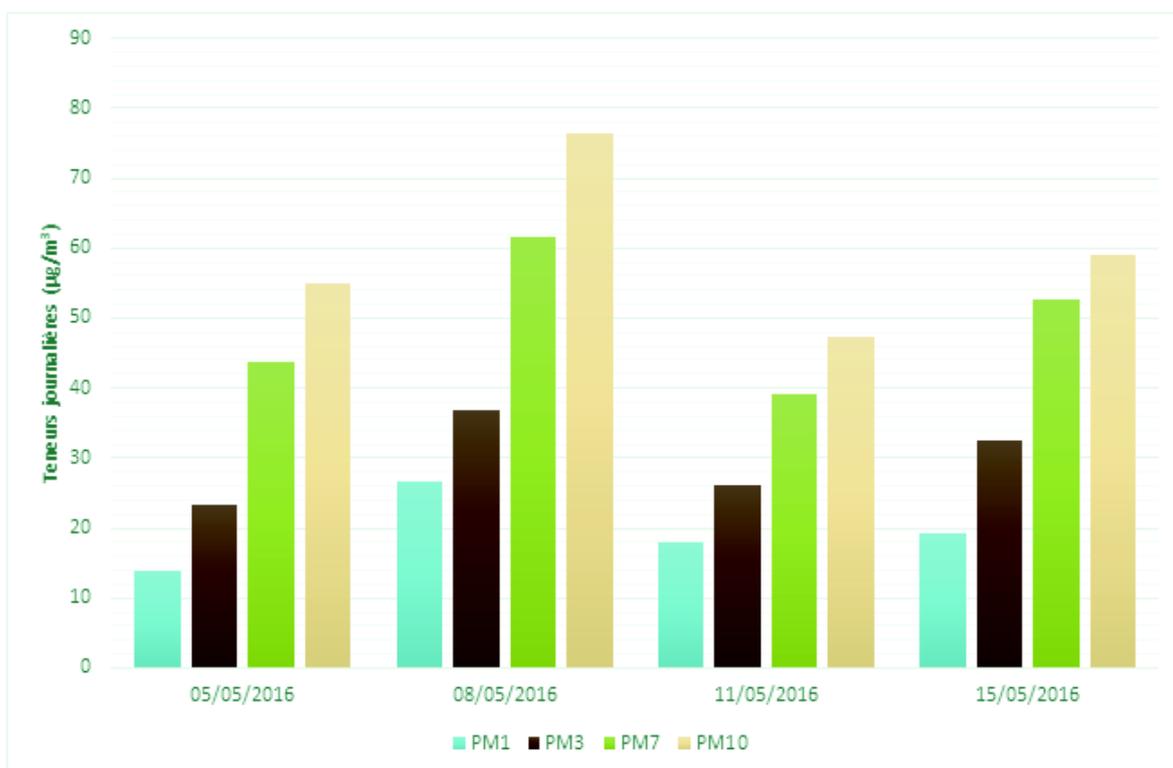


FIGURE 6.3: Evolution temporelle des teneurs journalières en PM_i (Mois de Mai)

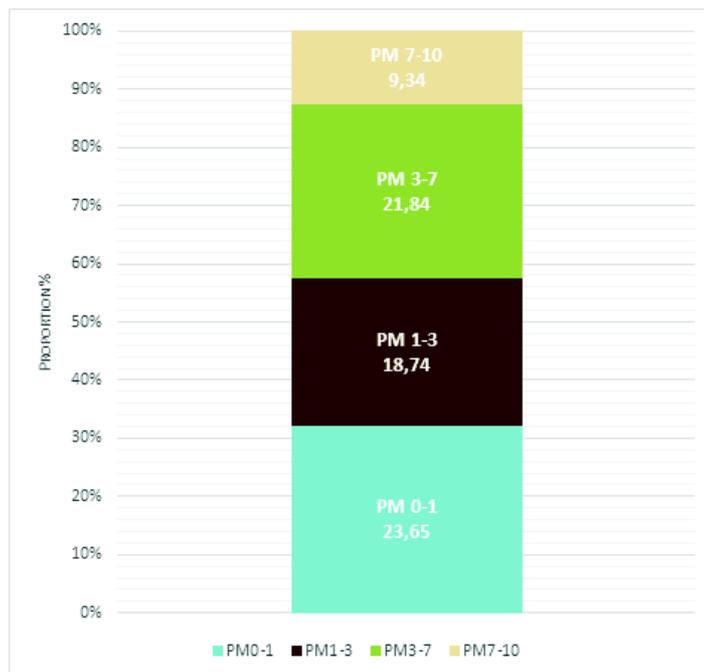


FIGURE 6.4: Teneurs moyennes des différentes classes granulométriques étudiées

La contribution des particules fines et des particules grossières – en pourcentage massique – est illustrée sur la figure 6.5. Cette répartition montre que c'est particulièrement la fraction des particules très fines (diamètres $< 1 \mu\text{m}$) qui représenterait la fraction massique la plus élevée, soit 32% des PM_{10} totaux. Par ailleurs, les particules alvéolaires de diamètre inférieur à $3\mu\text{m}$ représenteraient plus de la moitié des PM_{10} avec, comme il est possible de le constater en figure 6.6, une fraction massique d'approximativement 58%.

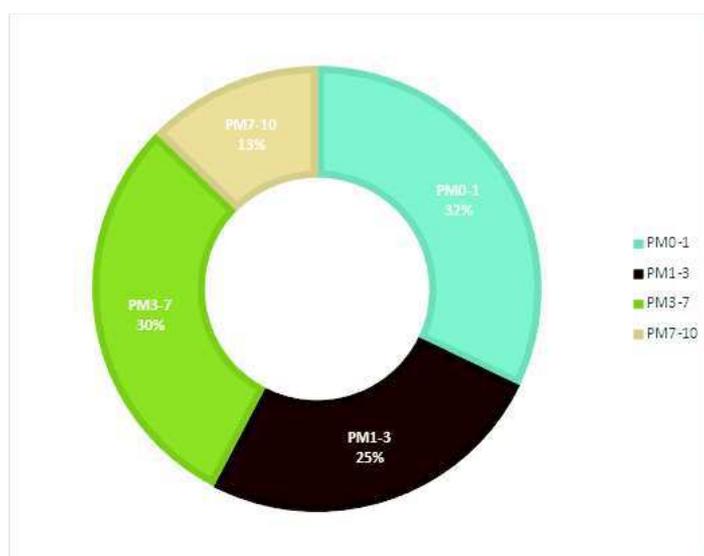
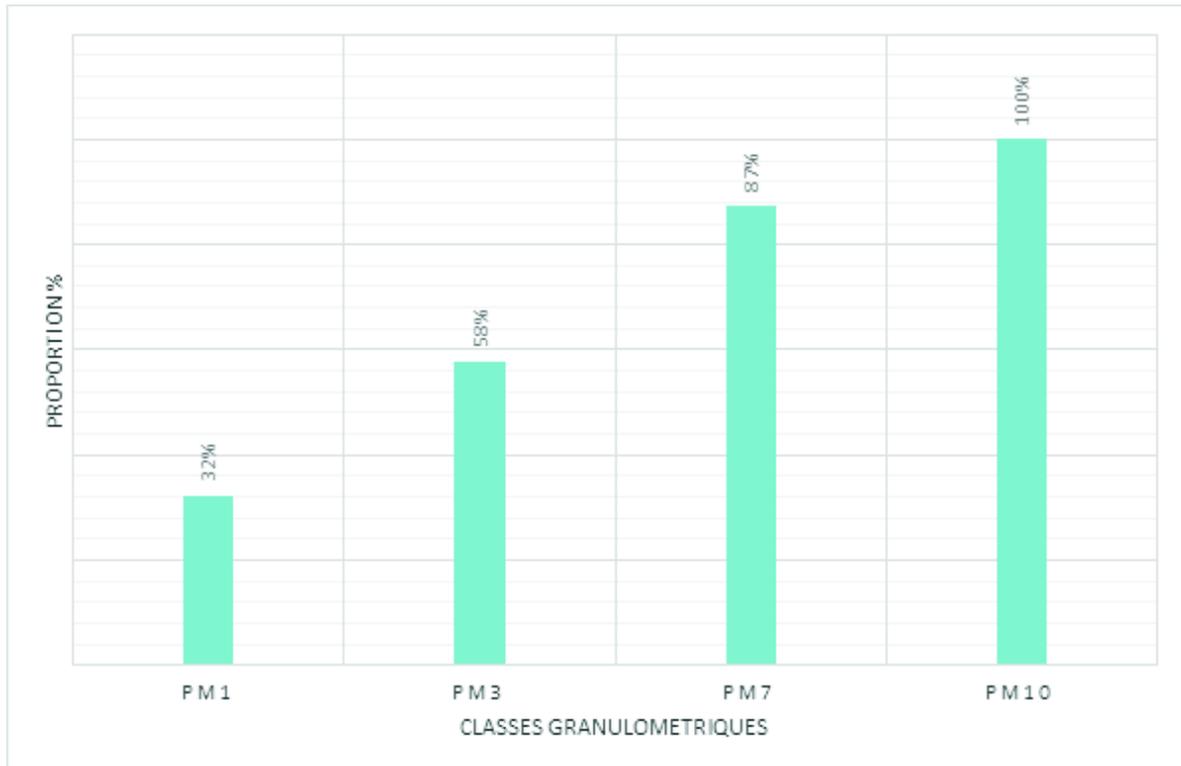


FIGURE 6.5: Contribution massique par classe granulométrique

FIGURE 6.6: Proportion massique des classes granulométriques des PM_i

6.1.2 Influence des conditions météorologiques

La comparaison des jours à fortes teneurs en PM_{10} à ceux de faibles teneurs permet de mettre en avant l'influence des conditions météorologiques (vitesse et direction du vent, précipitation, température) et de l'activité anthropologique sur la concentration des particules dans l'air. Sur la base des données météorologiques obtenues grâce à l'Office National de la Météorologie, et en supposant que les données relevées à la station de Dar-El-Beida sont valables pour le site étudié, il a été possible d'aboutir aux constatations suivantes :

- **Vent** : L'étude des variations de la vitesse du vent en fonction des teneurs en PM_{10} est illustrée en figure 6.7. Les teneurs les plus basses sont observées les jours de forte vitesse de vent, naturellement, les teneurs les plus élevées semblent être liées aux journées à faible intensité de vent.

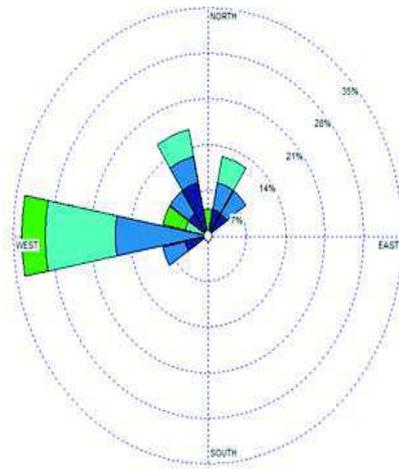
TABLE 6.2: Direction des vents, vitesses moyennes et maximales mesurées à la station météorologique de Dar-El-Beida

Date	01-mars	07-mars	13-mars	19-mars	23-mars	27-mars	30-mars	03-avr	10-avr	13-avr	17-avr	27-avr
Vitesse des vents moyenne en m/s	3,8	3,3	2	2,8	5,9	2,5	2,4	1,6	1,6	4	1,6	1,9
Direction en degré	260	270	240	310	270	260	170	50	20	270	330	340
Direction	W	W	S-W	N-W	W	W	S	N-E	E	W	N-W	N-W
Vitesse des vents maximale en m/s	13	14	5	8	18	10	12	7	8	14	10	8

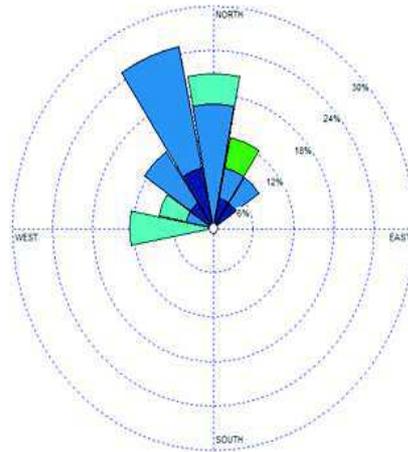


FIGURE 6.7: Influence du vent

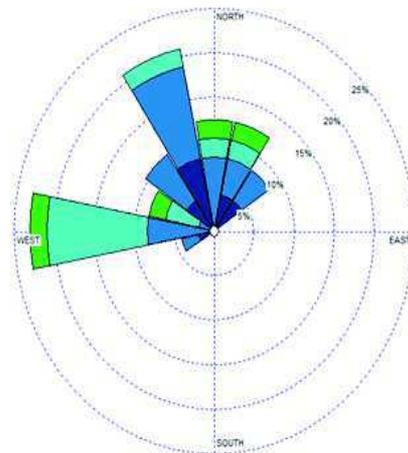
La rose des vents des durant la durée de prélèvement a pu être illustrée par le logiciel WRPLOT View, nous indiquant la direction des vents dominants dans la région d'El Mohammadia.



(a) Mois de Mars



(b) Mois d'Avril



(c) Mois de Mai

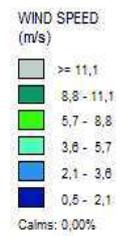


FIGURE 6.8: Rose des vents des trois mois de prélèvement

- Précipitation** : La période allant du 1^{er} Mars au 15 Mai 2016 n'a connu que trois jours de pluie. L'influence des précipitations en fonction des teneurs en PM₁₀ (illustrées en figure 6.9) met clairement en évidence la baisse des teneurs durant ces trois jours-là car avec les pluies, il y a lavage de l'atmosphère qui conduit à un air plus propre.

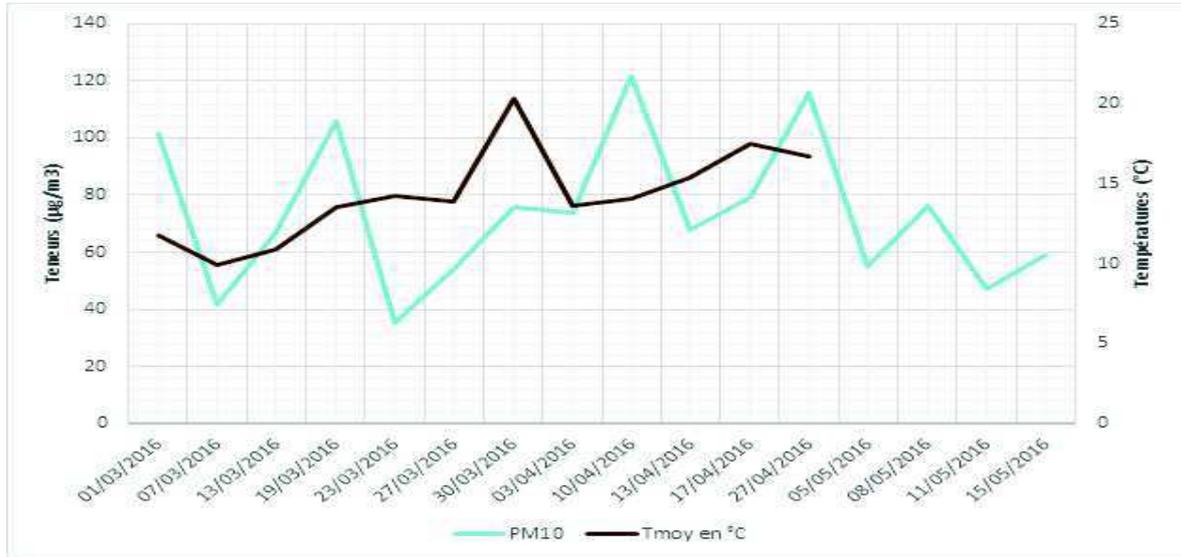


FIGURE 6.9: Influence des précipitations sur les teneurs en PM₁₀

- Température** : L'évolution des PM₁₀ en fonction de la température est illustrée en figure 6.10. La période d'étude étant courte, les températures ne montrent pas de grandes variations nous permettant d'aboutir à une conclusion en ce qui concerne leur influence sur les teneurs journalières. Des études sur de longues périodes montrent toutefois que les teneurs en PM₁₀ présentent une dépendance saisonnière.

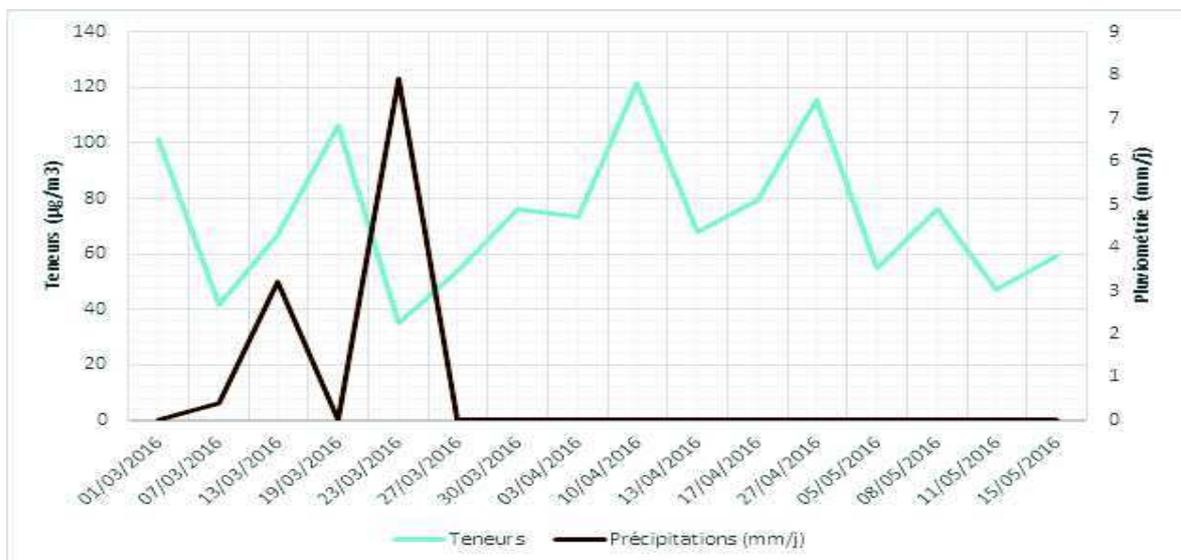


FIGURE 6.10: Evolution des PM₁₀ en fonction de la température

6.1.3 Distribution granulométrique des particules fines

La granulométrie des particules qui est indexée par un diamètre « équivalent », un paramètre important dans la détermination des propriétés, des origines et des effets des particules fines sur la santé et sur l'environnement [69]. L'étude de la distribution granulométrique permet de déterminer certains paramètres et caractéristiques qui caractérisent les particules du site étudié.

6.1.3.1 Détermination du diamètre médian D_{50}

Le diamètre médian d_{50} de la masse médiane correspond au diamètre de la fraction granulométrique ayant 50% de la masse des PM_{10} . Ce paramètre est important dans la caractérisation des particules inhalables et permet parfois, par comparaison avec les données recueillies en divers sites, de retrouver le type de source émettrice de particules.

TABLE 6.3: Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique

Etage Andersen	Masse collectée par étage (mg)	Masse cumulée	% massique cumulé	100-% massique	Diamètre de l'étage (μm)
07-10	21,450	21,450	16,88%	83,12%	7
03-7	38,475	59,925	47,16%	52,84%	3
01-3	29,683	89,608	70,51%	29,49%	1
0,01-1	37,469	127,077	100,00%	0,00%	0,01

La détermination du diamètre d_{50} peut se faire graphiquement, en portant sur un diagramme log-probabilité, le diamètre des particules (axe des ordonnées à échelle logarithmique) et le pourcentage de la masse cumulée des particules ayant un diamètre $\leq d_i$ (axe des abscisses à échelle probabilité). Cette représentation résulte de l'interprétation mathématique du fractionnement des particules par dimension. On montre en effet que la densité de probabilité est une distribution log-normale entre le diamètre des particules et la distribution de leur masse [70, 71].

L'exploitation des mesures réalisées selon les paramètres donnés en tableau 6.3 permet d'aboutir à la représentation graphique illustrée en figure 6.10. D'après ce diagramme, le D_{50} s'élève à $2,2 \mu\text{m}$. Ce diamètre est relativement élevé comparé aux villes européennes à fort taux de diésélisation, le d_{50} est en général en dessous de la valeur de 2 [72] et montre que le parc automobile algérien qui n'est pas fortement diésélisé, n'est pas à l'origine de fortes émissions de particules très fines.

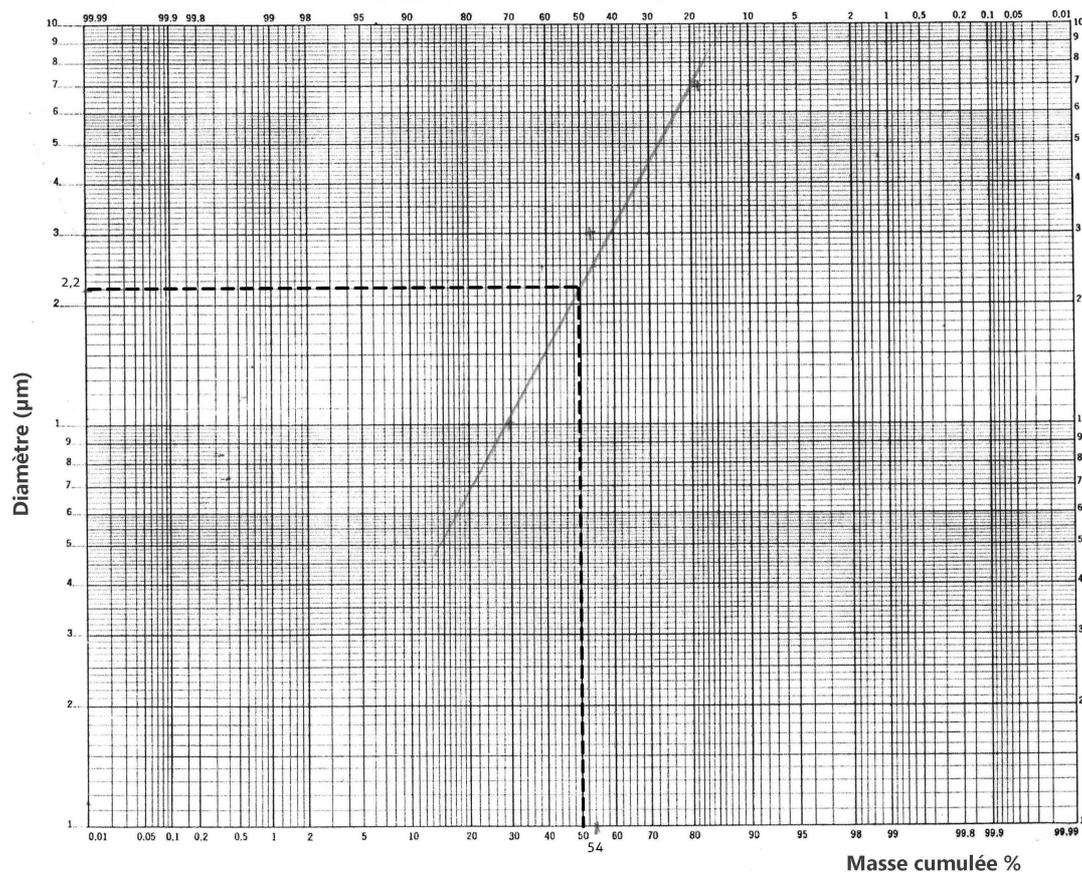


FIGURE 6.11: Diagramme log-probabilité de la masse cumulée des particules en fonction du diamètre

6.1.3.2 Teneur atmosphérique en $PM_{2,5}$

Dans le cas de l'échantillonneur utilisé, cette fraction n'est pas accessible directement par voie expérimentale puisque le cascadeur ne donne que la fraction PM_3 qui est naturellement très proche de la fraction $PM_{2,5}$. Cette fraction est importante à déterminer car elle permet d'effectuer des études comparatives et d'avoir exactement le niveau de la pollution qui atteint les sites alvéolaires du système respiratoire.

En se référant, toujours au graphe de la fonction $MC = f(D_p)$ et par projection de la valeur du diamètre ($D_p = 2,5\mu m$) sur la courbe, le pourcentage massique correspondant MC est tiré et est égale à 54%.

La détermination de la valeur des $PM_{2,5}$ fera toujours appel à une méthode graphique qui consiste à tracer le graphe représentant la fonction $PM_i/PM_{10} = f(MC_i/MC_{10})$ et ceci afin de minimiser les erreurs liées aux variations du débit d'aspiration quotidien au cours de l'échantillonnage.

TABLE 6.4: Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique pour le calcul des $PM_{2,5}$

Moyenne	Cc ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Rapport PM_i/PM_{10}	Masse collectée par étage (mg)	Masse cumulée	MC_i/MC_{10} (%)
PM_1	23,655	32%	37,469	37,469	29%
PM_3	42,394	58%	29,683	67,152	53%
PM_7	64,238	87%	38,475	105,627	83%
PM_{10}	73,581	100%	21,450	127,077	100%

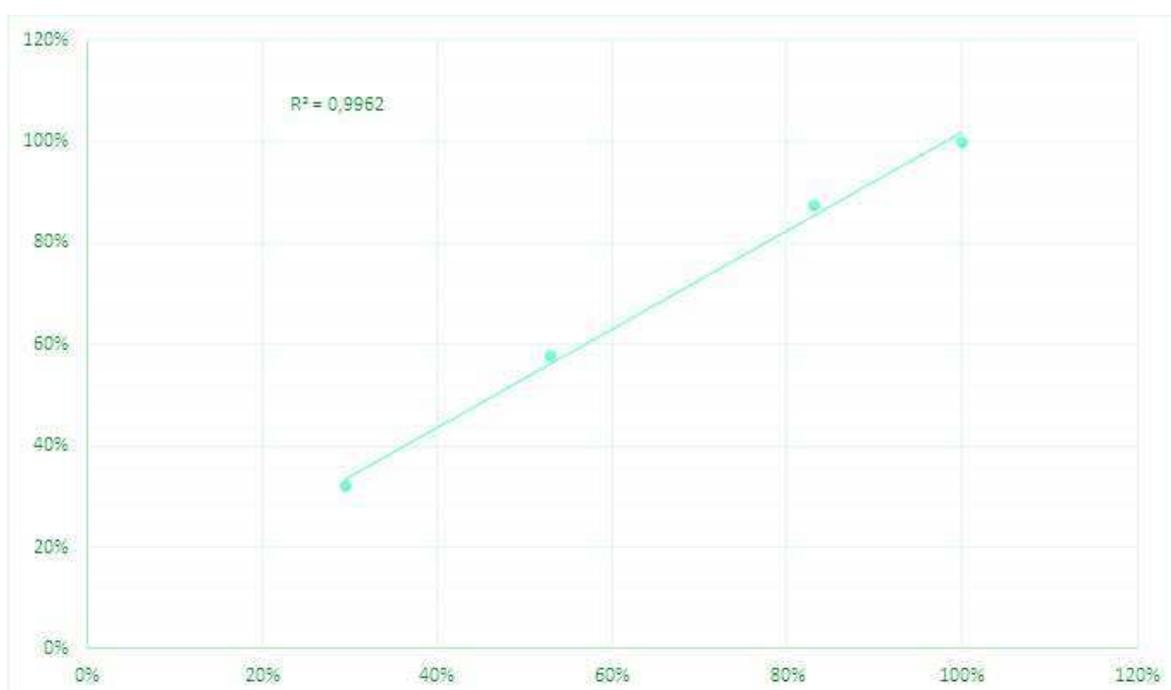


FIGURE 6.12: Représentation de la fonction (PM_i/PM_{10}) en fonction de (MC_i/MC_{10})

La courbe tendance du tracé de la fonction $PM_i/PM_{10} = f(MC_i/MC_{10})$ est une droite ayant un coefficient de corrélation $R^2 = 0.9962$ et une équation :

$$y = 0,9687x + 0,0498$$

Connaissant la concentration moyenne des PM_{10} , il suffit alors de remplacer la valeur de MC_i/MC_{10} par sa valeur (54%) dans l'équation (1) afin d'obtenir la teneur moyenne des $PM_{2,5}$ dans l'air qui égale à $42,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le rapport $PM_{2,5}/PM_3$ s'élève à 0.99. Ainsi, la teneur en $PM_{2,5}$ s'élève à 96 % de la teneur en PM_3 mesurée expérimentalement. La mesure des teneurs en PM_3 constitue donc une bonne approximation des teneurs en $PM_{2,5}$ et permet d'accéder à celles-ci lorsqu'on ne dispose pas d'une tête de prélèvement

sélective des $PM_{2,5}$. En somme, les niveaux de pollution atteints durant la période étudiée sont :

- Particule inhalables $PM_{10} = 73,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- Particules respirables $PM_{2,5} = 42,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit 57% des PM_{10} ;
- Particules très fines $PM_1 = 23,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit 32% des PM_{10} .

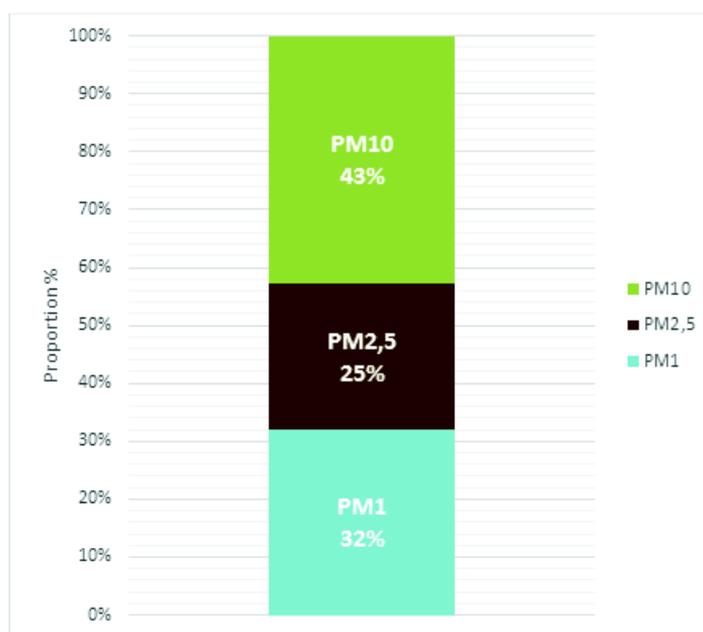


FIGURE 6.13: Contribution (en % massique) aux PM_{10} .

Cette figure montre que plus de la moitié des particules inhalables peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires et qu'environ un tiers se dépose et se fixe de manière irréversible sur les tissus alvéolaires en provoquant l'apparition de plusieurs maladies respiratoires. De plus, ce sont ces particules très fines qui véhiculent les composés les plus toxiques tels que les métaux lourds, les HAP, les nitrates et les sulfates.

En Europe où les activités industrielles sont plus importantes, le taux des $PM_{2,5}$ dépasse les 65 %. Ainsi, à Alger, on a une part plus importante en particules grossières issues de l'écorce terrestre (faible végétation, forte érosion des sols, etc.).

6.1.3.3 Etude de la distribution modale des particules atmosphériques

Plusieurs études ont montré que les aérosols atmosphériques étudiés par classe granulométrique présentent une courbe de distribution bimodale, voire trimodale [73, 74, 75]. Le type de distribution apparaît lorsqu'on construit le graphe ($\Delta m / \Delta \text{Ln} d$) en fonction du diamètre des particules d_i (en μm). Δm représente la masse des particules retenues sur un étage et $\Delta \text{Ln} d$ est calculé selon :

$$\Delta \text{Ln} d = \text{Ln} d_{(\text{étage}_{i+1})} - \text{Ln} d_{(\text{étage}_i)}$$

L'exploitation des résultats obtenus dans notre étude est résumée dans le tableau 6.5. Dans ce tableau, l'étage au diamètre de 10 μm correspond à la fraction comprise entre les TSP et les PM_{10} . Les TSP ont un diamètre supposé égale à 30 μm et sachant que les PM_{10} constitue 70% des TSP [76] on évalue leur concentration a 105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Les données nécessaires pour la représentation graphique de la distribution granulométrique des particules sont rapportées dans le tableau :

TABLE 6.5: Calcul de la distribution modale des particules

Diamètre	$\Delta \text{Ln} D$	Δm	$\Delta m / \Delta \text{Ln} D$
10	1,099	24,527	22,325
7	0,357	9,342	26,193
3	0,847	21,845	25,782
1,5	0,693	10,218	14,742
1	0,405	8,521	21,015
0,01	4,605	23,655	5,137

Comme mentionné dans la littérature [77, 78], il est nécessaire de prédire en premier lieu le nombre de modes caractérisant la distribution granulométrique des particules étudiées et ce, par le tracé des représentations discontinues de la pollution collectée par étage.

Sur la base des données figurant dans le tableau 6.5, on représente graphiquement la fonction $\Delta m / \Delta \text{Ln} (D_p) = f(D_p)$ sur un repère semi-logarithmique (les diamètres D_p sur l'axe des abscisses en échelle logarithmique et $\Delta m / \Delta \text{Ln}(D_p)$ sur l'axe des ordonnées en échelle arithmétique). Nous obtenons le graphe illustré par la figure 6.14.

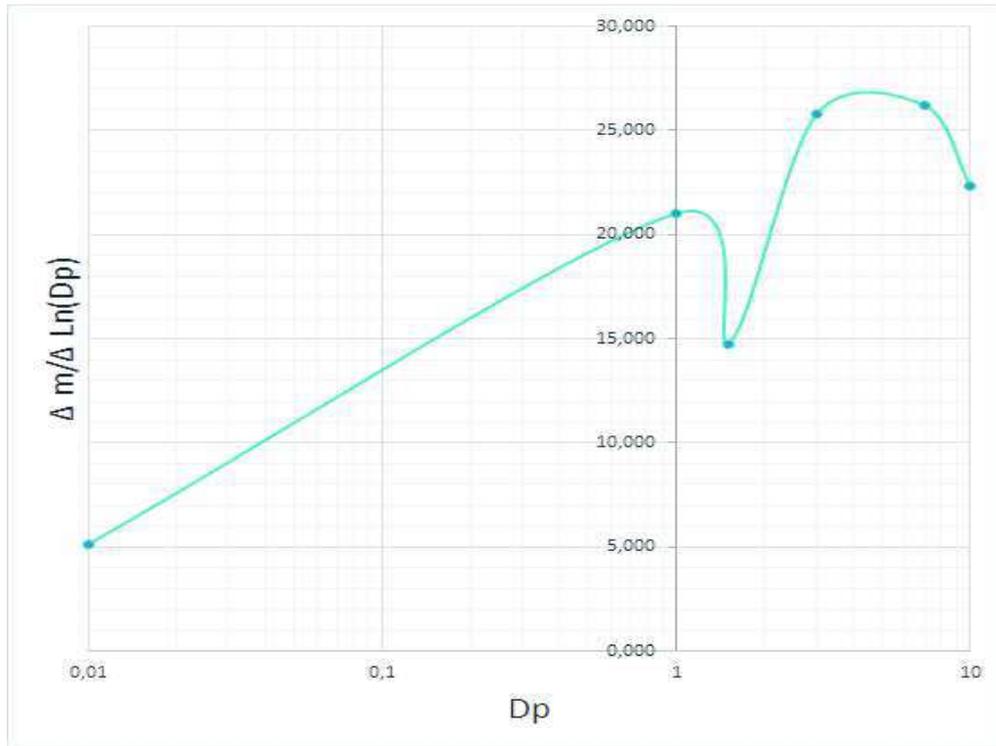


FIGURE 6.14: Distribution modale des particules

Il en résulte ainsi une courbe de distribution bimodale des particules fines, centrée autour des diamètres de 4 et 1,1 μm . Ce qui est caractéristique d'un milieu urbain où le mode des particules fines est observé vers 0.65 - 1.1 μm tandis que le mode des grosses particules est centré autour de 3.3 - 4.7 μm [79]. D'autres travaux ayant étudié un grand nombre de classes granulométriques, en particulier dans le domaine compris entre 0 et 1 μm , aboutissent à une distribution trimodale où le troisième mode apparaît vers 0,1 μm [72, 80, 73]. Il est clair que plus on dispose d'étages dans le cascadeur, plus on a de détails sur la distribution.

6.1.4 Etude des corrélations entre les différentes classes granulométriques

L'évolution journalière des teneurs en particules conventionnelles (PM_1 , PM_3 , PM_7 et PM_{10}) illustrée en figure 6.15 montre une similitude dans leur évolution. Ce constat est plus apparent entre les PM_1 et les PM_3 , ce qui suggère que ces particules ont en grande partie la même origine et présentent le même comportement dynamique du point de vue agrégation de particules submicroniques, dispersion et déplacement sous l'action des vents, séjour dans l'atmosphère, etc.

Les corrélations obtenues entre les différentes fractions granulométriques sont illustrées dans les figure 6.16a à 6.16g . Les coefficients de corrélations qui en découlent sont donnés dans le tableau 6.6.

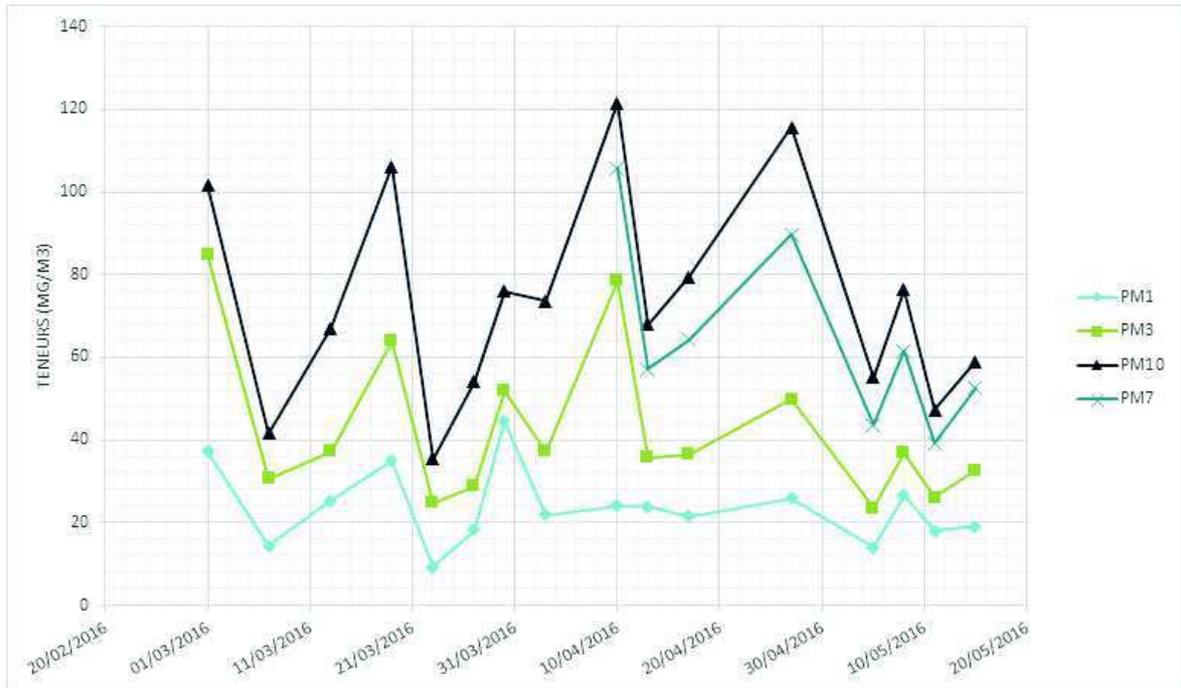


FIGURE 6.15: Évolution des teneurs en PM_1 , PM_3 et PM_{10} mesurées à Alger

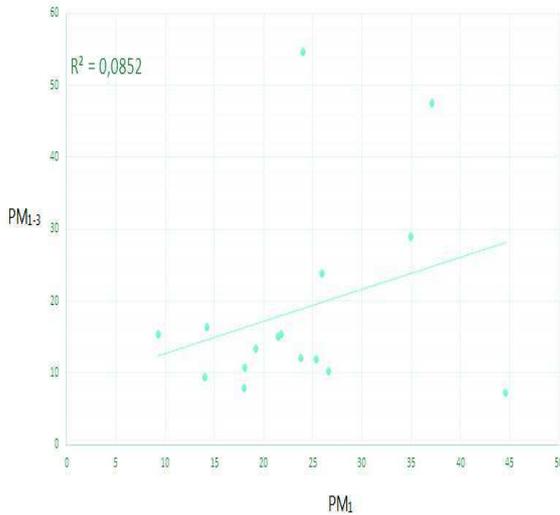
TABLE 6.6: Coefficients de corrélations liant les différentes classes granulométriques

R^2	PM_1	PM_{1-3}	PM_3	PM_{3-10}	PM_{10}
PM_1	1	0,0852	0,4957	0,0546	0,3981
PM_{1-3}	0,0852	1	0,7828	0,035	0,5412
PM_3	0,4957	0,7828	1	0,0421	0,4957
PM_{3-10}	0,0546	0,035	0,0421	1	0,5179
PM_{10}	0,3981	0,5412	0,4957	0,5179	1

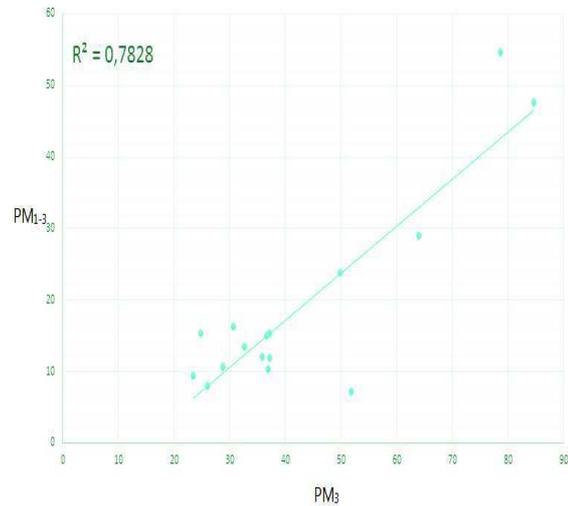
L'examen des corrélations mathématiques entre les trois classes de particules montre qu'il existe d'assez bonnes corrélations entre les PM_1 et PM_3 , ce qui signifie que ces derniers ont une source commune, en l'occurrence, le trafic routier et les particules secondaires qui en découlent. Entre les PM_{3-10} d'une part, et les PM_{1-3} , PM_3 et PM_1 d'autre part, le coefficient R^2 est très faible, ce qui est tout à fait normal puisque la constitution majeure des PM_{3-10} comporte des particules grossières issues de l'écorce terrestre et est donc indépendante des particules plus fines qui elles, sont issue des activités humaines.

On peut donc rencontrer des régions (cas des zones sahariennes) où les teneurs en PM_{10} augmentent fortement alors que la partie fine des PM_1 et $PM_{2,5}$ qui est la plus toxique reste modérée.

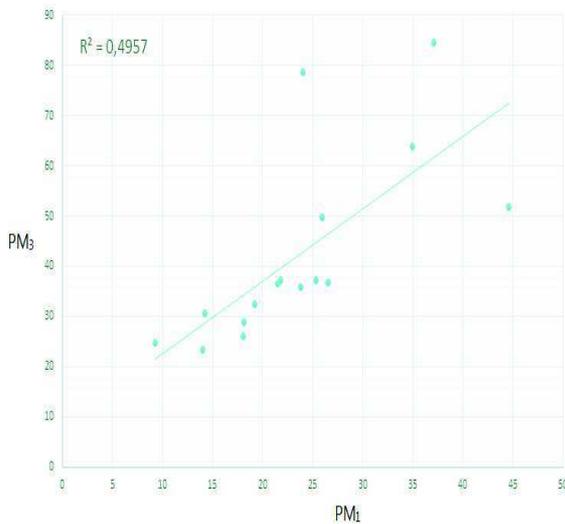
Reste à noter que les corrélations entre les classes granulométriques et leurs sous-classes (les particules très fines et intermodales avec les particules alvéolaires et respirables ; les particules alvéolaires et les grosses particules avec les particules respirables), sont plus importantes qu'entre deux classes indépendantes (PM_1 avec PM_{1-3} et PM_{3-10} avec PM_3) puisque les uns sont inclus dans les autres.



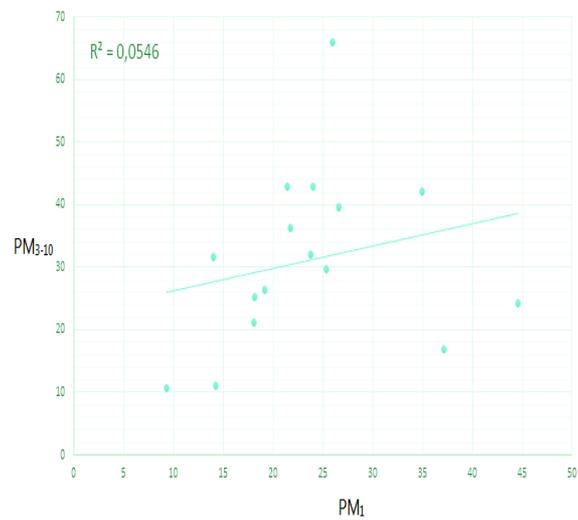
(a) Corrélation entre les teneurs en PM_1 et celles en PM_{1-3}



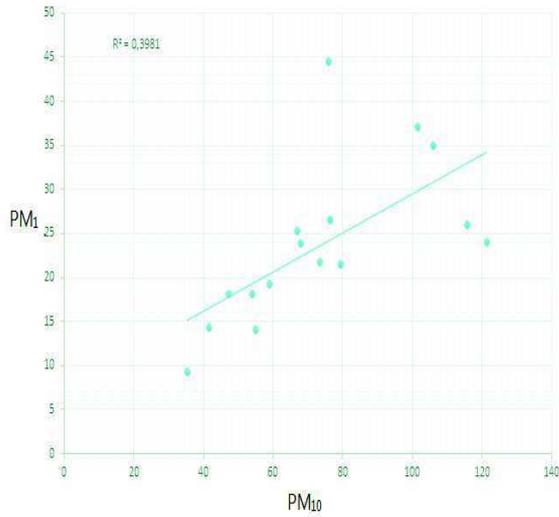
(b) Corrélation entre les teneurs en PM_{1-3} et celles en PM_3



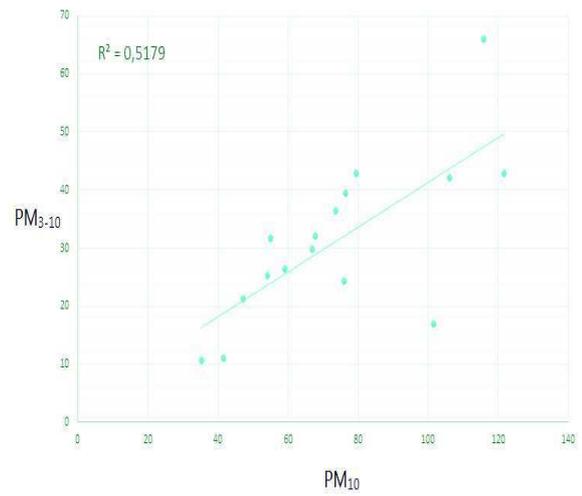
(c) Corrélation entre les teneurs en PM_1 et celles en PM_3



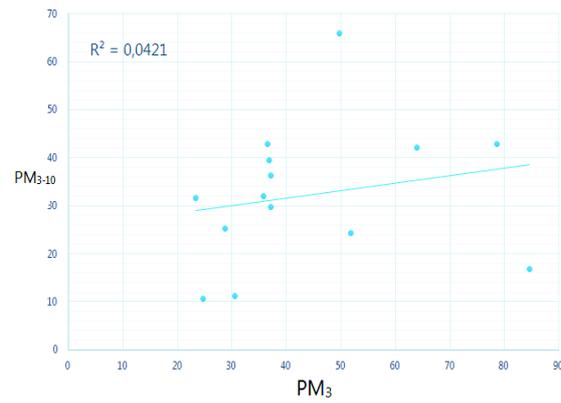
(d) Corrélation entre les teneurs en PM_1 et celles en PM_{3-10}



(e) Corrélation entre les teneurs en PM₁ et celles en PM₁₀



(f) Corrélation entre les teneurs en PM₃₋₁₀ et celles en PM₁₀



(g) Corrélation entre les teneurs en PM₃ et celles en PM₃₋₁₀

6.2 Ampleur de la pollution : Comparaison aux normes et aux teneurs d'autres villes

Afin de situer l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines mesurées à Alger, il est intéressant de comparer les résultats obtenus aux normes et recommandations internationales. La réglementation concernant les PM_{10} est assez récente et n'est pas normalisée dans la majorité des pays du monde. Généralement, on parle de poussières, de particules en suspension, mais que très rarement de PM_{10} . Quant aux $PM_{2,5}$, ces particules commencent à peine à être étudiées et il n'existe pas encore un historique de mesure suffisant.

L'OMS fixe des recommandations ainsi que des objectifs à atteindre comme cité au chapitre IV, elle recommanderait donc une limite d'exposition journalière de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et une moyenne annuelle de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ concernant les PM_{10} . Pour l'Algérie qui a promulgué en 2006 un décret fixant les normes en matière de pollution atmosphérique (CO , SO_2 , NO_2 , O_3 et particules en suspension), le législateur utilise le terme vague de particules fines en suspension sans préciser s'il s'agit des particules totales en suspension (TSP de diamètre $< 30\mu\text{m}$) ou de PM_{10} . Dans ce décret on retrouve un objectif de qualité de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et une valeur limite de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle [75]. L'ensemble de ces valeurs guides sont résumées sur le tableau 6.7.

TABLE 6.7: Normes et recommandations régissant les PM_{10}

Pays	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$PM_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Réf.
Etats-Unis	150 Maximum sur 24h 50 moyenne annuelle	15 moyenne annuelle 35 moyenne sur 24h	[81]
Canada (2011)	120 Valeur limite pour les particules totales	30 Valeur limite sur 24h	[82]
OMS (2008)	20 moyenne annuelle 50 moyenne sur 24h	10 moyenne annuelle 25 moyenne sur 24h	[83]
Union-Européenne	50 limite journalière à ne pas dépasser plus de 7 fois par an. 20 moyenne annuelle	10 moyenne annuelle 25 moyenne sur 24h	[84]
Suisse	50 moyenne sur 24h	20 moyenne annuelle	[74]
Algérie	80 moyenne annuelle 50 objectif de qualité	-	[75]

La figure 6.16 représente l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques en PM_{10} à Alger, comparées à certaines normes et recommandations.

La comparaison par rapport à ces normes (figure 6.16) montre que la pollution par les PM_{10} atteint des niveaux très élevés. Les seuils limites préconisés sont largement dépassés. A titre d'exemple, la valeur limite journalière recommandées par l'OMS (et qui représente l'objectif qualité dans la réglementation algérienne), est dépassée 13 jours sur les 16 jours de prélèvement, ce qui représente 81% des journées étudiées. La valeur limite annuelle algérienne est également dépassée 4 jours sur 16, soit le quart des journées étudiées.

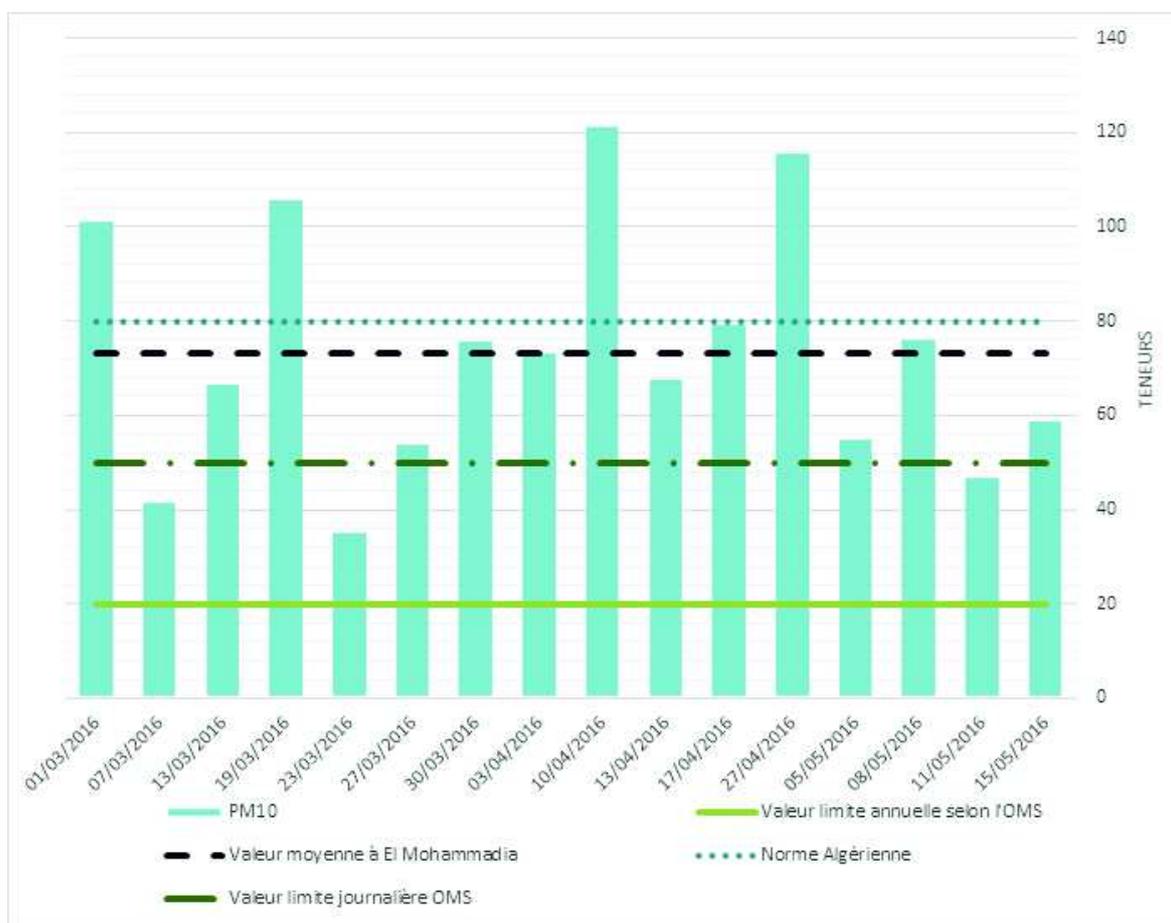


FIGURE 6.16: Comparaison des teneurs atmosphériques en PM_{10} par rapport aux normes

La même situation prévaut pour les particules fines $PM_{2,5}$ où – comme nous pouvons le constater sur la figure 6.17, les seuils limites préconisés par l'OMS sont largement dépassés.



FIGURE 6.17: Comparaison des teneurs atmosphériques en $PM_{2,5}$ par rapport aux normes

A partir de la dernière base de données de l’OMS, et dans un but comparatif, des villes de pays émergents ont été sélectionnées, telles que Mexico, Bucarest en Roumanie, Sofia en Bulgarie et Cracovie en Pologne. Mais aussi des villes de la rive Nord de la Méditerranée telles que Valence, Barcelone et Marseille ainsi que des villes de la rive Méditerranéenne Sud telles que Tanger, Tunis et le Caire qui du point de vue infrastructures, parc automobile et climat se rapproche le plus de notre site d’étude. D’autres villes européennes respectant les normes et recommandations ont été retenues telles que Berne en Suisse, New Jersey aux USA et Londres au Royaume-Uni.

L’étude comparative des teneurs en PM_{10} prélevées à Alger et celles dans les différentes villes du monde (tableau 6.8) montre alors qu’Alger détient un fort niveau de pollution en particules inhalables et alvéolaires, les niveaux de pollutions dépasseraient ceux de toutes les villes citées sauf Tunis et le Caire - qui atteint des situations dramatiques. Signalons également que les valeurs mesurées dans le cadre de cette étude restent supérieures aux valeurs enregistrées dans le cadre d’études établies antérieurement (à Bab-Ezzouar et Place du 1^{er} Mai).

En dernier lieu, les émissions automobiles combinées aux émissions naturelles de l’érosion terrestre (nudité des sols, aridité du climat, sources de poussières diverses), contribuent fortement à la pollution de l’air par les particules en ce site urbain.

TABLE 6.8: Tableau comparatif des teneurs en PM_i dans différents sites urbains au monde

Pays	Ville	Teneur annuelle PM_{10} $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Teneur annuelle $PM_{2,5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Année	Type de station	Réf.
United States of America	New York-Northern New Jersey	16	9	2014	-	[85]
Espagne	Valence	17	11	2013	Urbain	[85]
United Kingdom	Londres	22	15	2013	Urbain	[85]
Suisse	Berne	23	16	2013	Urbain	[85]
Espagne	Barcelone	24	15	2013	Urbain	[85]
France	Marseille	29	17	2014	Urbain	[85]
Mexico	Mexico city	42	20	2014	-	[85]
Roumanie	Bucarest	31	23	2013	Urbain	[85]
Pologne	Cracovie	51	37	2013	Urbain	[85]
Maroc	Tanger	57	24	2013	-	[85]
	Casablanca	61	26	2013	Urbain	[85]
Tunisie	Tunis	90	38	2010	Urbain	[85]
Egypte	Le Caire	179	76	2013	47 stations	[85]
Chine	Beijing	108	85	-	2014	[85]
Inde	Delhi	229	122	-	2013	[85]
Algérie	Place 1er Mai	64,1	28,1	2006	Urbain	[86]
	Bab-Ezzouar	70,4	30,3	2005	Urbain	[87]
	Alger (El Mohammadia)	73,6	42,15	2016	Urbain	Présente étude

6.3 Etude des métaux lourds contenus dans les particules inhalables

6.3.1 Niveaux de pollution par les métaux lourds

Formées par voie naturelle ou anthropique, les particules fines peuvent entraîner des métaux lourds présents à l'état de traces qui doivent être surveillés, car toxiques et pénétrants jusqu'aux alvéoles pulmonaires. L'analyse ayant été faite par XRF une grande partie des métaux présents a été détectée.

L'étude des métaux lourds (Pb, Cr, Mo, Zn, Ni, Cd, Cu, Co, Fe, Mn et Ti) véhiculés par les différentes classes granulométriques des particules fines a porté sur 10 échantillons, soit environ 35 fractions granulométriques. Les figures allant de 6.18 jusqu'à 6.20 représentent l'évolution temporelle des teneurs atmosphériques mesurées pour chaque métal dans les fractions PM_1 , PM_3 , PM_7 et PM_{10} .

Les tableaux 6.10 et 6.9 résume les teneurs moyennes et maximales des différents métaux dans les quatre classes granulométriques. Les figures 6.21 et 6.22 illustrent les teneurs moyennes par classe PM_i .

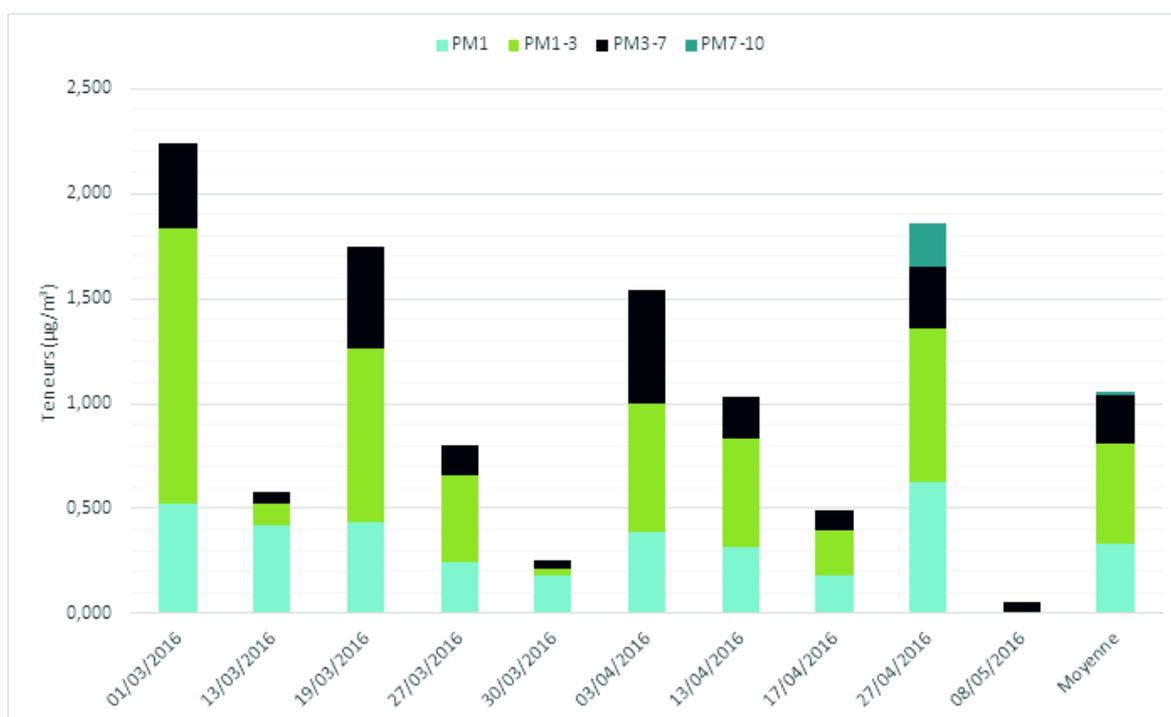
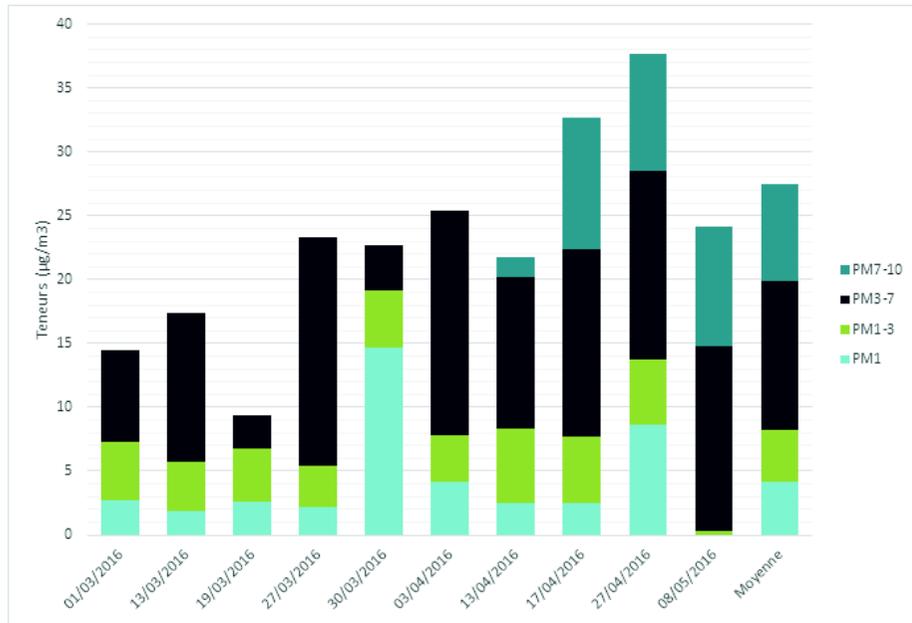
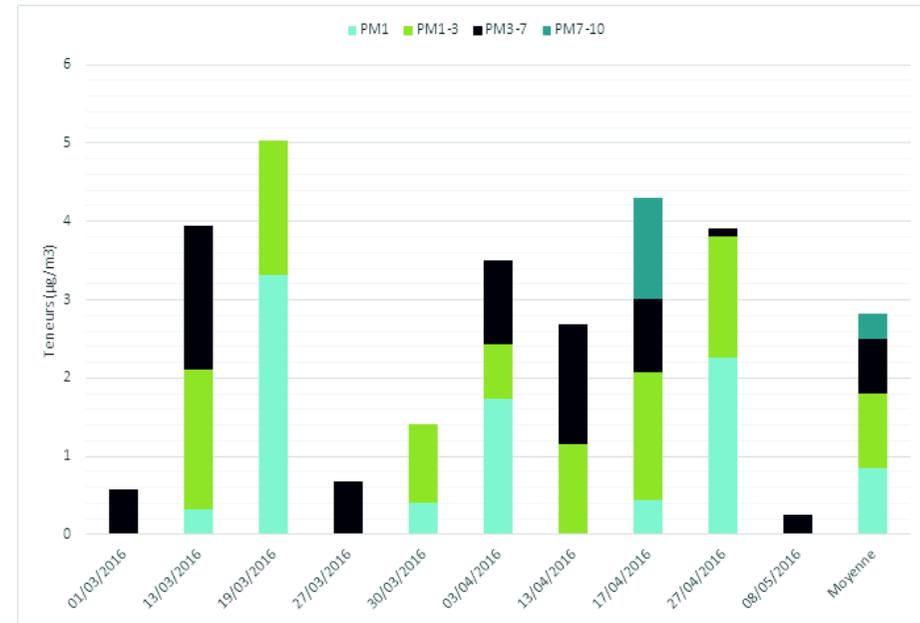


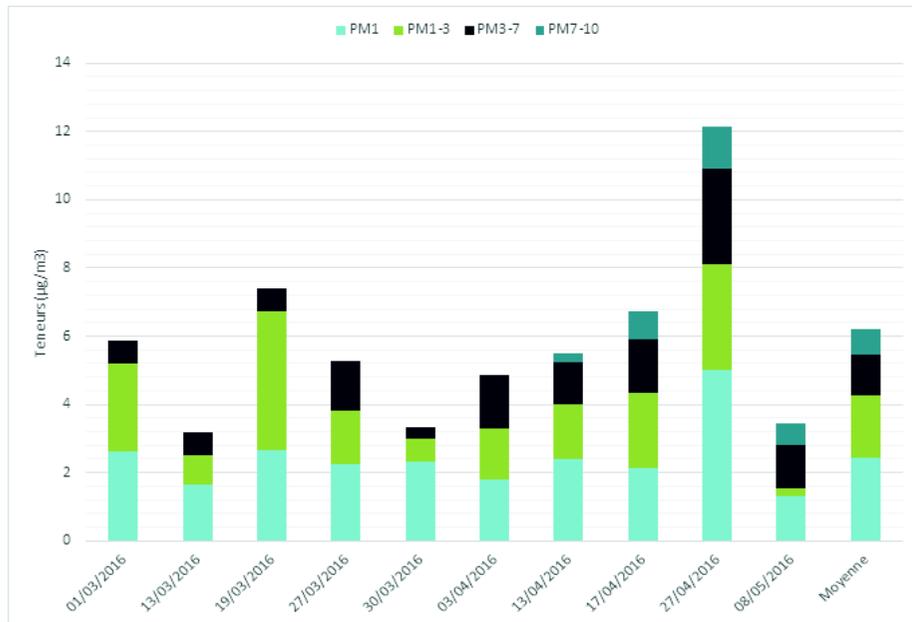
FIGURE 6.18: Evolution temporelle des teneurs en Pb



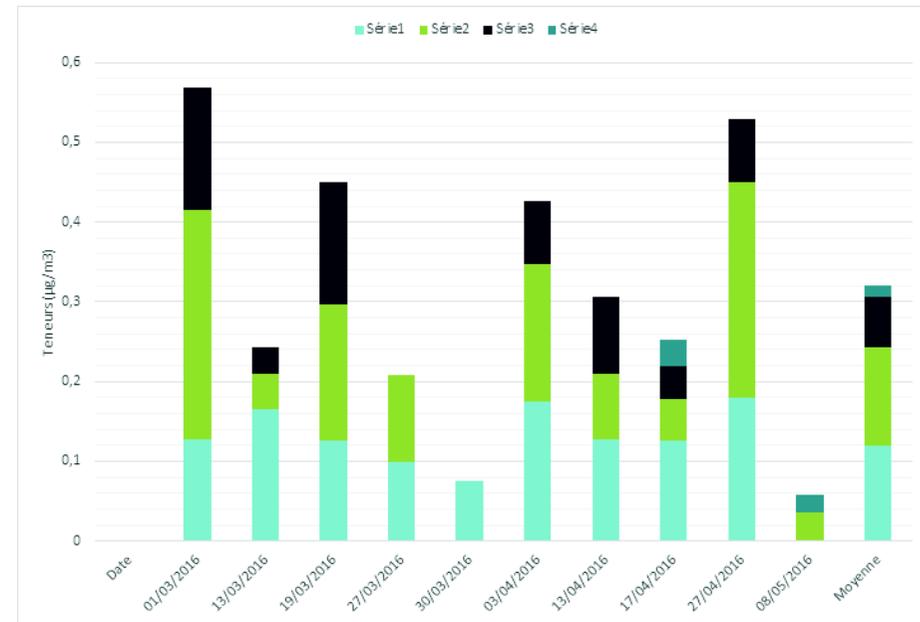
(a) Evolution temporelle des teneurs en Ca



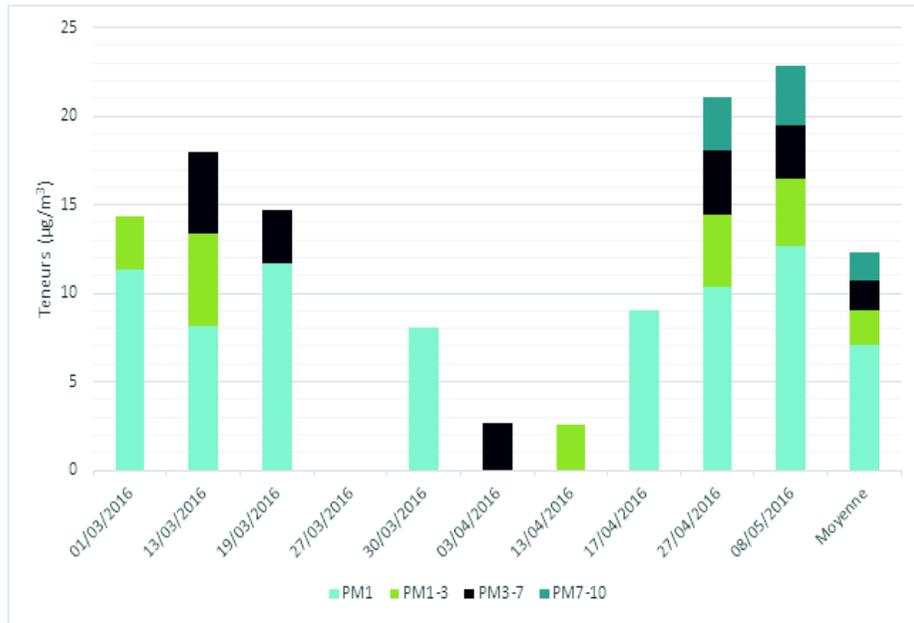
(b) Evolution temporelle des teneurs en K



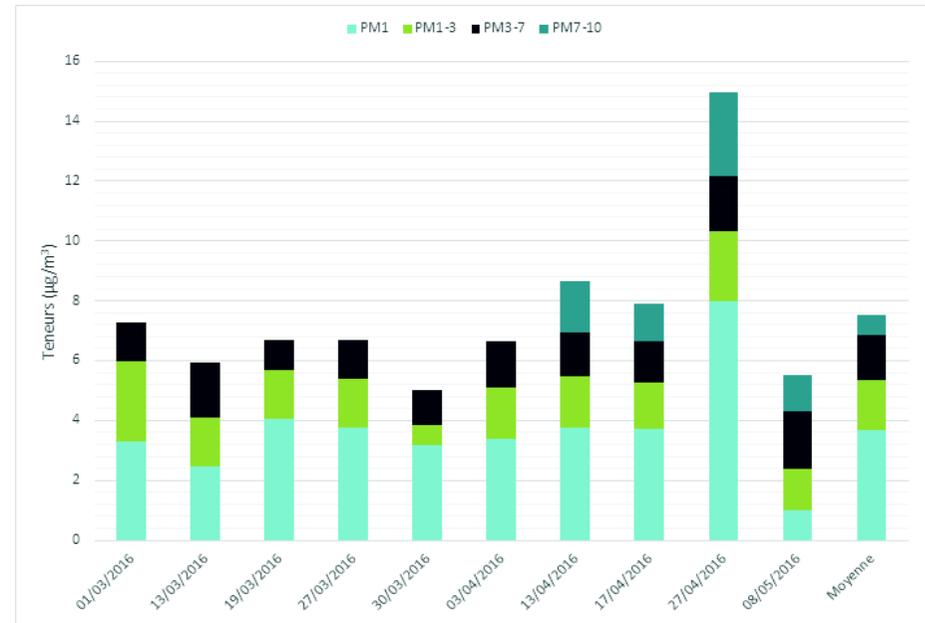
(c) Evolution temporelle des teneurs en S



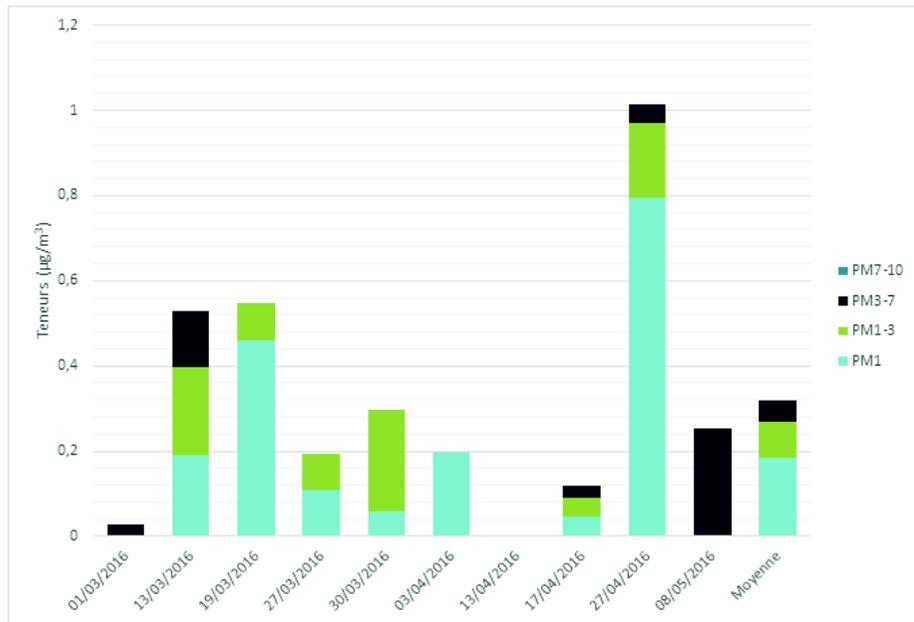
(d) Evolution temporelle des teneurs en As



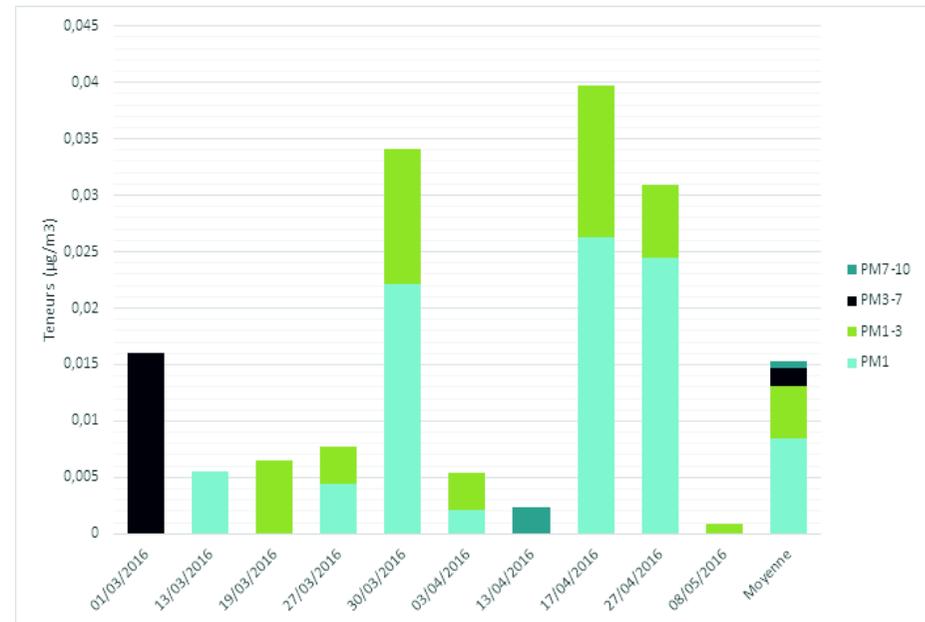
(a) Evolution temporelle des teneurs en Ba



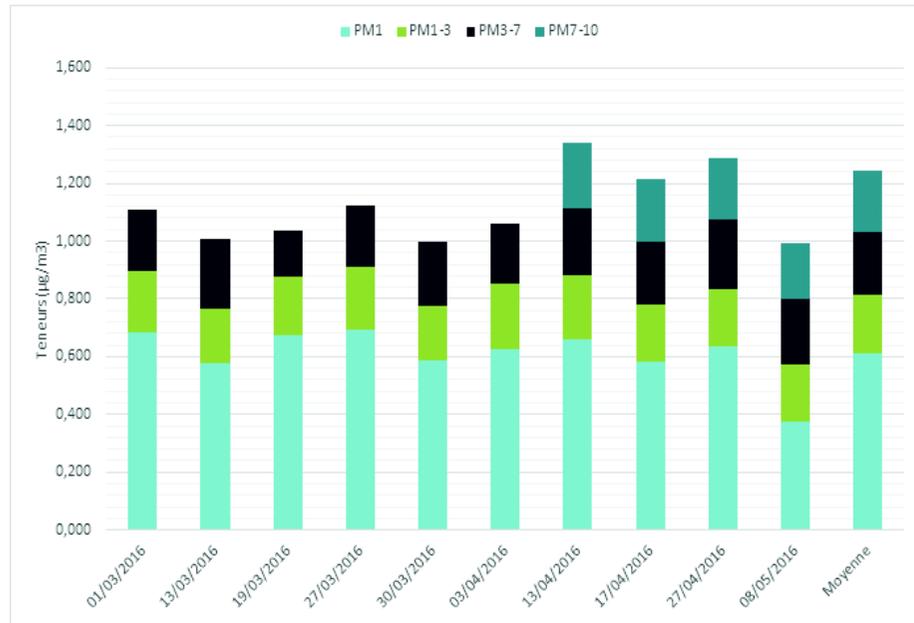
(b) Evolution temporelle des teneurs en Mn



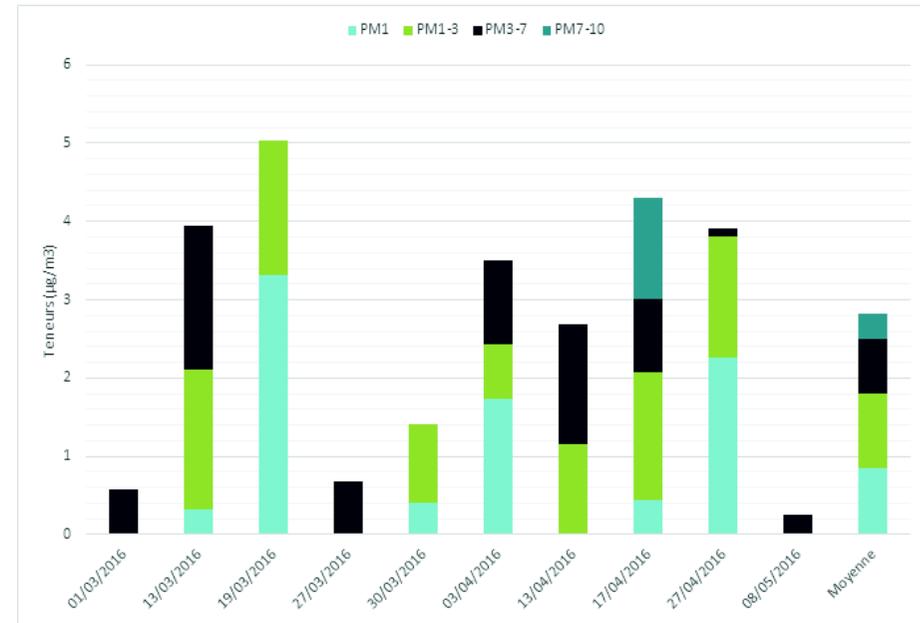
(c) Evolution temporelle des teneurs en Ti



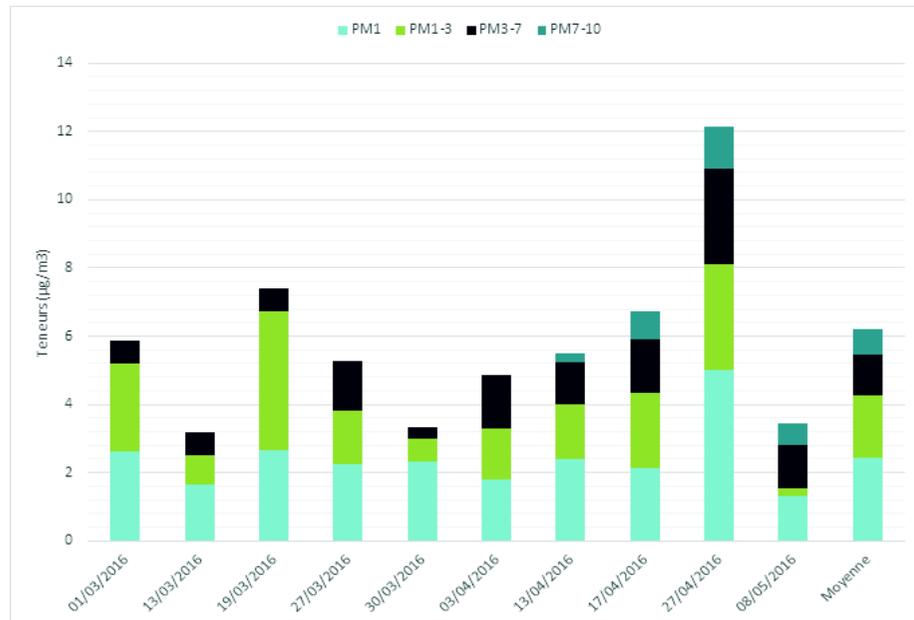
(d) Evolution temporelle des teneurs en Sc



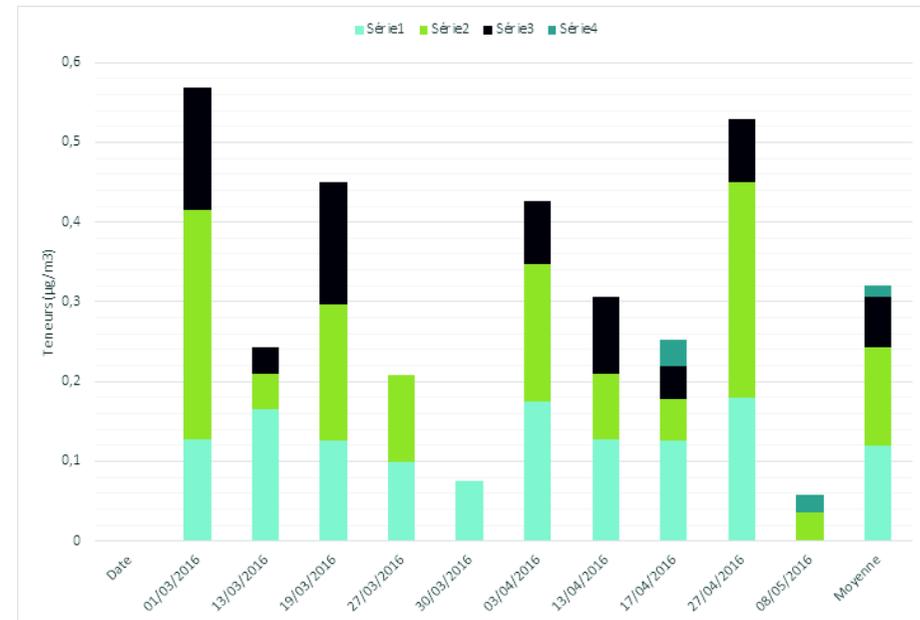
(a) Evolution temporelle des teneurs en Sr



(b) Evolution temporelle des teneurs en K



(c) Evolution temporelle des teneurs en S



(d) Evolution temporelle des teneurs en As

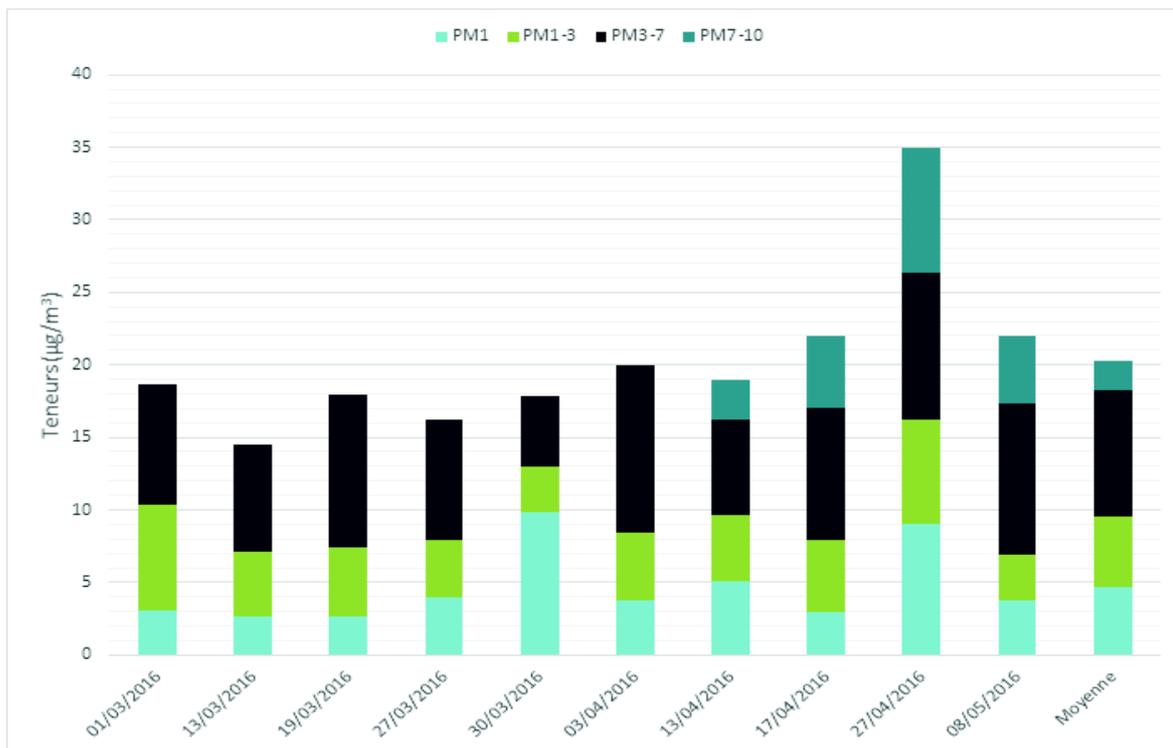


FIGURE 6.19: Evolution temporelle des teneurs en Fe

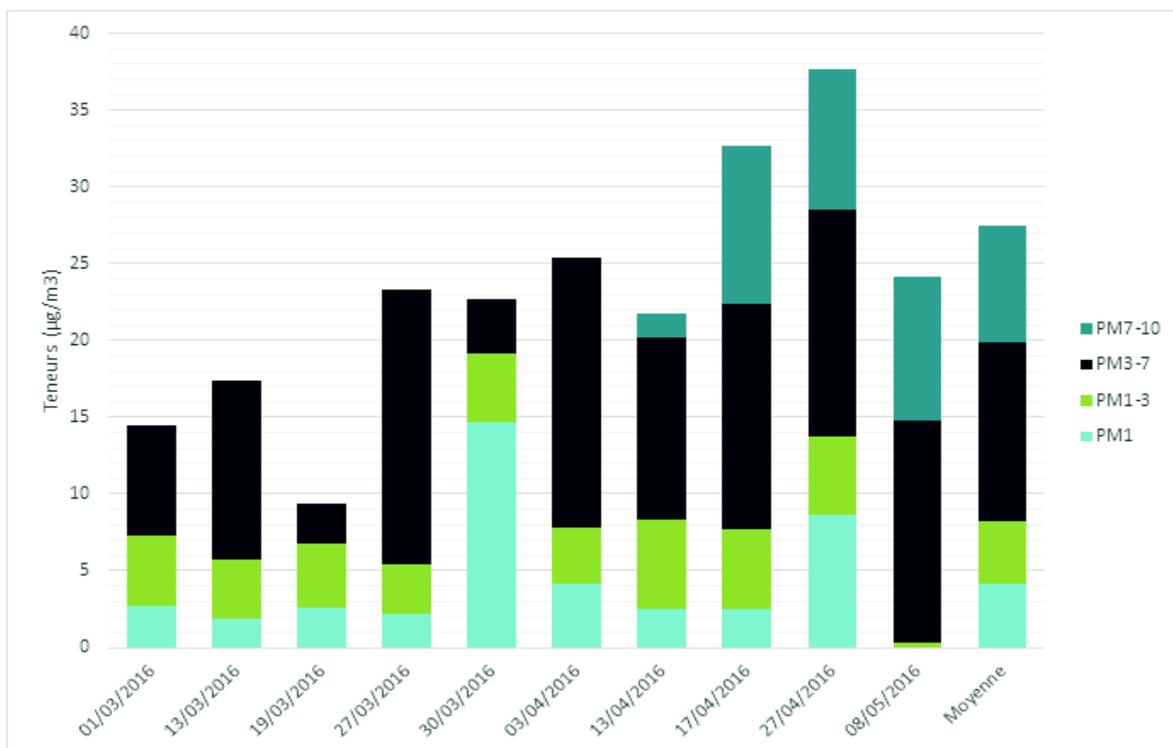


FIGURE 6.20: Evolution temporelle des teneurs en Ca

TABLE 6.9: Teneurs atmosphériques moyennes (ng/m³) des métaux lourds mesurées

	Sc		Mo		Se		Cr	
	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Max
PM ₁	8,508	26,295	32,370	52,594	34,253	83,186	37,744	77,913
PM ₃	13,095	39,681	60,379	115,593	42,225	111,787	67,536	114,647
PM ₇	14,699	39,681	77,831	162,463	53,863	111,787	92,785	139,384
PM ₁₀	14,930	39,681	80,793	177,330	56,779	111,787	101,709	158,786

	As		Ti		Pb		Sr	
	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Max
PM ₁	120,217	179,454	185,823	794,999	332,857	627,931	609,092	693,212
PM ₃	242,662	450,762	269,214	969,332	807,238	1837,470	815,337	909,274
PM ₇	306,440	568,760	318,168	1014,530	1039,384	2239,896	1031,882	1122,661
PM ₁₀	311,957	568,760	318,168	1014,530	1059,805	2239,896	1116,855	1338,309

TABLE 6.10: Teneurs atmosphériques moyennes (µg/m³) des métaux lourds mesurées

	Cu		S		Mn		K	
	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Max
PM ₁	1,452	4,025	2,419	5,009	3,662	7,995	0,849	3,316
PM ₃	3,861	10,987	4,259	8,11	5,357	10,344	1,8	5,034
PM ₇	5,329	15,278	5,474	10,897	6,836	12,171	2,5	5,034
PM ₁₀	5,585	16,429	5,771	12,126	7,529	14,953	2,629	5,034

	Ba		Fe		Ca		Zn	
	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Max	Moy	Max
PM ₁	7,127	12,669	4,667	9,886	4,187	14,678	111,949	161,196
PM ₃	8,992	16,462	9,496	16,264	8,214	19,134	160,794	222,837
PM ₇	10,69	19,51	18,202	26,379	19,837	28,536	201,746	268,783
PM ₁₀	11,328	22,853	20,287	34,929	22,898	37,726	219,768	320,22

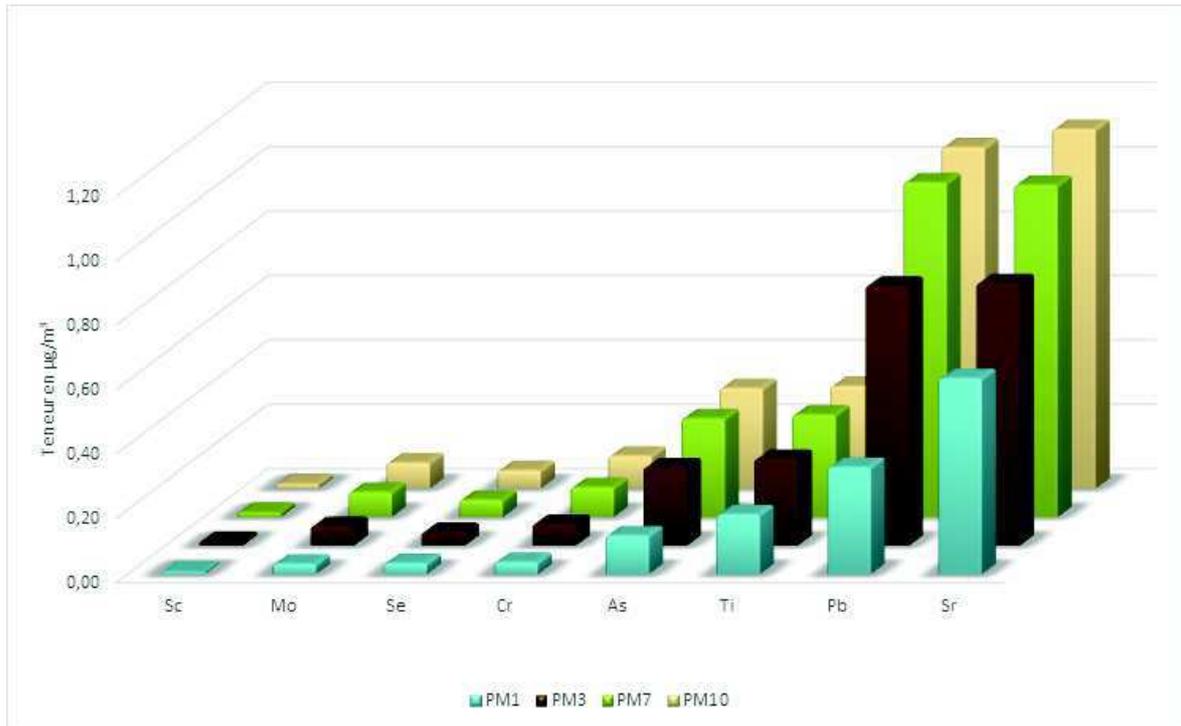


FIGURE 6.21: Teneurs atmosphériques moyennes des métaux lourds

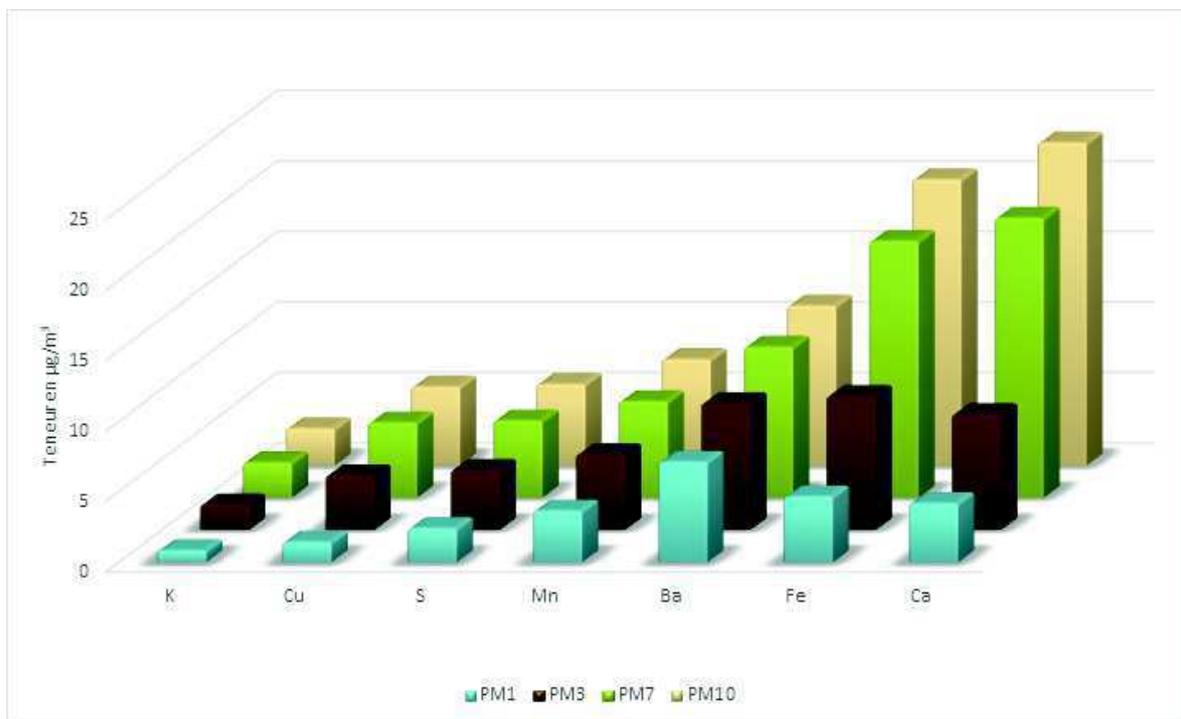


FIGURE 6.22: Teneurs atmosphériques moyennes des métaux lourds

Pour comparer la répartition des métaux lourds par fraction de PM_i , nous résumons en tableaux 6.11 et 6.12 et illustrons en figures 6.23 et 6.24 Distribution des fractions massiques moyennes des métaux lourds selon la classe granulométrique.

TABLE 6.11: Distribution des fractions massiques moyennes des métaux lourds selon la classe granulométrique

	Sc	Mo	Se	Cr
PM_1	0,04%	0,14%	0,15%	0,16%
PM_3	0,03%	0,14%	0,10%	0,16%
PM_7	0,02%	0,12%	0,08%	0,14%
PM_{10}	0,02%	0,11%	0,08%	0,14%
	As	Ti	Pb	Sr
PM_1	0,51%	0,79%	1,41%	2,57%
PM_3	0,57%	0,64%	1,90%	1,92%
PM_7	0,48%	0,50%	1,62%	1,61%
PM_{10}	0,42%	0,43%	1,44%	1,52%

TABLE 6.12: Distribution des fractions massiques moyennes des métaux lourds selon la classe granulométrique

	Cu	S	Mn	K
PM_1	6,14%	10,20%	15,50%	3,59%
PM_3	9,11%	10,00%	12,60%	4,25%
PM_7	8,30%	8,52%	10,60%	3,89%
PM_{10}	7,59%	7,84%	10,20%	3,57%
	Ba	Fe	Ca	Zn
PM_1	30,10%	19,70%	17,70%	473%
PM_3	21,20%	22,40%	19,40%	379%
PM_7	16,60%	28,30%	30,90%	314%
PM_{10}	15,40%	27,60%	31,10%	299%

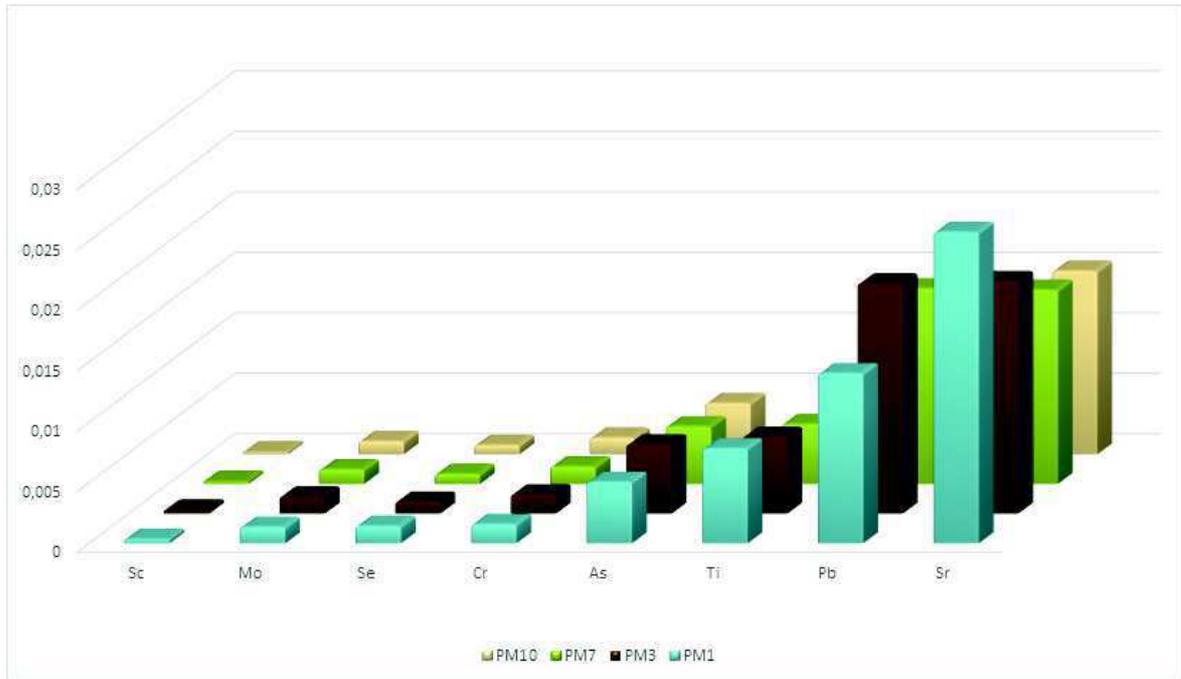


FIGURE 6.23: Pourcentage massique moyen des métaux dans chaque classe granulométrique

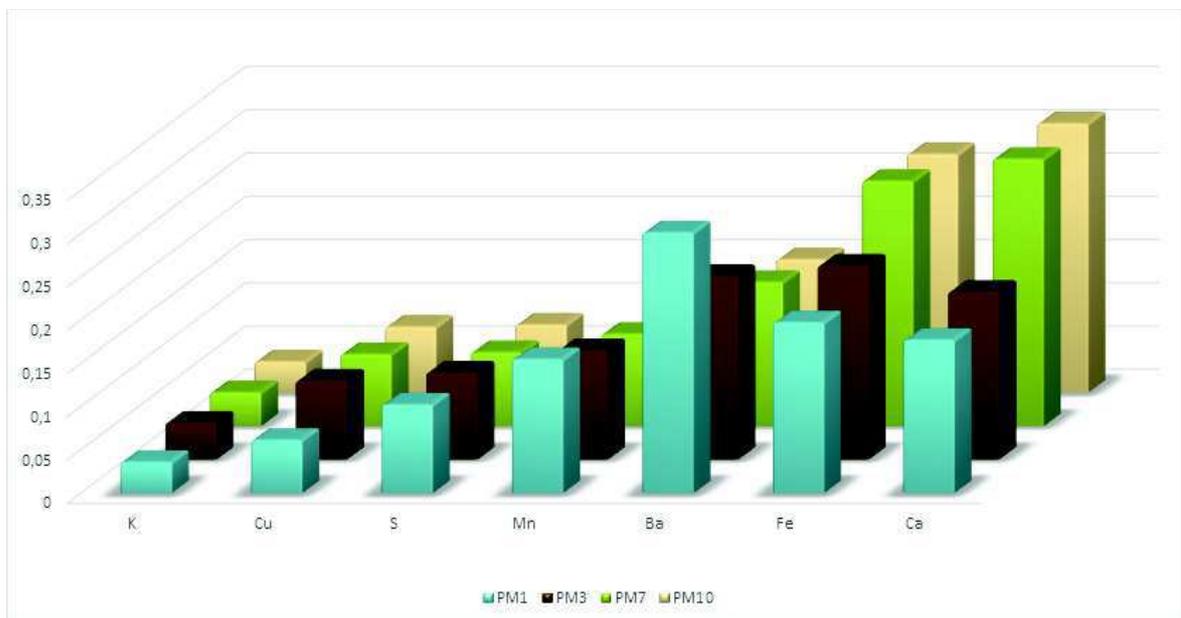


FIGURE 6.24: Pourcentage massique moyen des métaux dans chaque classe granulométrique

Les résultats obtenus montrent que – parmi les métaux étudiés, toutes fractions confondues – le calcium est le plus abondant, atteignant une teneur moyenne de $22,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ suivi du Fer, avec une teneur de $20,287 \mu\text{g}/\text{m}^3$ contenue dans les PM_{10} . Ces résultats sont prévisibles du fait de la proximité du site de la mer puisque les embruns marins, transportés par les vents, apportent dans l’atmosphère des cristaux de sels qui s’agglomèrent en noyaux de condensation composés notamment de chlorure de calcium CaCl_2 . De plus, le calcium est présent dans la croûte terrestre tout comme le fer. Viennent ensuite le baryum ($11,328 \mu\text{g}/\text{m}^3$), le manganèse ($7,529 \mu\text{g}/\text{m}^3$), le soufre ($5,771 \mu\text{g}/\text{m}^3$) puis le cuivre ($5,585 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

En ce qui concerne la fraction des particules fines PM_1 , elle est très riche en baryum. Ce dernier provient de l’érosion des roches et des minéraux, et par des rejets anthropogéniques. Les principales sources de baryum dans l’atmosphère sont les émissions industrielles [88]. Le baryum est également présent dans les carburants diesel [89].

Il faut aussi noter que cet élément est aussi très enrichi dans les filtres vierges composé de fibre de verre

Notons que le cobalt, le cadmium et le nickel sont à des teneurs inférieures à la limite de détection, il n’y a donc pas lieu de suivre leur évolution temporelle.

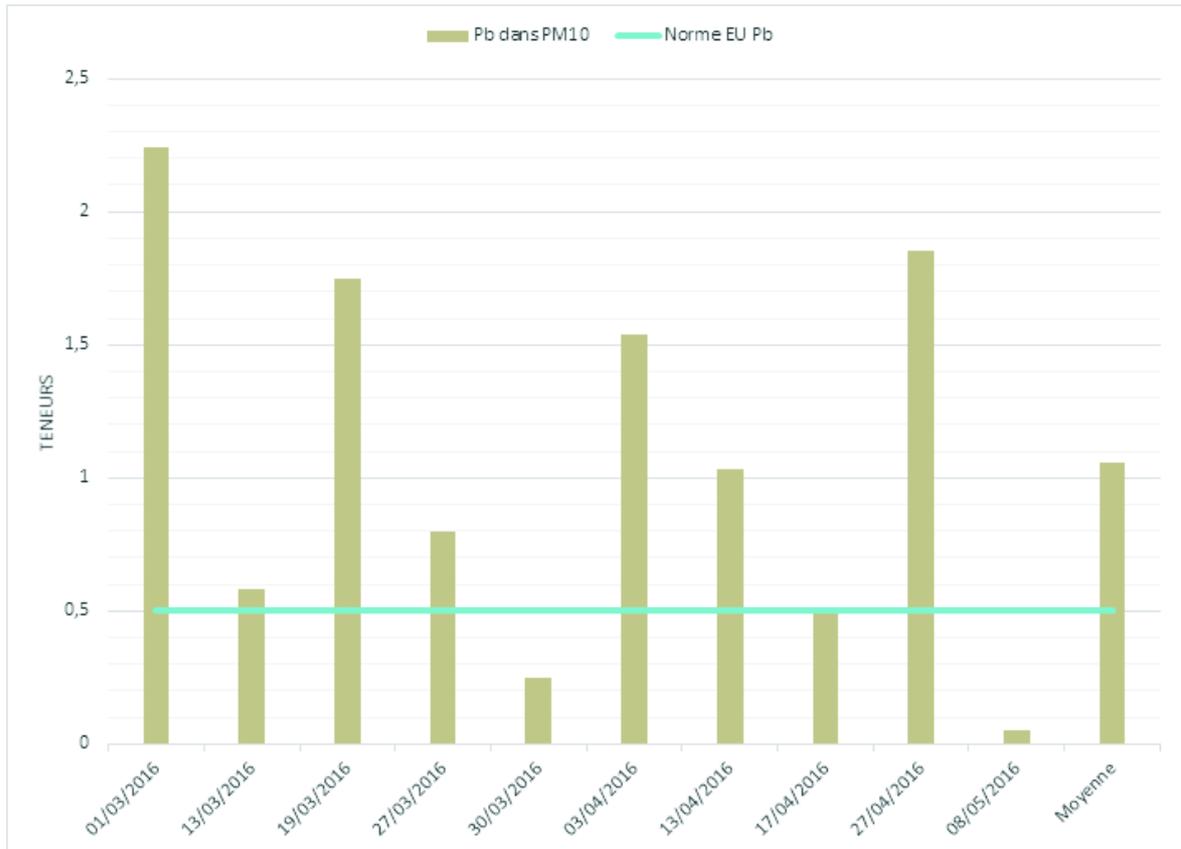
Le soufre mesuré provient des sulfates. A partir de sa teneur, on calcule pour les sulfates une teneur moyenne de $5,771 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les PM_{10} . Les sulfates sont considérés comme polluant secondaire issu de la transformation du SO_2 en SO_4^{-2} . Le SO_2 lui-même peut provenir de sources marines.

Le Plomb, estimé à en moyenne $1,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lors de notre étude, dépasserait alors la norme OMS qui est de $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [90], comme le montre la figure 6.25.

Les résultats d’analyse du Zinc sont très élevés, cet élément est abondant dans la composition des filtres en fibres de verre, comme cité précédemment, ce qui fausse toute interprétation des résultats.

L’examen des fractions massiques montre que les métaux lourds sont répartis de manières inégales dans les différentes classes granulométriques. Le calcium et le fer, par exemple, sont plus enrichis dans la fraction des particules grossières avec une fraction massique de 31,1% et 27,6% respectivement. Le cuivre, le plomb, le baryum et le manganèse sont, à l’inverse, plus abondants dans les particules fines, à diamètre inférieur à $3\mu\text{g}$, leur fraction massique diminue en passant des PM_1 aux PM_{10} .

Globalement, à part le Plomb, les autres métaux lourds n’atteignent pas des teneurs inquiétantes, ils sont caractéristiques d’un milieu urbain à fort trafic routier. L’utilisation encore majoritaire d’essence plombée est à l’origine des fortes concentrations obtenues.


 FIGURE 6.25: Comparaison : Plomb des PM₁₀ et Norme EU

Selon les figures allant de 6.18 à 6.20 et les tableaux 6.11 et 6.12, regroupant les fractions massiques moyennes de certains métaux lourds, nous constatons que le baryum et le manganèse ont plutôt tendance à se retrouver dans la fraction des particules ultrafines. Le soufre, l'arsenic, le titane et le strontium apparaissent principalement dans les fractions inférieures à $1\mu\text{m}$. Ces métaux étant généralement quasi-inexistants dans les fractions plus élevées.

Le plomb et le cuivre sont naturellement plus abondants dans les fractions fines, à diamètre inférieur à $3\mu\text{m}$, avec un taux de 76% et 69% respectivement. Le fer et le calcium quant à eux sont majoritairement contenus dans les particules grossières à moyennement grossières (diamètre compris entre 3 à 10).

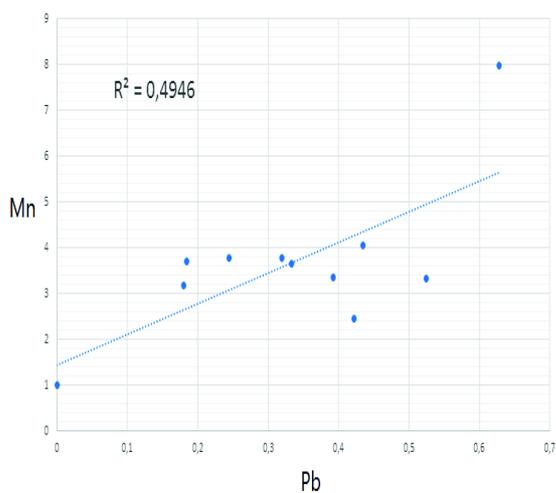
TABLE 6.13: Rapport entre certaines fractions massiques moyennes de métaux lourds (%)

Rapport	Fractions massiques moyennes de métaux lourds					
	Fe	Pb	Cu	Ca	Ba	Mn
[Métal] PM ₁ / [Métal] PM ₁₀	23%	31%	26%	18%	63%	49%
[Métal] PM ₁ / [Métal] PM ₃	49%	41%	38%	51%	79%	68%
[Métal] PM ₃ / [Métal] PM ₁₀	47%	76%	69%	36%	79%	71%

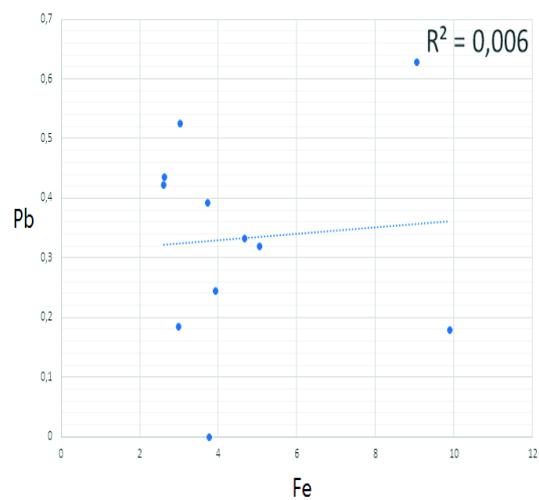
6.3.2 Corrélation entre les métaux lourds

Afin de voir dans quelle mesure certains métaux présentent des corrélations entre eux, les teneurs des métaux lourds ont été comparées deux à deux dans les fractions granulométriques PM_{10} , PM_3 et PM_1 .

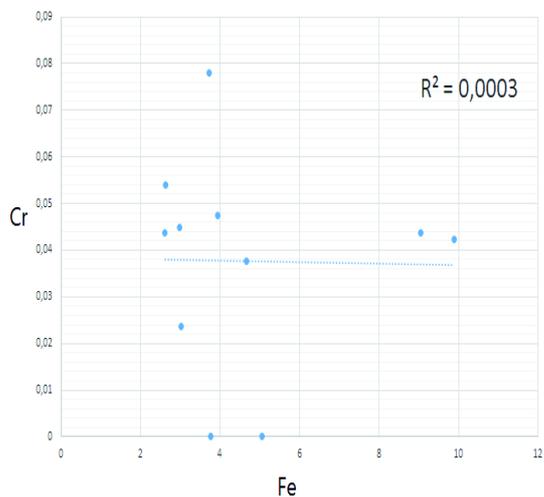
Les corrélations Pb/Mn, Fe/Mn, Fe/Pb, Fe/Cr, Cu/Fe et Cu/Mn sont présentées en figures 6.26, 6.27 et 6.28. Le reste des figures est joint en Annexe. La matrice donnant l'ensemble des facteurs de corrélations R^2 est présentée en tableaux 6.14, 6.15 et 6.16. A la lecture de ces tableaux, on relève de très faibles corrélations entre le Fer qui est essentiellement de formation mécanique (érosion du sol, particules de construction) et les autres métaux (Pb et Cr) qui sont en partie d'origine anthropologique, et ce, pour toutes les classes granulométriques étudiées (PM_1 , PM_3 et PM_{10}). Le Fe, Mn et le Cu présentent les meilleures corrélations dans toutes les fractions, ce qui suggère qu'ils ont une origine commune et englobe aussi bien la combustion que la source mécanique (érosion du sol). Le Pb quant à lui ne présente qu'une corrélation moyenne avec le Mn dans les particules très fines.



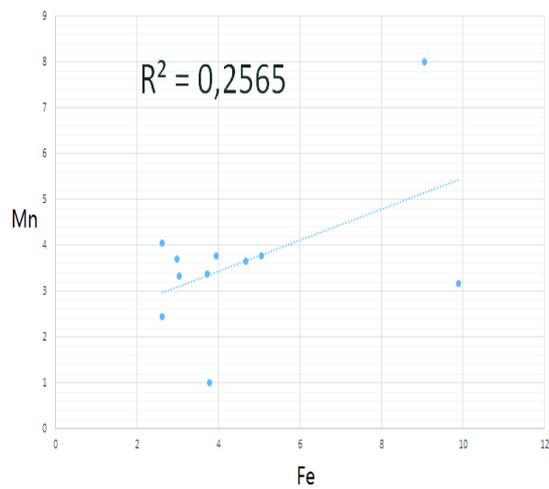
(a) Corrélation entre Mn et Pb



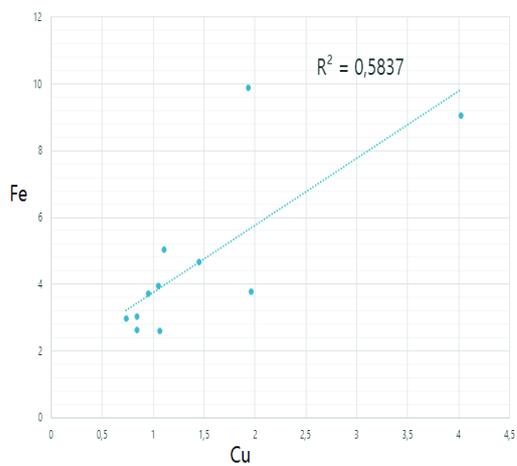
(b) Corrélation entre Fe et Pb



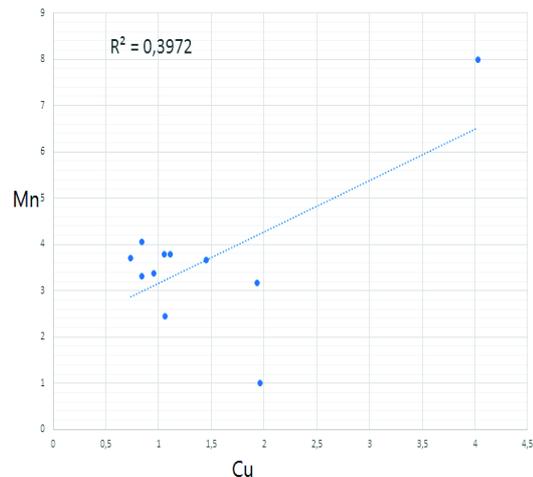
(c) Corrélation entre Cr et Fe



(d) Corrélation entre Mn et Fe

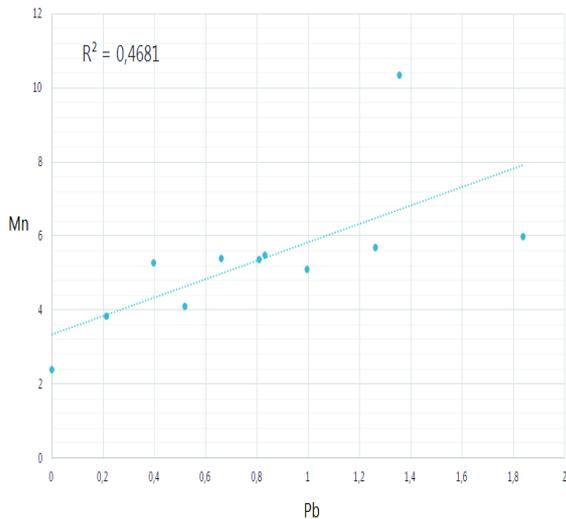


(e) Corrélation entre Cu et Fe

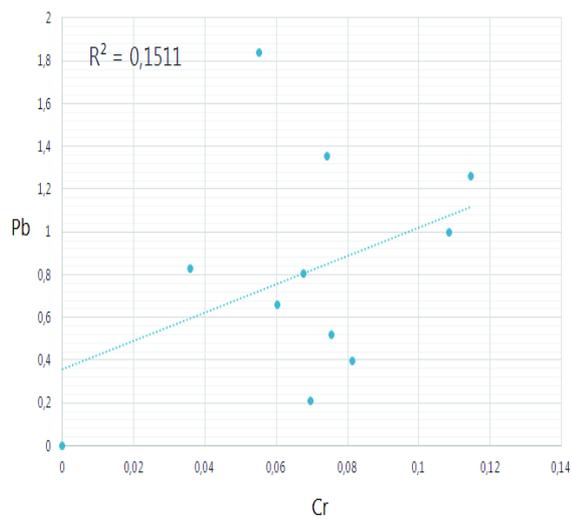


(f) Corrélation entre Cu et Mn

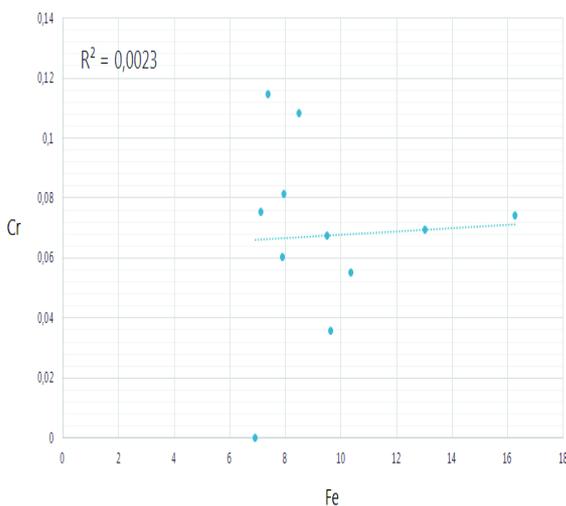
FIGURE 6.26: Corrélation entre les métaux contenus dans les PM_1



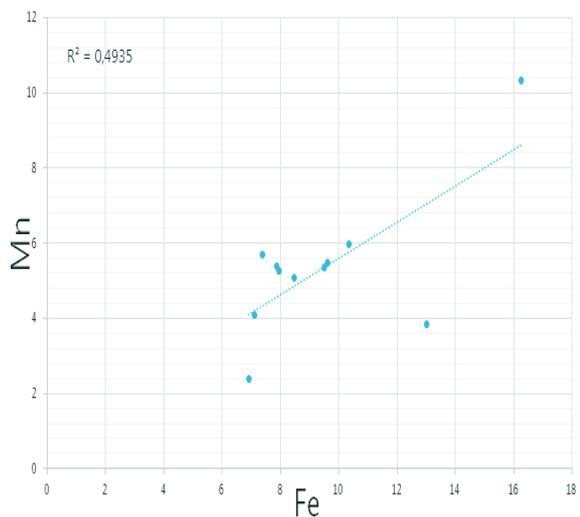
(a) Corrélation entre Mn et Pb



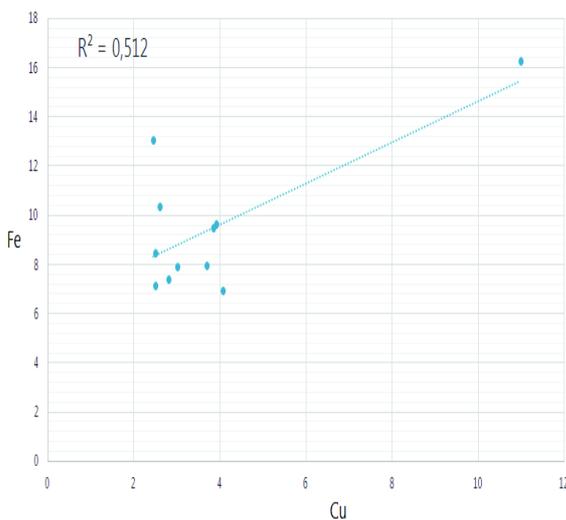
(b) Corrélation entre Cr et Pb



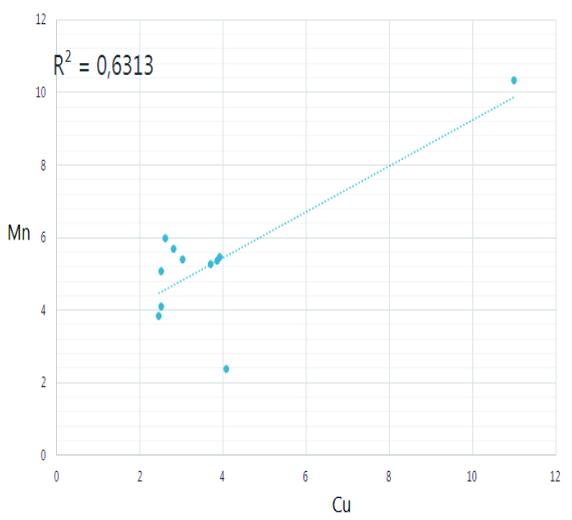
(c) Corrélation entre Cr et Fe



(d) Corrélation entre Mn et Fe

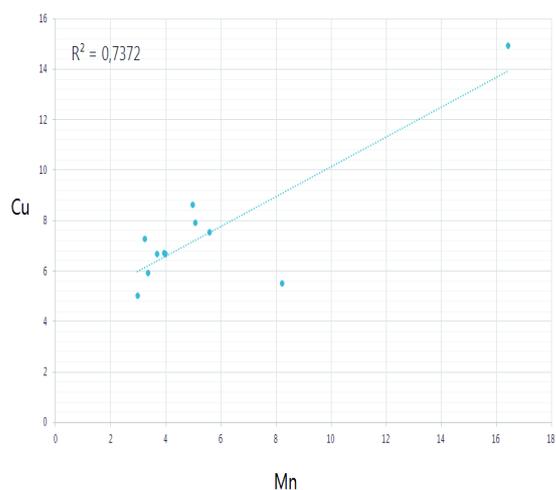


(e) Corrélation entre Cu et Fe

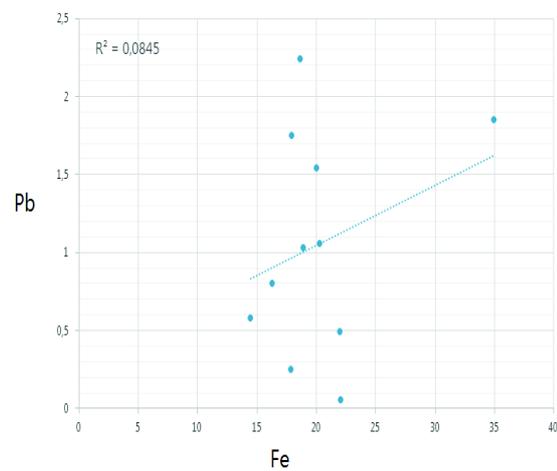


(f) Corrélation entre Cu et Mn

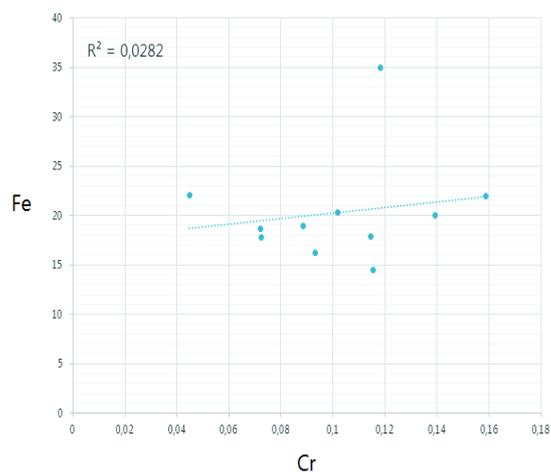
FIGURE 6.27: Corrélation entre les métaux contenus dans les PM_3



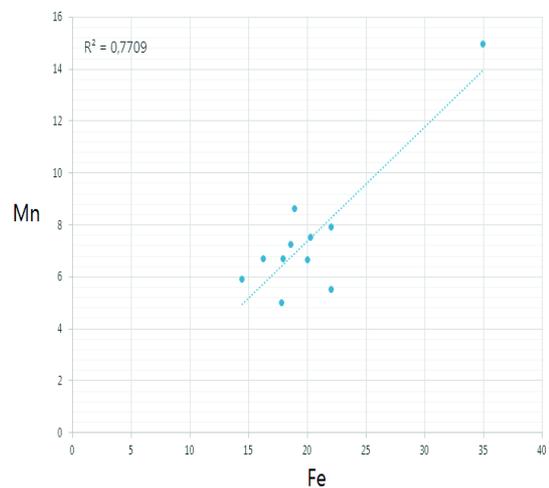
(a) Corrélation entre Mn et Cu



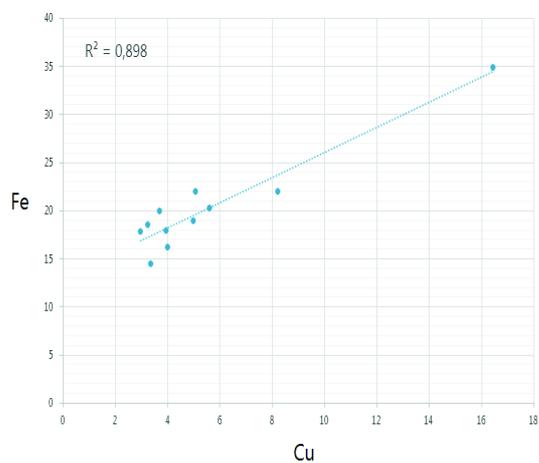
(b) Corrélation entre Fe et Pb



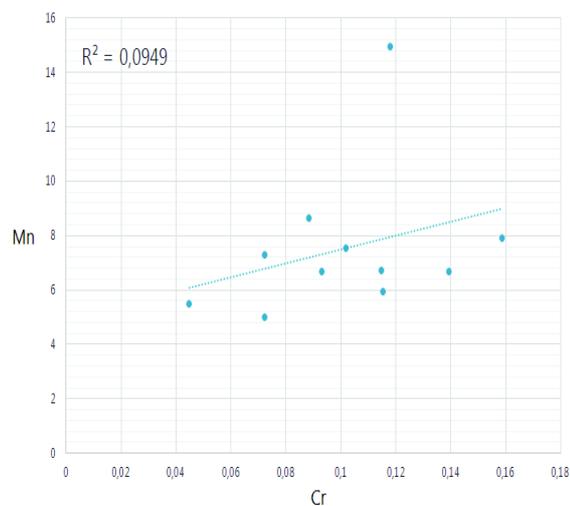
(c) Corrélation entre Cr et Fe



(d) Corrélation entre Mn et Fe



(e) Corrélation entre Cu et Fe



(f) Corrélation entre Cr et Mn

FIGURE 6.28: Corrélation entre les métaux contenus dans les PM₁₀

TABLE 6.14: Matrice des facteurs de corrélation des métaux contenus dans les PM₁₀

	Fe	Mn	Pb	Cu	Cr
Fe	1	0,771	0,085	0,898	0,028
Mn		1	0,247	0,737	0,693
Pb			1	0,034	0,047
Cu				1	0,001
Cr					1

TABLE 6.15: Matrice des facteurs de corrélation des métaux contenus dans les PM₃

	Fe	Mn	Pb	Cu	Cr
Fe	1	0,494	0,105	0,512	0,002
Mn		1	0,469	0,631	0,622
Pb			1	0,057	0,151
Cu				1	0,008
Cr					1

TABLE 6.16: Matrice des facteurs de corrélation des métaux contenus dans les PM₁

	Fe	Mn	Pb	Cu	Cr
Fe	1	0,257	0,006	0,584	0,000
Mn		1	0,495	0,397	0,089
Pb			1	0,063	0,125
Cu				1	0,010
Cr					1

6.3.3 Exploitation statistique des teneurs atmosphériques en métaux lourds

Détermination du d_{50}

Comme dans le cas des PM_{10} , nous avons déterminé le diamètre aérodynamique moyen d_{50} des deux métaux lourds Fe et Pb qui sont respectivement représentatifs des sources naturelles et des sources anthropiques (trafic routier).

TABLE 6.17: Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique pour le Pb

Moyenne	MC	MC%	1-MC	D
0,333	0,333	31,41%	68,59%	7
0,474	0,807	76,17%	23,83%	3
0,232	1,039	98,07%	1,93%	1
0,02	1,060	100,00%	0,00%	0,01

TABLE 6.18: Exploitation des données recueillies par fractionnement granulométrique pour le Fe

Moyenne	MC	MC%	1-MC	D
4,667	4,667	23,01%	76,99%	7
4,829	9,496	46,81%	53,19%	3
8,706	18,202	89,72%	10,28%	1
2,085	20,287	100%	0%	0,01

La représentation graphique log-probabilité des données issues des tableaux 6.17 et 6.18 illustrée en figure 6.29 donne pour :

$$\text{Fe} : d_{50} = 5 \mu\text{m} ; \text{Pb} : d_{50} = 3,7 \mu\text{m}.$$

Ce résultat, confirme, que le Pb est associé aux particules très fines et que le fer est prépondérant dans les particules grossières.

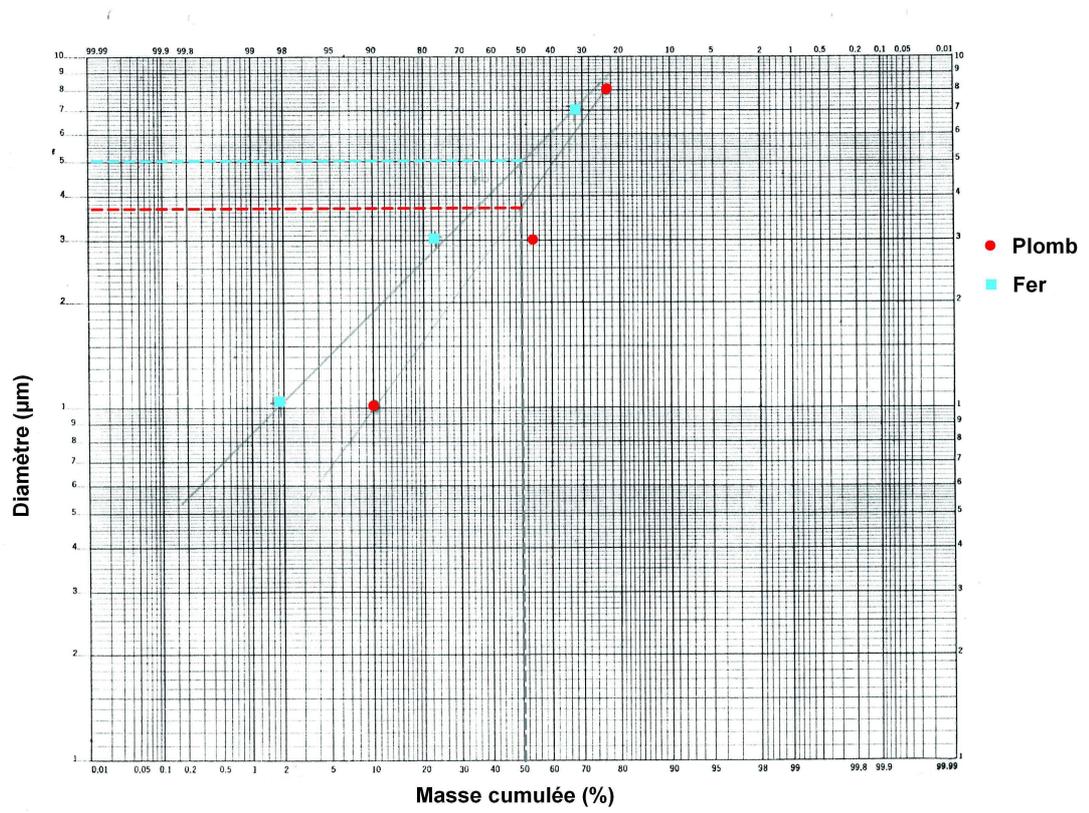


FIGURE 6.29: Diagramme log-probabilité de la masse cumulée du Fe et du Pb en fonction du diamètre des particules collectées

Conclusion

L'objectif de notre étude était d'évaluer l'ampleur de la pollution de l'air par les PM_i et d'évaluer les teneurs en métaux lourds qui leur sont associés en un site caractéristique d'un milieu urbain à forte densité de population de l'agglomération d'Alger.

A la lumière des résultats obtenus, on peut affirmer que la population résidente dans la commune d'El-Mohammadia est exposée à une forte pollution par les particules fines. En ce site les teneurs atmosphériques en PM_i s'élèvent à $73,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} ; $40,7$ et $23,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $PM_{2,5}$ et PM_1 respectivement. Ces teneurs dépassent largement les normes en vigueur dans certains pays et le nombre de jours avec dépassement des seuils est très élevé. Ce constat est d'autant plus alarmant que 55% des PM_{10} sont des particules respirables. Les teneurs tiennent compte de nombreuses variables autant liées à des sources naturelles qu'anthropiques. Les résultats de l'étude de l'influence des conditions météorologiques sur l'évolution des teneurs journalières ont montré les grandes tendances liées aux précipitations et à la force des vents. La période d'étude n'étant pas assez longue, la variation n'a pas donné de conclusions significatives en ce qui concerne l'influence des températures.

L'étude de la pollution par classe granulométrique et l'exploitation statistique des données mesurées a permis de déterminer certains paramètres important non accessibles directement par l'expérience.

L'étude des métaux lourds et de leurs variations de concentration, dans les différentes fractions granulométriques, soulignent une implication complexe du trafic routier, de la météorologie et des activités humaines. Comparé à d'autres pays, le plomb présente des teneurs élevées en milieu urbain, due à l'absence de réglementation concernant ses émissions; il serait abondant dans les fractions fines ($d < 3 \mu\text{m}$), de même que le cuivre. Mis à part le plomb, les métaux spécifiques à la pollution diesel (Ni, Co, Cd), sont à des teneurs en deçà de la limite de détection. Par ailleurs, les métaux issus de la croûte terrestre (Fe et Ca) s'avèrent être les plus abondants, ils se répartissent majoritairement dans les fractions grossières ($d > 3 \mu\text{m}$). L'abondance de plusieurs métaux, notamment le Baryum et du Manganèse, précisément dans les classes ultrafines, reste difficile à expliquer. Ces métaux possèdent une origine qui nous est inconnue et il ne nous a été difficile de caractériser les sources émettrices. L'étude de leur origine ouvre donc les perspectives d'une étude de la pollution de proximité. A partir des résultats obtenus, on peut conclure que l'Algérie présente la particularité d'être un pays qui

n'est pas ni fortement motorisé, ni fortement industrialisé, mais présenterait une forte pollution particulaire, par rapport à d'autres pays où le trafic routier et l'industrialisation sont plus intenses. Partant de ce fait, il est possible de prétendre que ces taux de pollution, surtout la fraction fine, résulteraient de la mauvaise combustion du parc automobile, qui serait âgé et peu réglementé. En d'autres termes, l'absence d'obligation de pots catalytiques ainsi que la non généralisation de l'essence sans plomb seraient, à priori, le frein à l'amélioration de la qualité de l'air. Cette dernière serait possible, en premier lieu, grâce à l'application d'une législation plus rigoureuse, permettant le rajeunissement du parc automobile, l'utilisation de bicarburation GPL/essence, l'équipement des bus et des taxis par des moteurs à gaz naturel, en somme. De surcroît, il serait nécessaire d'établir des plans de gestion du système de transport de la ville, permettant ainsi une fluidisation de la circulation, ainsi que d'instaurer des moyens de mobilité durables, réduisant ainsi notre empreinte carbone. Par ailleurs, une complémentarité entre les différents modes de transport, alliée à l'utilisation d'infrastructures permettraient de réduire l'exposition des populations à la pollution à proximité des axes et des agglomérations à fort trafic routier. L'amélioration du cadre urbain (zones vertes, couvert végétal, balayage et lavage régulier des rues, protection des travaux de construction, etc.) permettrait certainement de réduire la pollution par les PM_{10}

Bibliographie

- [1] M. Barnea and P. Ursu, *Pollution et protection de l'atmosphère*. Ed.Eyrolles, 1974.
- [2] L. Herrebaut and J. Beguin, *Mesure des pollutions particulaire et gazeuse, Mesure-Analyse-Contrôle, Nuisance et Environnement*. France, 1976.
- [3] H. conseil de la santé publique *et al.*, “Pollution par les particules dans l’air ambiant : recommandations pour protéger la santé,” 2012.
- [4] A. Renoux, “Ce qu’il faut savoir sur l’aérosol atmosphérique,” *Pollution atmosphérique*, vol. 32, no. 125, pp. 10–13, 1990.
- [5] A. C. Stern, *Fundamentals of air pollution*. Elsevier, 2014.
- [6] F. P. de recherche et de développement pour l’innovation et la technologie dans les transports terrestres (1996-2000), P. Ebner, Y. Le Moullec, and A. Weill, *Pollution par les particules atmosphériques : état des connaissances et perspectives de recherche*. La Documentation française, 2005.
- [7] P. Laj and K. Sellegri, “Les aérosols atmosphériques : Impacts locaux, effets globaux,” *Revue française des Laboratoires*, vol. 2003, no. 349, pp. 23–34, 2003.
- [8] J.-P. Putaud, F. Raes, R. Van Dingenen, E. Brüggemann, M.-C. Facchini, S. Decesari, S. Fuzzi, R. Gehrig, C. Hüglin, P. Laj, *et al.*, “A european aerosol phenomenology—2 : chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in europe,” *Atmospheric Environment*, vol. 38, no. 16, pp. 2579–2595, 2004.
- [9] P. Masplet and H. Cachier, “L’aérosol atmosphérique. caractéristiques physico-chimiques : air quality,” *Analisis*, vol. 26, no. 9, pp. M11–M17, 1998.
- [10] W. Winiwarter, H. Bauer, A. Caseiro, and H. Puxbaum, “Quantifying emissions of primary biological aerosol particle mass in europe,” *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 7, pp. 1403–1409, 2009.
- [11] R. Delmas, M. Paulin, P. Puppò, and D. Serca, “Chimie des aerosols,” 2010. www.omer7.sedoo.fr.

- [12] A. B. Robinson, S. L. Baliunas, W. Soon, and Z. W. Robinson, "Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide," *Medical Sentinel*, vol. 3, no. 5, pp. 171–178, 1998.
- [13] S. Richardson, *EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook*. European Environment Agency, 2006.
- [14] R. M. Harrison and J. Yin, "Sources and processes affecting carbonaceous aerosol in central england," *Atmospheric Environment*, vol. 42, no. 7, pp. 1413–1423, 2008.
- [15] X. Querol, A. Alastuey, C. R. Ruiz, B. Artiñano, H. Hansson, R. M. Harrison, E. t. Buringh, H. M. Ten Brink, M. Lutz, P. Bruckmann, *et al.*, "Speciation and origin of pm10 and pm2. 5 in selected european cities," *Atmospheric Environment*, vol. 38, no. 38, pp. 6547–6555, 2004.
- [16] J. J. Corbett, J. J. Winebrake, E. H. Green, P. Kasibhatla, V. Eyring, and A. Lauer, "Mortality from ship emissions : a global assessment," *Environmental science & technology*, vol. 41, no. 24, pp. 8512–8518, 2007.
- [17] H. Helms and U. Lambrecht, "The relevance of emissions from non-road mobile machinery in comparison with road transport emissions," *Proceedings of Transport and Air Pollution*, 2009.
- [18] O. Favez, I. E. Haddad, C. Piot, A. Boréave, E. Abidi, N. Marchand, J.-L. Jaffrezo, J.-L. Besombes, M.-B. Personnaz, J. Sciare, *et al.*, "Inter-comparison of source apportionment models for the estimation of wood burning aerosols during wintertime in an alpine city (grenoble, france)," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 10, no. 12, pp. 5295–5314, 2010.
- [19] R. Kerbachi, "Cours de pollution atmosphérique 5ème année," 2015. Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- [20] A. Van Donkelaar, R. V. Martin, M. Brauer, R. Kahn, R. Levy, C. Verduzco, and P. J. Villeneuve, "Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth : development and application," *Environmental health perspectives*, vol. 118, no. 6, p. 847, 2010.
- [21] P. Zannetti, *Air pollution modeling : theories, computational methods and available software*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [22] M. Hallquist, J. Wenger, U. Baltensperger, Y. Rudich, D. Simpson, M. Claeys, J. Dommen, N. M. Donahue, C. George, A. H. Goldstein, *et al.*, "The formation, properties and impact of secondary organic aerosol : current and emerging issues," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, no. 14, pp. 5155–5236, 2009.
- [23] B. Sportisse, *Pollution atmosphérique : des processus à la modélisation*. Springer Science & Business Media, 2008.

- [24] K. K. Siggini, "Sur la compacité des multimesures (i)," *Comptes Rendus Mathématique*, vol. 334, no. 11, pp. 949–952, 2002.
- [25] C. Elichegaray, S. Bouallala, A. Maitre, and M. Ba, "État et évolution de la pollution atmosphérique," *Revue Francaise d'Allergologie*, vol. 50, no. 4, pp. 381–393, 2010.
- [26] G. Deletraz, *Géographie des risques environnementaux liés aux transports routiers en montagne. Incidences des émissions d'oxydes d'azote en vallées d'Aspe et de Bariatou (Pyrénées)*. PhD thesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2002.
- [27] H. Declercq and C. Prouvost, "Effets des particules en suspension sur la santé respiratoire des enfants," *Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais*, 2007.
- [28] B. Brunekreef and S. Holgate, "Air pollution and health," *The lancet*, vol. 360, no. 9341, pp. 1233–1242, 2002.
- [29] D. Doumont and F. Libion, "Impact sur la santé des différents polluants : quels effets à court, moyen et long terme?," *UCL-RESO Unité d'Education pour la Santé*, 2006.
- [30] D. Zmirou, W. Dab, F. Potelon, P. Quenel, D. Bard, and P. Hubert, "Pollution, air, eau, aliments, bruit, nucléaire... quels risques pour notre santé," 2000.
- [31] P. E. R. Project, *Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of particulate air pollution and mortality*. Health Effects Institute, 2000.
- [32] H. conseil de la santé publique *et al.*, "pollution par les particules dans l'air ambiant : recommandations pour protéger la santé," 2012.
- [33] J. Araujo and A. Nel, "Particulate matter and atherosclerosis : role of particle size, composition and oxidative stress," *Particle and fibre toxicology*, vol. 6, no. 1, p. 1, 2009.
- [34] S. Mazoue and J. Gaber, "Impact du trafic routier sur l'environnement-la contamination du sol par voie aérienne," 1994.
- [35] S. Lacour and R. Joumard, "Parc, usage et émissions des véhicules routiers en France de 1970 à 2020," 2002.
- [36] M. J.-F. Husson, L. Aichi, and al, "enquête sur le coût économique et financier de la pollution de l'air," tech. rep., Journal officiel, 2015.
- [37] O. M. de la Santé, "Directives de qualité pour l'eau de boisson. volume 2 : critères d'hygiène et documentation à l'appui," 1986.

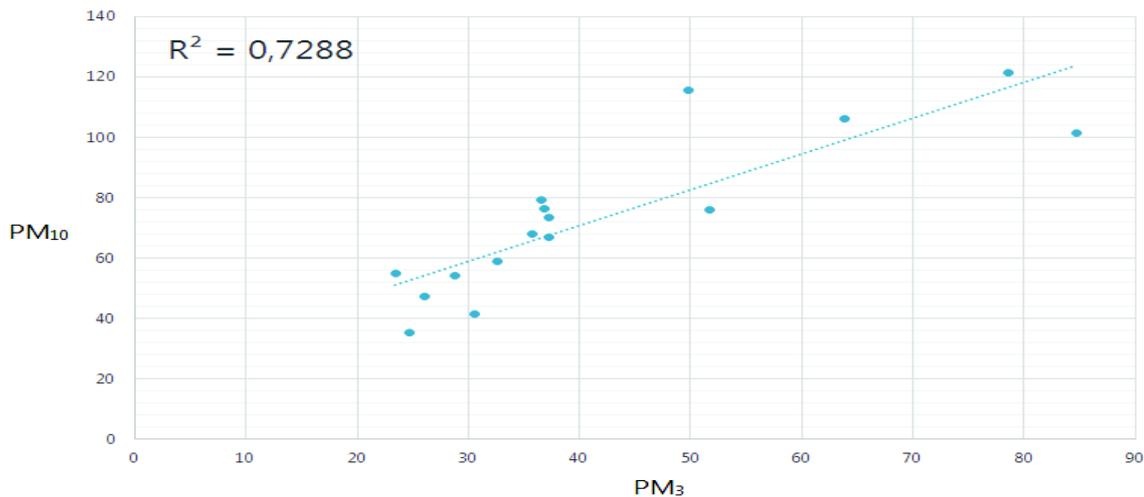
- [38] P. M. SPM, "Sampling of ambient air for total suspended particulate matter (spm) and pm10 using high volume sampler (hvs)," 1999.
- [39] R. R. Lauwerys and F. Lavenne, "Précis de toxicologie industrielle et des intoxications professionnelles," 1972.
- [40] C. C. des Ministres, "Environnement," *Recommandations canadiennes pour la qualité des sols : Environnement et santé humains—Cuivre dans l'environnement*, 2001.
- [41] A. Viala, *Éléments de toxicologie*. Tec & Doc Lavoisier, 1998.
- [42] P. Degobert, *Automobile et pollution*. Editions OPHRYS, 1992.
- [43] W. Moore, J. Stara, D. Hysell, M. Malanchuk, J. Burkart, and R. Hinnners, "Toxicologic evaluations of fuel additive-methylcyclopentadienyl manganese tricarbonyl (mmt)," tech. rep., SAE Technical Paper, 1975.
- [44] E. Di Ferrante *et al.*, *Trace metals. Exposure and health effects*. Pergamon Press, Headington Hill Hall, Oxford OX3 0BW, 1979.
- [45] P. M. Carey and J. H. Somers, "Air toxics emissions from motor vehicles," tech. rep., Pittsburgh, PA (USA); Air Pollution Control Assoc., 1988.
- [46] M. J. Cleare, "Immunological studies on platinum complexes and their possible relevance to autocatalysts," tech. rep., Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1977.
- [47] E. R. Plunkett, "Handbook of industrial toxicology," 1976.
- [48] O. mondiale de la Santé, "Lignes directrices oms relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre(mise à jour mondiale 2005)," 2006.
- [49] M. Ba and J. Colosio, "Qualité de l'air : une surveillance accrue des particules, mais des concentrations à réduire d'ici l'an 2005," *IFEN, les données de l'environnement*, vol. 58, pp. 1–5, 2000.
- [50] J. Andersson, B. Giechaskiel, R. Munoz-Bueno, E. Sandbach, and P. Dilara, "Particle measurement programme (pmp) light-duty inter-laboratory correlation exercise (ilce-ld) final report," *Institute for Environment and Sustainability. EUR*, vol. 22775, 2007.
- [51] Le parlement européen et le conseil de l'union européenne, "directive 2008/50/CE," 2008.
- [52] C. A. Pope III, R. T. Burnett, M. J. Thun, E. E. Calle, D. Krewski, K. Ito, and G. D. Thurston, "Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution," *Jama*, vol. 287, no. 9, pp. 1132–1141, 2002.

- [53] M. Berrah, “Les immatriculations des véhicules automobiles,” 2015. Office National des Statistiques.
- [54] K. Fawzi, “Principale source de la pollution de l’air : Trafic routier en milieu urbain,” *Le Maghreb*, 2010.
- [55] e. Public health and social determinants of health, “Who’s urban ambient air pollution database,” 2016.
- [56] F. Mathé, J. Houdret, J. Galloo, and R. Guillermo, “La mesure des particules en suspension dans l’air ambiant : Applications dans les réseaux français de surveillance de la qualité de l’air : air quality,” *Analusis*, vol. 26, no. 9, pp. M27–M33, 1998.
- [57] M. B. Attoui, A. Renoux, and D. Boulaud, “Generation, detection and granulometry of nanoparticles in the air,” *Idojárás*, vol. 102, no. 1, pp. 1–18, 1998.
- [58] “Prélèvement sur filtre des matières particulaires en suspension dans l’air ambiant – appareillage automatique séquentiel,” 1984.
- [59] M. O. Ralph, C. F. Barrett, and S. L. Upton, “Further wind tunnel measurements of the inlet efficiency of the environnement sa type ppa 60 suspended particle sampler,” *Stevenage : Warren Spring Laboratory*, 1982.
- [60] A. R. McFarland, C. A. Ortiz, and R. W. Bertch Jr., “A 10 μm outpost size selective inlet for hi-vol samplers,” *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 34, no. 5, pp. 544–547, 1984.
- [61] N. Hatem, “Contribution à l’étude par classe granulométrique des aérosols particulaires et des métaux lourds qui leurs sont associés à alger,” 2003.
- [62] J. Quisefit and A. Gaudichet, “Prélèvement des aérosols atmosphériques et analyses inorganiques : air quality,” *Analusis*, vol. 26, no. 9, pp. M21–M27, 1998.
- [63] A. Person and G. Tymen, “Mesurage des particules en suspension dans l’air en relation avec la santé,” *Pollution atmosphérique*, vol. 47, no. 187, pp. 271–284, 2005.
- [64] F. Ramade, *Éléments d’écologie.[2]. Écologie appliquée : action de l’homme sur la biosphère*. McGraw-Hill, 1982.
- [65] E. Calabrese and L. Baldwin, “Hormesis and high-risk groups,” *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, vol. 35, no. 3, pp. 414–428, 2002.
- [66] R. Vautard, B. Bessagnet, M. Chin, and L. Menut, “On the contribution of natural aeolian sources to particulate matter concentrations in europe : testing hypotheses with a modelling approach,” *Atmospheric Environment*, vol. 39, no. 18, pp. 3291–3303, 2005.

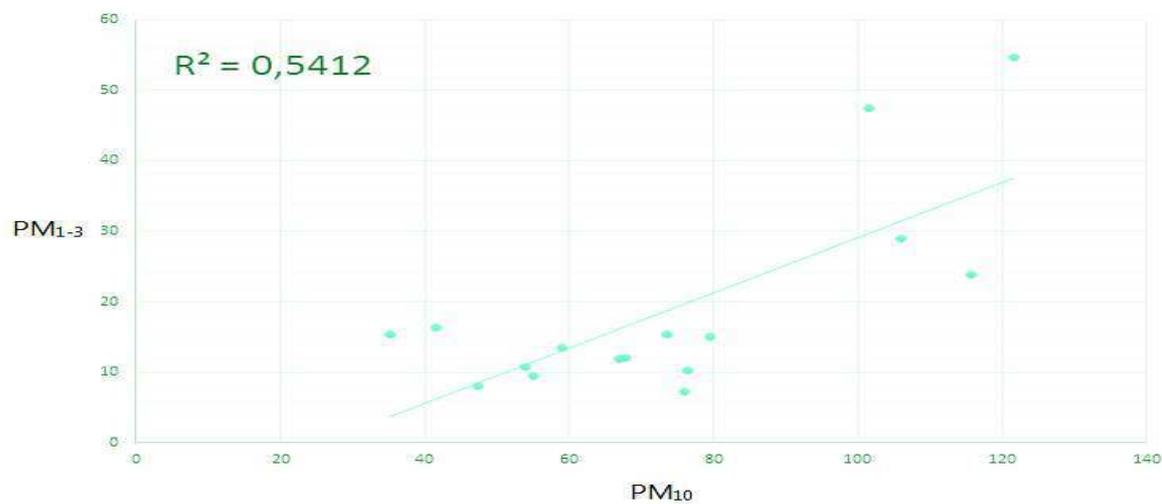
- [67] B. Beckhoff, B. Kanngießer, N. Langhoff, R. Wedell, and H. Wolff, *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [68] J. P. Quisefit and A. Gaudichet, “Prélèvement des aérosols atmosphériques et analyses inorganiques : air quality,” *Analusis*, vol. 26, no. 9, pp. M21–M27, 1998.
- [69] E. United, “Air quality criteria for particulate matter,” 2004.
- [70] J. Despujols, *Spectrometrie D’émission des Rayons X. Fluorescence X*. Ed. Techniques Ingénieur, 2000.
- [71] Z. Xu, M. Gautam, and S. Mehta, “Cumulative frequency fit for particle size distribution,” *Applied occupational and environmental hygiene*, vol. 17, no. 8, pp. 538–542, 2002.
- [72] J. D. Butler, *Air pollution chemistry*. Academic Press, 1979.
- [73] T. A. Pakkanen, R. E. H. P. Keronen, W. Maenhaut, G. Ducastel, and J. M. Pacyna, “Sources and physico-chemical characteristics of the atmospheric aerosol in southern norway,” *Atmospheric Environment*, vol. 30, no. 9, pp. 1391–1405, 1996.
- [74] W. H. Organization *et al.*, “Who air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide : global update 2005 : summary of risk assessment,” 2006.
- [75] J. officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire, “Décret exécutif N 06-02,” 2006.
- [76] P. Prevention and A. Handbook, “World bank group,” *Airborne Particulate Matter*, 1998.
- [77] R. Kerbachi, N. Oucher, A. Bitouche, N. Berkouki, B. Demri, M. Boughédaoui, and R. Joumard, “Pollution par les particules fines dans l’agglomération d’alger,” in *Environment and Transport in different contexts/Environnement et Transports dans des contextes différents*, pp. 31–40, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.
- [78] P. Brochard, J.-C. Pairon, and J. Bignon, “Aérosol et santé : déposition et épuration des particules inhalées,” *Pollution atmosphérique*, vol. 32, no. 126, pp. 178–184, 1990.
- [79] E. Yamada, S. Funoki, Y. Abe, S. Umemura, D. Yamagushi, and Y. Fuse, “Size distribution and characteristics of chemical components in ambient particulate matter,” *Analytical sciences*, vol. 21, no. 2, pp. 89–94, 2005.

- [80] L. Y. Zou and M. A. Hooper, “Size-resolved airborne particles and their morphology in central jakarta,” *Atmospheric Environment*, vol. 31, no. 8, pp. 1167–1172, 1997.
- [81] R. Shaw, “La pollution par les particules atmospheriques.,” *Pour la Science*, 1987.
- [82] M. du Développement durable de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, *Normes et critères québécois de qualité de l’atmosphère, version 4*. Direction du suivi de l’état de l’environnement, 2015.
- [83] F. X. R. Van Leeuwen, “Update and revision of who air quality guidelines for europe,” in *Retrospective Collection*, vol. 22, pp. 22–25, Trans. Tech. Publ., 1997.
- [84] J. des Communautés Européennes, “Directive 1999/30/ce du conseil du 22 avril 1999 relative à la fixation de valeurs limites pour l’anhydride sulfureux, le dioxyde d’azote et les oxydes d’azote, les particules et le plomb dans l’air ambiant,” *Journal officiel des Communautés européennes*, vol. 163, pp. 41–60, 1999.
- [85] e. Public health and social determinants of health, “Who global urban ambient air pollution database,” 2016.
- [86] N. Berkouki, *Caractérisation de la pollution de l’air par les particules fines et des métaux lourds associés, en milieu urbain à Alger centre*. PhD thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.
- [87] D. Belhout, *Évaluation de la pollution atmosphérique : Etude des particules fines en site urbain à Alger*. PhD thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2011.
- [88] U. D. of Health, H. Services, *et al.*, “Agency for toxic substances and disease registry,” *Toxicological Profile for Asbestos. Update. Agency for Toxic Substances and Disease Registry*, 1999.
- [89] J. Sternbeck, Å. Sjödin, and K. Andréasson, “Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension—results from two tunnel studies,” *Atmospheric Environment*, vol. 36, no. 30, pp. 4735–4744, 2002.
- [90] X. Querol, A. Alastuey, T. Moreno, M. M. Viana, S. Castillo, J. Pey, S. Rodríguez, B. Artiñano, P. Salvador, M. Sánchez, *et al.*, “Spatial and temporal variations in airborne particulate matter (pm 10 and pm 2.5) across spain 1999–2005,” *Atmospheric Environment*, vol. 42, no. 17, pp. 3964–3979, 2008.

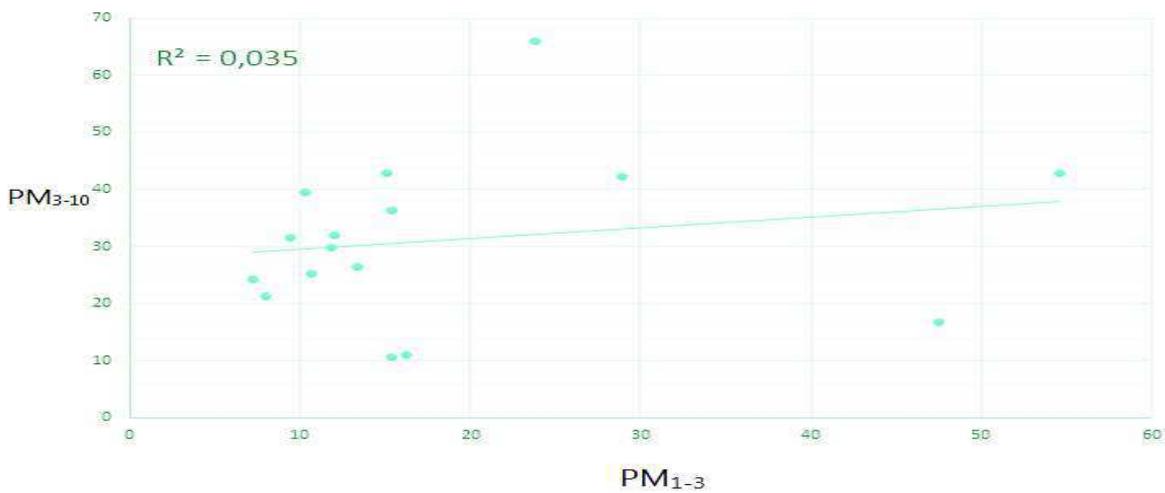
Annex et tables



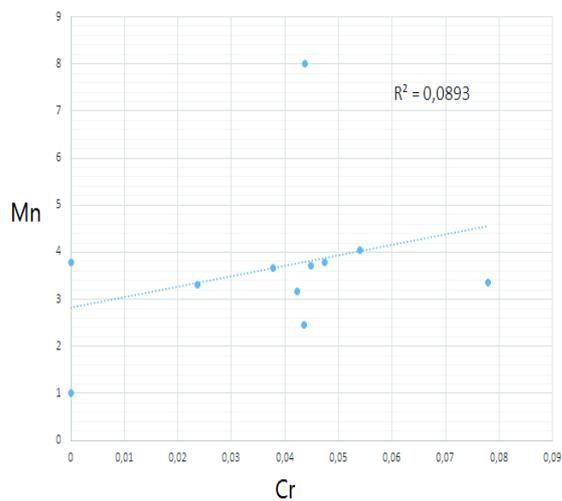
(a) Corrélation entre les teneurs en PM₃ et celles en PM₁₀



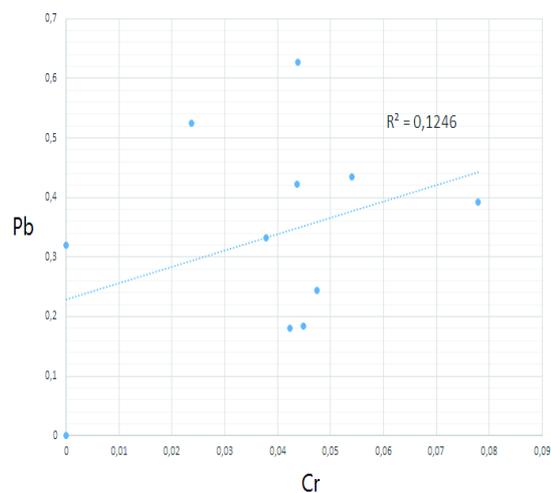
(b) Corrélation entre les teneurs en PM₁₋₃ et celles en PM₁₀



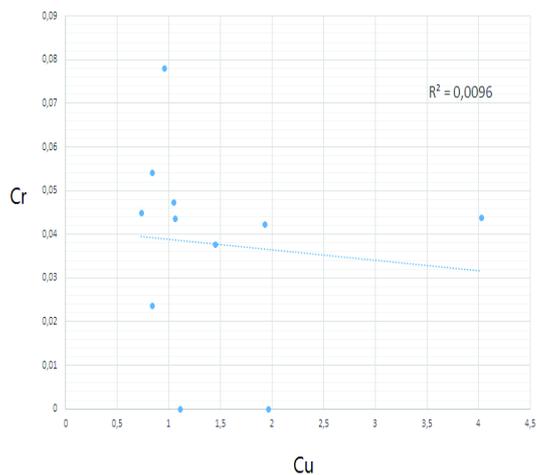
(c) Corrélation entre les teneurs en PM₁₋₃ et celles en PM₃₋₁₀



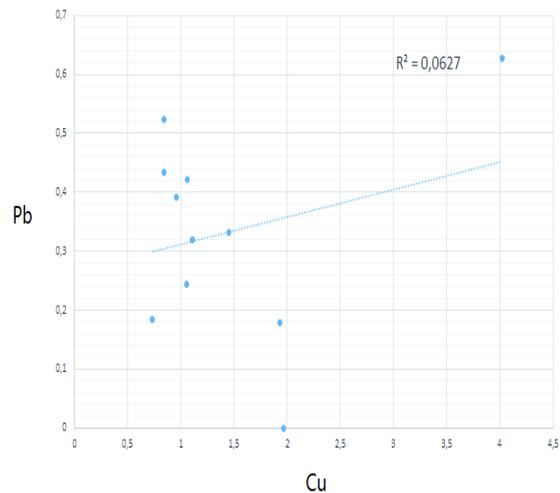
(d) Corrélation entre Mn et Cr



(e) Corrélation entre Cr et Pb

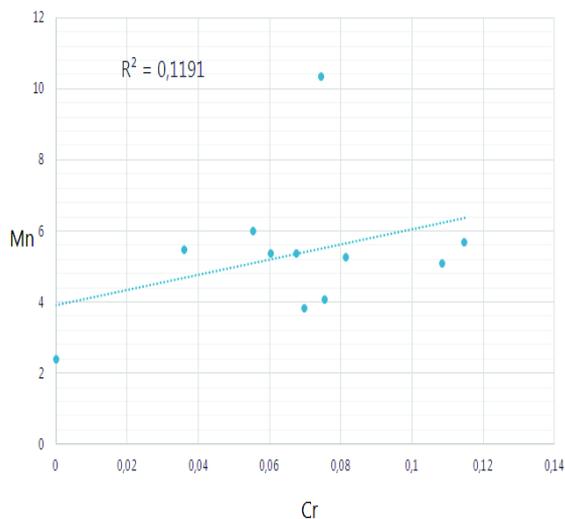


(f) Corrélation entre Cr et Cu

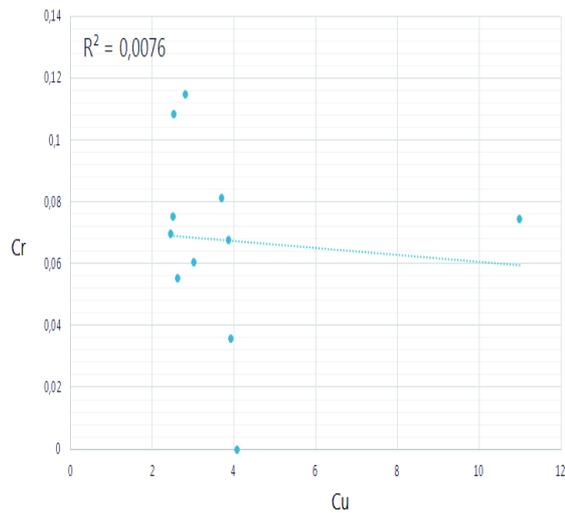


(g) Corrélation entre Pb et Cu

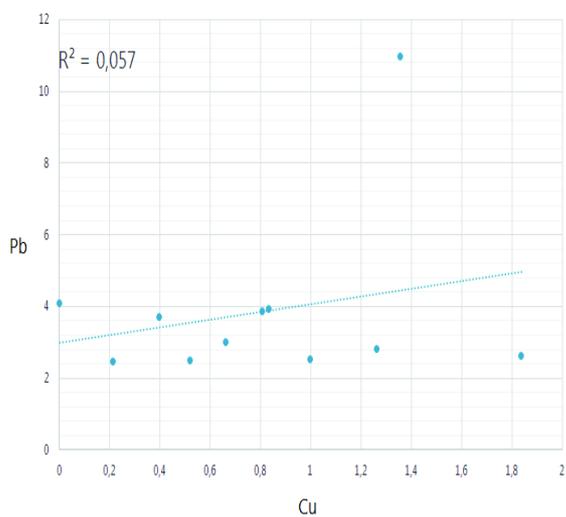
FIGURE 0.30: Corrélation entre les métaux compris dans les PM₁



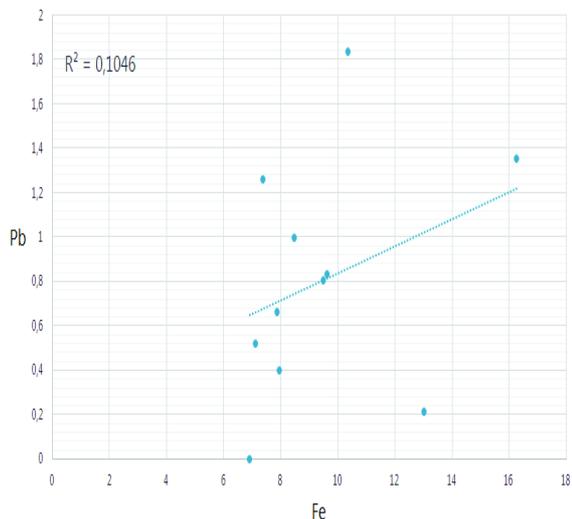
(a) Corrélation entre Mn et Cr



(b) Corrélation entre Cr et Cu

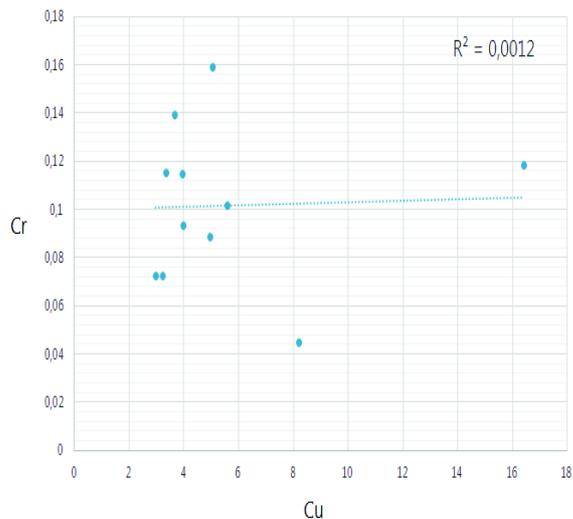


(c) Corrélation entre Pb et Cu

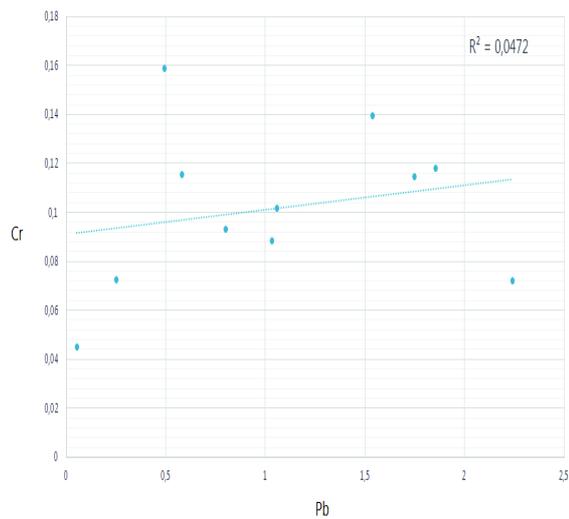


(d) Corrélation entre Pb et Fe

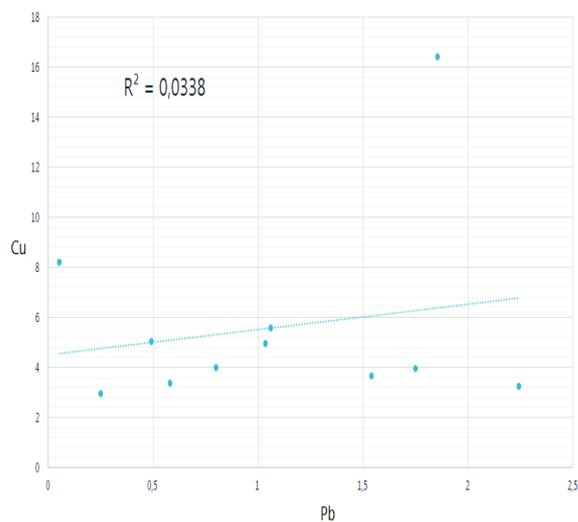
FIGURE 0.31: Corrélation entre les métaux compris dans les PM₃



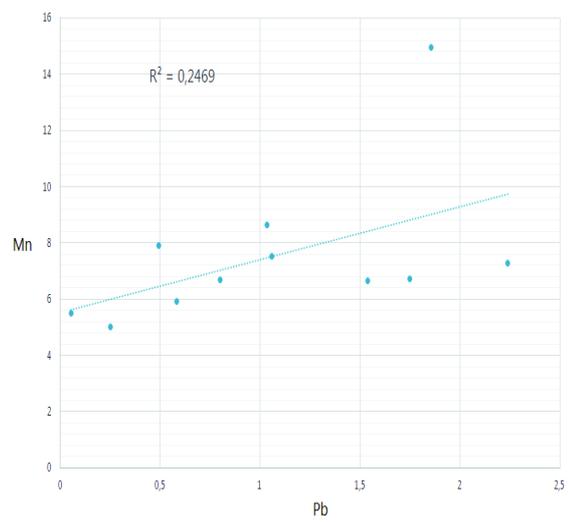
(a) Corrélation entre Cu et Cr



(b) Corrélation entre Cr et Pb



(c) Corrélation entre Pb et Cu



(d) Corrélation entre Pb et Mn

FIGURE 0.32: Corrélation entre les métaux compris dans les PM₁₀

TABLE 0.19: Résultats des prélèvement sur filtres(Première partie)

Fraction		PM 0-1				PM 1-3				PM 3-10				
Date	Avant	Après	Différence	Cc ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avant	Après	Différence	PM3 (g)	Cc ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avant	Après	Différence	PM10 (g)	Cc ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
01/03/2016	2,7361	2,7949	0,0588	37,121	0,9165	0,9918	0,0753	2,8702	1811,995	0,9124	0,9391	0,0267	0,102	64,394
07/03/2016	2,7153	2,7379	0,0226	14,268	0,908	0,9338	0,0258	2,7637	1744,760	0,906	0,9236	0,0176	0,0434	27,399
13/03/2016	2,711	2,7511	0,0401	25,316	0,9134	0,9322	0,0188	2,7699	1748,674	0,9214	0,9685	0,0471	0,0659	41,604
19/03/2016	2,7286	2,784	0,0554	34,975	0,9212	0,967	0,0458	2,8298	1786,490	0,9166	0,9834	0,0668	0,1126	71,086
23/03/2016	2,7232	2,7379	0,0147	9,280	0,9184	0,9428	0,0244	2,7623	1743,876	0,9166	0,9334	0,0168	0,0412	26,010
27/03/2016	2,7359	2,7646	0,0287	18,119	0,9221	0,939	0,0169	2,7815	1755,997	0,9169	0,9569	0,04	0,0569	35,922
30/03/2016	2,7266	2,7972	0,0706	44,571	0,9194	0,9308	0,0114	2,8086	1773,106	0,9136	0,952	0,0384	0,0498	31,439
03/04/2016	2,7266	2,7611	0,0345	21,780	0,9172	0,9416	0,0244	2,7855	1758,523	0,9145	0,9721	0,0576	0,082	51,768

TABLE 0.20: Résultats des prélèvement sur filtres(Deuxième partie)

Fraction		PM 0-1				PM 1-3				PM 3-7					PM 7-10				
Date	Avant	Après	Différence	Cc ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avant	Après	Différence	PM3 (g)	Cc ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avant	Après	Différence	PM7 (g)	Cc ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avant	Après	Différence	PM10 (g)	Cc ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
10/04/2016	2,741	2,779	0,038	37,121	0,917	0,992	0,075	0,134	78,617	0,905	0,949	0,043	0,168	105,827	0,906	0,931	0,025	0,193	121,547
13/04/2016	2,728	2,765	0,038	14,268	0,908	0,934	0,026	0,048	35,795	0,919	0,952	0,034	0,091	57,134	0,909	0,926	0,017	0,108	67,866
17/04/2016	2,731	2,765	0,034	25,316	0,913	0,932	0,019	0,059	36,553	0,912	0,956	0,044	0,102	64,331	0,919	0,943	0,024	0,126	79,419
27/04/2016	2,749	2,790	0,041	34,975	0,921	0,967	0,046	0,101	49,747	0,915	0,978	0,063	0,142	89,710	0,919	0,960	0,041	0,183	115,720
05/05/2016	2,760	2,783	0,022	9,280	0,918	0,943	0,024	0,039	23,422	0,915	0,947	0,032	0,069	43,624	0,919	0,937	0,018	0,087	55,051
08/05/2016	2,729	2,771	0,042	18,119	0,922	0,939	0,017	0,046	36,869	0,910	0,950	0,039	0,098	61,553	0,914	0,938	0,024	0,121	76,389
11/05/2016	2,723	2,752	0,029	44,571	0,919	0,931	0,011	0,082	26,010	0,911	0,932	0,021	0,062	39,141	0,911	0,924	0,013	0,075	47,222
15/05/2016	2,715	2,745	0,030	21,780	0,917	0,942	0,024	0,059	32,576	0,908	0,940	0,032	0,083	52,588	0,920	0,930	0,010	0,094	59,028

TABLE 0.21: Résultats de l'analyse des métaux lourds (Première partie)

DATE	DIAMETRE	Masse	Sb	Sb Error	As	As Error	Ni	Ni Error	Pb	Pb Error	Hg	Hg Error	Cr	Cr Error	Cd	Cd Error
01/03/2016	PM0	2,795	0,000	62,820	72,170	40,930	0,000	212,880	297,230	50,260	229,830	96,350	191,540	23,260	0,000	57,460
01/03/2016	PM1	0,992	0,000	48,420	460,130	132,100	0,000	314,820	2097,020	160,860	0,000	219,210	185,880	19,130	0,000	39,330
01/03/2016	PM3	0,939			258,600	67,500	0,000	228,450	678,780	78,160	211,640	103,530	171,710	21,700		
13/03/2016	PM0	2,751	0,000	222,980	95,440	39,060	0,000	190,460	242,860	46,000	146,470	93,830	206,070	23,990	0,000	244,380
13/03/2016	PM1	0,932	0,000	380,120	74,110	41,110	0,000	269,050	166,800	47,690	0,000	179,410	198,170	22,190	0,000	554,640
13/03/2016	PM3	0,969	0,000	459,200	54,620	33,680	0,000	247,910	99,170	39,420	279,540	108,370	203,960	23,180	0,000	375,290
19/03/2016	PM0	2,784	0,000	69,320	71,800	38,450	0,000	201,760	247,220	46,970	0,000	143,250	209,570	24,880	0,000	55,540
19/03/2016	PM1	0,967			278,450	84,900	0,000	222,900	1354,250	104,510	274,220	105,860	238,200	24,840		
19/03/2016	PM3	0,983	0,000	198,230	249,070	105,470	0,000	403,670	787,380	124,180	259,620	155,700	86,990	11,000	0,000	160,510
27/03/2016	PM0	2,765			56,850	32,590	0,000	206,500	140,100	38,400	171,540	97,020	207,240	24,710		
27/03/2016	PM1	0,939			184,350	74,110	0,000	294,280	703,300	89,310	0,000	190,100	164,960	23,920		
27/03/2016	PM3	0,957			0,000	56,120	0,000	224,190	231,010	47,360	0,000	146,210	194,430	24,580		
30/03/2016	PM0	2,797	0,000	153,780	42,760	28,160	0,000	201,900	101,790	33,840	228,990	92,200	201,900	24,020	0,000	108,370
30/03/2016	PM1	0,931			0,000	37,990	0,000	205,830	54,600	29,730	213,530	86,730	190,950	22,220		
30/03/2016	PM3	0,952			0,000	41,470	0,000	230,400	65,010	33,250	0,000	151,120	145,590	22,560		
03/04/2016	PM0	2,761			100,130	39,080	0,000	202,920	225,140	45,540	189,320	95,990	225,010	24,920		
03/04/2016	PM1	0,942			290,750	79,990	0,000	252,700	1016,200	95,400	265,400	113,160	193,890	22,900		
03/04/2016	PM3	0,972	0,000	249,230	129,490	66,690	0,000	221,220	884,860	84,330	266,910	99,160	188,710	23,180	0,000	156,390
13/04/2016	PM0	2,765			73,330	37,380	0,000	215,800	182,880	44,070	177,340	99,090	157,710	22,250		
13/04/2016	PM1	0,929	0,000	294,840	140,600	66,820	0,000	227,980	872,510	83,850	282,710	105,430	205,990	24,300	0,000	481,320
13/04/2016	PM3	0,952			160,560	48,630	242,870	151,230	339,380	55,230	301,040	100,110	191,670	24,090		
13/04/2016	PM7	0,926			0,000	46,640	0,000	293,730	0,000	55,360	327,400	127,490	182,670	19,620		
17/04/2016	PM0	2,765	0,000	191,650	72,260	30,860	0,000	201,390	105,350	34,550	196,970	94,360	205,760	23,860	0,000	131,810
17/04/2016	PM1	0,933			87,790	46,020	0,000	219,950	362,700	56,740	245,450	97,440	205,960	24,620		
17/04/2016	PM3	0,956			68,840	35,500	0,000	202,700	157,790	41,820	184,960	98,350	210,080	25,590		
17/04/2016	PM7	0,943			54,820	27,180	0,000	214,480	0,000	45,660	297,410	97,020	201,970	24,900		
27/04/2016	PM0	2,790	0,000	36,600	101,880	58,700	0,000	306,730	356,490	70,740	288,700	134,300	203,280	22,460	0,000	32,310
27/04/2016	PM1	0,950	0,000	397,990	452,370	105,380	0,000	311,200	1213,470	121,350	249,020	138,520	192,390	21,590	0,000	162,600
27/04/2016	PM3	0,978	0,000	63,340	127,730	58,950	0,000	261,870	477,470	71,460	239,970	113,790	186,330	21,150	0,000	49,970
27/04/2016	PM7	0,919	0,000	47,680	0,000	105,150	0,000	405,280	351,900	87,950	270,390	168,760	169,320	17,350	0,000	38,700
08/05/2016	PM0	2,771	0,000	45,310	0,000	38,530	0,000	207,420	0,000	45,870	196,350	87,180	80,100	13,430	0,000	36,400
08/05/2016	PM1	0,927	0,000	54,730	60,120	35,800	0,000	326,960	0,000	57,510	264,330	133,100	140,010	16,870	0,000	43,590
08/05/2016	PM3	0,950	0,000	58,540	0,000	56,080	0,000	297,130	89,620	43,550	230,160	127,630	185,650	18,990	0,000	49,880
08/05/2016	PM7	0,938	0,000	156,210	38,060	24,780	0,000	231,130	0,000	41,460	179,210	99,980	174,230	21,370	0,000	173,630

TABLE 0.22: Résultats de l'analyse des métaux lourds (Deuxième partie)

DATE	DIAMETRE	Masse	Mo	Mo Error	Zr	Zr Error	Sr	Sr Error	U	U Error	Rb	Rb Error	Th	Th Error	Se	Se Error	Au	Au Error
01/03/2016	PM0	2,7949	34,100	13,700	399,980	35,380	768,790	35,940	0,000	40,750	30,980	12,790	0,000	29,380	0,000	27,910	0,000	43,920
01/03/2016	PM1	0,9918	65,650	20,440	315,030	45,260	768,640	47,820	0,000	61,220	58,060	21,720	0,000	59,610	0,000	45,810	0,000	87,150
01/03/2016	PM3	0,9391	49,250	15,220	312,590	36,310	809,160	40,050	0,000	40,630	52,950	15,260	0,000	35,590	46,910	23,400	0,000	53,810
13/03/2016	PM0	2,7511	34,770	13,510	426,100	35,220	720,240	34,330	0,000	37,230	50,980	13,770	0,000	27,100	36,510	20,280	0,000	46,420
13/03/2016	PM1	0,9322	65,280	17,550	326,120	39,880	778,970	42,490	0,000	42,760	41,060	15,380	0,000	33,510	0,000	35,800	0,000	60,080
13/03/2016	PM3	0,9685	49,180	15,920	337,080	38,300	835,040	41,930	0,000	44,410	41,880	14,960	0,000	26,940	37,230	22,100	0,000	51,220
19/03/2016	PM0	2,7840	34,470	13,430	367,620	34,350	767,930	35,640	0,000	38,150	41,680	13,330	0,000	27,450	47,330	21,720	0,000	51,000
19/03/2016	PM1	0,9670	84,960	16,540	345,810	36,500	771,730	38,220	0,000	41,680	58,850	15,760	0,000	42,410	46,850	22,650	0,000	56,980
19/03/2016	PM3	0,9834	58,650	24,210	215,400	48,400	688,130	55,030	0,000	71,790	44,170	23,700	0,000	52,370	0,000	55,250	0,000	83,960
27/03/2016	PM0	2,7646	46,200	14,270	372,980	35,390	783,140	36,930	0,000	37,200	42,560	13,330	0,000	27,420	0,000	26,310	0,000	48,530
27/03/2016	PM1	0,9390	79,370	19,080	288,910	40,590	817,460	45,350	0,000	51,250	44,840	17,540	0,000	41,440	0,000	41,420	0,000	65,310
27/03/2016	PM3	0,9569	57,180	14,970	294,800	33,910	797,740	37,960	0,000	42,720	51,950	15,210	0,000	26,390	0,000	31,150	0,000	48,910
30/03/2016	PM0	2,7972	32,480	13,340	399,600	34,090	714,560	33,860	0,000	41,310	32,930	13,010	0,000	25,060	28,140	18,360	0,000	47,150
30/03/2016	PM1	0,9308	36,860	13,590	328,990	33,560	777,530	36,560	0,000	37,950	42,230	13,360	0,000	22,310	30,940	17,920	0,000	45,850
30/03/2016	PM3	0,9520	40,210	15,070	334,510	36,720	817,910	40,230	0,000	43,910	32,090	14,030	0,000	27,030	0,000	30,110	0,000	46,480
03/04/2016	PM0	2,7611	50,250	14,190	362,250	34,240	744,700	35,340	0,000	38,990	49,330	13,980	0,000	26,760	44,250	21,000	0,000	48,040
03/04/2016	PM1	0,9416	57,010	15,930	297,080	37,270	837,100	41,460	0,000	44,100	49,530	15,770	0,000	44,040	0,000	33,980	0,000	60,300
03/04/2016	PM3	0,9721	65,870	15,220	279,080	33,780	775,200	37,700	0,000	40,340	62,490	15,600	0,000	36,360	34,510	20,030	0,000	50,960
13/04/2016	PM0	2,7653	39,220	14,690	376,190	36,640	763,640	37,710	0,000	43,510	29,100	13,590	0,000	30,740	0,000	28,670	0,000	47,890
13/04/2016	PM1	0,9285	77,040	16,000	311,390	35,400	840,520	39,290	0,000	44,370	50,750	15,410	0,000	35,840	0,000	30,140	0,000	55,420
13/04/2016	PM3	0,9524	29,910	13,700	338,570	35,390	826,620	38,640	0,000	41,860	59,810	15,400	0,000	27,420	35,340	19,710	0,000	49,460
13/04/2016	PM7	0,9259	28,600	17,260	357,470	44,900	846,280	48,260	0,000	50,020	45,710	17,360	0,000	31,820	0,000	36,180	0,000	63,140
17/04/2016	PM0	2,7650	36,080	13,640	368,060	34,050	718,200	34,660	0,000	40,580	35,480	13,170	0,000	23,010	0,000	27,390	0,000	45,770
17/04/2016	PM1	0,9328	71,750	15,560	321,440	34,490	795,420	37,620	0,000	43,080	36,930	13,880	0,000	28,040	55,940	21,910	0,000	46,360
17/04/2016	PM3	0,9560	41,460	14,270	303,430	34,420	802,700	38,290	0,000	40,510	41,360	13,980	32,160	20,260	0,000	30,850	0,000	51,530
17/04/2016	PM7	0,9430	48,370	14,520	324,580	34,790	816,340	38,320	0,000	41,090	35,470	13,260	0,000	21,150	48,970	20,190	0,000	44,030
27/04/2016	PM0	2,7901	45,790	18,470	341,180	44,310	742,580	45,590	0,000	53,340	53,910	19,000	0,000	38,000	0,000	40,830	0,000	71,830
27/04/2016	PM1	0,9500	142,250	23,310	311,600	44,160	783,130	47,020	0,000	55,640	60,550	20,130	0,000	50,470	0,000	42,820	0,000	69,130
27/04/2016	PM3	0,9783	100,790	18,820	308,100	38,770	825,460	43,020	0,000	47,780	61,450	17,720	0,000	38,210	37,860	24,660	0,000	63,680
27/04/2016	PM7	0,9192	52,120	23,820	322,070	54,920	828,310	59,570	0,000	65,520	64,910	24,600	0,000	47,980	0,000	53,490	0,000	85,740
08/05/2016	PM0	2,7711	31,350	14,490	374,500	35,800	599,310	34,580	0,000	37,870	37,190	13,500	0,000	25,810	39,500	21,050	0,000	51,350
08/05/2016	PM1	0,9273	46,410	19,240	359,950	46,410	797,790	48,950	0,000	53,250	44,920	18,480	0,000	34,340	0,000	41,990	0,000	75,880
08/05/2016	PM3	0,9495	47,110	18,630	301,180	43,270	822,000	48,420	0,000	54,400	46,980	18,640	0,000	29,750	0,000	35,280	0,000	67,110
08/05/2016	PM7	0,9379	24,510	14,010	318,890	35,660	781,130	38,860	0,000	43,180	35,570	14,100	0,000	25,620	0,000	28,790	0,000	47,120

TABLE 0.23: Résultats de l'analyse des métaux lourds (Troisième partie)

DATE	DIAMETRE	Masse	Zn	Zn Error	W	W Error	Cu	Cu Error	Co	Co Error	Fe	Fe Error	Mn	Mn Error	V	V Error
01/03/2016	PM0	2,7949	133408,33	1155,130	0,000	891,700	476,910	138,540	0,000	245,940	2723,12	373,800	3673,250	522,710	0,000	137,380
01/03/2016	PM1	0,9918	159445,67	1675,170	0,000	1349,980	2838,750	314,000	0,000	506,890	12235,21	910,240	5991,750	847,140	0,000	112,010
01/03/2016	PM3	0,9391	130007,73	1239,850	0,000	959,190	1040,320	179,410	0,000	415,180	14525,90	790,590	4009,160	584,190	0,000	127,820
13/03/2016	PM0	2,7511	130520,77	1128,080	0,000	879,950	612,540	141,020	0,000	240,880	2530,75	357,030	3228,630	492,660	0,000	141,680
13/03/2016	PM1	0,9322	141196,94	1398,840	0,000	1126,320	2451,370	256,880	0,000	368,230	8232,80	674,290	4636,670	685,280	0,000	131,610
13/03/2016	PM3	0,9685	133054,70	1292,160	0,000	992,770	1399,050	202,440	0,000	403,800	12565,51	766,920	4780,600	645,620	0,000	136,310
19/03/2016	PM0	2,7840	136052,11	1159,090	0,000	902,000	479,450	137,240	0,000	221,840	2503,68	364,440	4106,710	536,860	0,000	147,380
19/03/2016	PM1	0,9670	150624,14	1299,540	0,000	987,340	3217,320	250,360	0,000	346,610	8347,58	609,630	4460,920	593,530	0,000	143,970
19/03/2016	PM3	0,9834	118181,99	1748,900	0,000	1391,460	1832,930	343,830	0,000	688,810	17516,56	1275,890	3386,330	807,290	0,000	60,840
27/03/2016	PM0	2,7646	131659,64	1169,990	0,000	907,880	602,730	146,780	0,000	271,560	3274,58	406,220	3975,940	538,660	0,000	144,730
27/03/2016	PM1	0,9390	138955,73	1444,980	0,000	1169,780	3314,420	299,070	0,000	385,300	7234,95	666,170	4544,320	697,640	0,000	141,260
27/03/2016	PM3	0,9569	125628,06	1165,420	0,000	916,410	1620,350	192,130	0,000	380,060	14427,15	752,380	3964,750	546,660	0,000	142,510
30/03/2016	PM0	2,7972	127227,20	1101,160	0,000	849,460	1094,430	159,310	0,000	271,430	6605,15	502,900	3585,090	499,190	0,000	140,990
30/03/2016	PM1	0,9308	110559,44	1065,690	0,000	808,880	887,070	154,810	0,000	287,340	5930,16	494,680	2992,570	481,060	0,000	130,520
30/03/2016	PM3	0,9520	120276,72	1193,910	0,000	939,160	854,640	170,980	0,000	349,190	8564,70	625,670	3762,850	563,100	0,000	132,210
03/04/2016	PM0	2,7611	134018,13	1156,980	0,000	895,920	549,040	140,940	0,000	255,060	3160,13	392,470	3744,110	522,810	0,000	146,380
03/04/2016	PM1	0,9416	153894,14	1370,680	0,000	1052,090	2623,160	245,650	0,000	336,200	8569,79	645,220	4726,230	636,010	0,000	134,590
03/04/2016	PM3	0,9721	135814,64	1216,440	0,000	922,450	1882,530	203,040	0,000	434,380	19300,39	865,230	4332,240	572,850	0,000	134,650
13/04/2016	PM0	2,7653	133595,22	1217,620	0,000	936,540	635,990	154,900	0,000	275,630	3910,77	447,250	3975,060	556,230	0,000	131,880
13/04/2016	PM1	0,9285	149812,25	1279,640	0,000	977,160	4793,030	288,910	0,000	350,890	8379,58	603,960	4759,270	598,260	0,000	142,500
13/04/2016	PM3	0,9524	135554,17	1207,620	0,000	918,620	1484,590	187,270	0,000	360,910	11570,06	682,420	4235,600	559,810	0,000	141,520
13/04/2016	PM7	0,9259	147723,78	1554,190	0,000	1176,970	276,680	183,490	0,000	398,130	5193,30	614,420	4756,470	747,390	0,000	115,070
17/04/2016	PM0	2,7650	129984,86	1137,180	0,000	878,800	420,990	133,950	0,000	230,410	2728,54	373,350	3931,960	527,580	0,000	140,740
17/04/2016	PM1	0,9328	132253,16	1184,340	0,000	906,510	5039,090	288,570	0,000	349,420	9009,75	609,430	4511,840	575,380	0,000	144,800
17/04/2016	PM3	0,9560	122935,80	1158,430	0,000	905,400	1769,650	198,100	0,000	394,600	15707,81	786,040	4095,690	559,730	0,000	148,230
17/04/2016	PM7	0,9430	133295,77	1195,160	0,000	899,380	486,360	143,780	0,000	313,720	8823,52	604,460	3949,580	547,420	0,000	145,700
27/04/2016	PM0	2,7901	157411,23	1612,770	0,000	1241,460	2285,280	280,510	0,000	401,980	6144,63	669,460	6332,700	837,280	0,000	133,660
27/04/2016	PM1	0,9500	164183,14	1656,380	0,000	1289,860	11607,070	531,290	0,000	475,130	12611,87	898,510	5731,390	804,750	0,000	127,620
27/04/2016	PM3	0,9783	134020,08	1338,600	0,000	1043,190	6947,690	374,920	0,000	456,350	16935,52	905,020	4719,170	659,370	0,000	122,440
27/04/2016	PM7	0,9192	152100,38	1964,100	0,000	1543,600	1984,840	351,910	0,000	614,280	15328,54	1209,710	6669,370	1054,860	0,000	100,040
08/05/2016	PM0	2,7711	87770,77	1018,680	0,000	788,110	1122,220	177,000	0,000	259,630	3171,17	410,140	2379,160	459,400	0,000	77,620
08/05/2016	PM1	0,9273	134690,08	1550,320	0,000	1211,140	3614,700	339,470	0,000	418,050	5957,85	671,690	4237,370	736,860	0,000	99,630
08/05/2016	PM3	0,9495	126766,80	1468,120	0,000	1158,260	5299,400	381,260	0,000	527,480	17922,39	1048,610	5024,370	775,560	0,000	110,140
08/05/2016	PM7	0,9379	124235,41	1197,670	0,000	932,070	1607,240	199,370	0,000	352,180	8523,70	617,270	3843,640	565,480	0,000	125,420

TABLE 0.24: Résultats de l'analyse des métaux lourds (Quatrième partie)

DATE	DIAMETRE	Masse	Ti	Ti Error	Sc	Sc Error	Ca	Ca Error	K	K Error	S	S Error	Ba	Ba Error	Cs	Cs Error
01/03/2016	PM0	2,7949	741,81	242,68	52,39	22,74	14437,75	182	22669,1	286,93	1489,54	238,5	6534	420,7	0	66,56
01/03/2016	PM1	0,9918	948,55	198,61	44,1	21,46	17990,27	179,2	19370,4	241,93	4123,33	288,37	5014	286,2	0	50,6
01/03/2016	PM3	0,9391	1091,2	226,54	76,88	26,45	23367,82	222	21457,9	278,79	1094,55	226,56				
13/03/2016	PM0	2,7511	1094,7	250,77	63,81	23,17	14246,02	183,6	23632,4	295,9	953,27	222,18	4814	1393	0	224
13/03/2016	PM1	0,9322	1404,9	233,79	39,73	23,44	17820,61	193,7	23688,4	285,28	1421,11	232,31	9093	2936	0	414
13/03/2016	PM3	0,9685	1227,7	241,94	0	44,24	29757,71	255,2	22873,9	296,2	1122,82	241,65	7755	2466	0	416,2
19/03/2016	PM0	2,7840	1235,6	260,44	56,43	23,78	14479,93	189,2	25058,7	310,06	1510,93	250,4	6761	501,9	0	78,42
19/03/2016	PM1	0,9670	1159,7	254,61	59,07	25,76	17596,61	210,7	22719	306,07	6692,95	411,2				
19/03/2016	PM3	0,9834	378,86	107,57	0	23,19	14861,53	136,6	7718,66	136,72	1050,34	149,5	5108	1046	0	193,9
27/03/2016	PM0	2,7646	1043,8	255,59	62,86	24,26	14314,62	193,6	21671,1	300,77	1288,97	245,8				
27/03/2016	PM1	0,9390	1183,7	250,01	55,23	26,11	16609,33	215	19480,8	300,84	2650,64	308,52				
27/03/2016	PM3	0,9569	877,11	252,04	0	53,83	40741,66	321,9	21247,9	314,08	2381,95	317,4				
30/03/2016	PM0	2,7972	1003,8	248,75	72,15	26,79	21232,18	221,6	23294,8	300,19	1305,16	245,09	4706	995,2	0	169,1
30/03/2016	PM1	0,9308	1454,8	231,2	70,61	24,57	18880,93	202,6	22370,9	283,96	1180,3	227,51				
30/03/2016	PM3	0,9520	739,28	233,08	48,1	25,29	16995,73	210,2	17451,7	277,84	569,79	212,03				
03/04/2016	PM0	2,7611	1094,8	258,77	61,58	24,4	15455,27	195,3	24362,4	308,15	1039,94	233,5				
03/04/2016	PM1	0,9416	880,99	237,52	55,29	24,24	17437,54	198,7	21589,5	283,95	2480,89	275,96				
03/04/2016	PM3	0,9721	860,89	238,32	0	51,1	39365,11	299	21555,5	298,21	2559,29	305,04	4550	1409	0	236,2
13/04/2016	PM0	2,7653	740,15	232,41	46,3	22,46	14526,32	181,7	20228,2	272,82	1383,6	231,56				
13/04/2016	PM1	0,9285	1030,8	251,71	0	40,17	21122,45	224,4	22688,4	301,33	2734,27	298,46	4615	2454	0	431,5
13/04/2016	PM3	0,9524	1032,1	249,75	0	46,04	30805,23	266,7	22762,8	303,92	2046,8	283,33				
13/04/2016	PM7	0,9259	998,98	203,74	54,48	20,23	14096,07	163,9	18906,4	243,03	443,75	172,76				
17/04/2016	PM0	2,7650	1008,3	248,7	75,35	23,35	14495,07	184,7	23583,5	295,4	1224,43	232,46	5291	1080	0	187,1
17/04/2016	PM1	0,9328	1122,6	255,58	72,89	26,83	20146,3	220,4	23415,1	305,99	3757,97	330,47				
17/04/2016	PM3	0,9560	1071,8	261,71	0	52,53	35262,84	308,4	21686,1	324,06	2556,52	328,02				
17/04/2016	PM7	0,9430	991,97	257,05	0	46,18	28558,1	265,2	22573,7	311,39	1429,87	267				
27/04/2016	PM0	2,7901	1423,3	236,65	73,62	23,87	17864,31	194,3	24407,8	289,62	2843,96	279,29	6016	235,8	0	39,2
27/04/2016	PM1	0,9500	1322,1	225,99	60,15	24,2	19522,54	201,1	22829,2	280,66	5169,71	340,43	6988	2488	0	371,1
27/04/2016	PM3	0,9783	1074,7	216,68	0	45,35	34738,74	266,7	19841,3	271,51	4512,4	338,17	6079	378	0	63,16
27/04/2016	PM7	0,9192	823,63	176,62	0	35,81	27278,7	209,8	16614,8	220,65	2117,66	229,01	5459	280	0	48,41
08/05/2016	PM0	2,7711	697,65	136,78	30,69	13,93	8636,19	113,8	10972,2	166,47	756,74	146,19	7367	290,6	0	45,61
08/05/2016	PM1	0,9273	1054,9	176,65	52,05	17,33	11804,3	139,8	17531,4	216,81	397,73	152,21	6705	351,5	0	58,01
08/05/2016	PM3	0,9495	1455,1	195,92	0	42,14	35199,79	250,1	20706,5	258,09	2090,4	249,72	5306	355,7	0	61,17
08/05/2016	PM7	0,9379	1015,1	221,65	0	40,64	27195,39	235,1	20319	269,7	1066,05	224,63	5870	1430	0	232,1

TABLE 0.25: Résultats de l'analyse des métaux lourds (Cinquième partie)

DATE	DIAMETRE	Masse	Te	Te Error	Sn	Sn Error	Ag	Ag Error	Pd	Pd Error
01/03/2016	PM0	2,7949	0	182,31	0	72,78	0	98,44	0	53,74
01/03/2016	PM1	0,9918	0	136,91	0	52,87	0	74,81	0	44,29
01/03/2016	PM3	0,9391								
13/03/2016	PM0	2,7511	0	722,93	0	258,05	0	371,1	0	66,66
13/03/2016	PM1	0,9322	0	1192,86	0	509,79	0	653,4	0	104,74
13/03/2016	PM3	0,9685	0	910,11	0	484,11	0	567,4	0	92,13
19/03/2016	PM0	2,7840	0	218,93	0	79,07	0	119,5	0	52,95
19/03/2016	PM1	0,9670								
19/03/2016	PM3	0,9834	0	543,12	0	209,69	0	300,5	0	164,4
27/03/2016	PM0	2,7646								
27/03/2016	PM1	0,9390								
27/03/2016	PM3	0,9569								
30/03/2016	PM0	2,7972	0	500,29	0	171,17	0	238,2	0	165,42
30/03/2016	PM1	0,9308								
30/03/2016	PM3	0,9520								
03/04/2016	PM0	2,7611								
03/04/2016	PM1	0,9416								
03/04/2016	PM3	0,9721	0	691,85	0	237,92	0	301,5	0	59,25
13/04/2016	PM0	2,7653								
13/04/2016	PM1	0,9285	0	1110,32	0	361,91	0	647,2	0	573,44
13/04/2016	PM3	0,9524								
13/04/2016	PM7	0,9259								
17/04/2016	PM0	2,7650	0	553,24	0	179,95	0	283	0	179,41
17/04/2016	PM1	0,9328								
17/04/2016	PM3	0,9560								
17/04/2016	PM7	0,9430								
27/04/2016	PM0	2,7901	0	107,36	0	40,06	0	59,38	0	33,74
27/04/2016	PM1	0,9500	0	1274,11	0	227,58	0	528,3	0	94,04
27/04/2016	PM3	0,9783	0	180,85	0	65,04	0	92,53	0	55,88
27/04/2016	PM7	0,9192	0	130,76	0	51,02	0	70,65	0	39,02
08/05/2016	PM0	2,7711	0	129,81	0	48,14	0	71,31	0	43,13
08/05/2016	PM1	0,9273	0	160,88	0	57,89	0	87,58	0	55,4
08/05/2016	PM3	0,9495	0	167,16	0	64,34	0	91,46	0	63,41
08/05/2016	PM7	0,9379	0	522,4	0	222,84	0	355,1	0	173,55

TABLE 0.26: Concentrations des métaux lourds dans les filtres (Première partie)

Date	Classe Granulométrique	Masse Filtre chargé	As (μg)	As ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Pb (μg)	Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cr (μg)	Cr ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mo (μg)	Mo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sr (μg)	Sr ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Se (μg)	Se ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
01/03/2016	PM0	2,7949	201,708	0,127	830,728	0,524	535,335	0,024	95,306	0,025	2148,691	0,683	0,000	0,000
01/03/2016	PM1	0,9918	456,357	0,288	2079,824	1,313	184,356	0,032	65,112	0,026	762,337	0,213	0,000	0,000
01/03/2016	PM3	0,9391	242,851	0,153	637,442	0,402	161,253	0,017	46,251	0,014	759,882	0,211	44,053	0,028
13/03/2016	PM0	2,7511	262,565	0,166	668,132	0,422	566,919	0,044	95,656	0,025	1981,452	0,577	100,443	0,063
13/03/2016	PM1	0,9322	69,085	0,044	155,491	0,098	184,734	0,032	60,854	0,023	726,156	0,190	0,000	0,000
13/03/2016	PM3	0,9685	52,899	0,033	96,046	0,061	197,535	0,040	47,631	0,015	808,736	0,242	36,057	0,023
19/03/2016	PM0	2,784	199,891	0,126	688,260	0,435	583,443	0,054	95,964	0,026	2137,917	0,676	131,767	0,083
19/03/2016	PM1	0,967	269,261	0,170	1309,560	0,827	230,339	0,061	82,156	0,036	746,263	0,203	45,304	0,029
19/03/2016	PM3	0,9834	244,935	0,155	774,309	0,489	85,546	0,000	57,676	0,021	676,707	0,159	0,000	0,000
27/03/2016	PM0	2,7646	157,168	0,099	387,320	0,245	572,936	0,047	127,725	0,046	2165,069	0,693	0,000	0,000
27/03/2016	PM1	0,939	173,105	0,109	660,399	0,417	154,897	0,013	74,528	0,032	767,595	0,216	0,000	0,000
27/03/2016	PM3	0,9569	0,000	0,000	221,053	0,140	186,050	0,033	54,716	0,019	763,357	0,213	0,000	0,000
30/03/2016	PM0	2,7972	119,608	0,076	284,727	0,180	564,755	0,042	90,853	0,022	1998,767	0,588	78,713	0,050
30/03/2016	PM1	0,9308	0,000	0,000	50,822	0,032	177,736	0,027	34,309	0,006	723,725	0,188	28,799	0,018
30/03/2016	PM3	0,952	0,000	0,000	61,890	0,039	138,602	0,003	38,280	0,009	778,650	0,223	0,000	0,000
03/04/2016	PM0	2,7611	276,469	0,175	621,634	0,392	621,275	0,078	138,745	0,053	2056,191	0,624	122,179	0,077
03/04/2016	PM1	0,9416	273,770	0,173	956,854	0,604	182,567	0,030	53,681	0,019	788,213	0,229	0,000	0,000
03/04/2016	PM3	0,9721	125,877	0,079	860,172	0,543	183,445	0,031	64,032	0,025	753,572	0,207	33,547	0,021
13/04/2016	PM0	2,7653	202,779	0,128	505,718	0,319	436,115	0,000	108,455	0,033	2111,694	0,660	0,000	0,000
13/04/2016	PM1	0,9285	130,547	0,082	810,126	0,511	191,262	0,036	71,532	0,030	780,423	0,224	0,000	0,000
13/04/2016	PM3	0,9524	152,917	0,097	323,226	0,204	182,547	0,030	28,486	0,003	787,273	0,228	33,658	0,021
13/04/2016	PM7	0,9259	0,000	0,000	0,000	0,000	169,134	0,022	26,481	0,001	783,571	0,226	0,000	0,000
17/04/2016	PM0	2,765	199,799	0,126	291,293	0,184	568,926	0,045	99,761	0,028	1985,823	0,580	0,000	0,000
17/04/2016	PM1	0,9328	81,891	0,052	338,327	0,214	192,119	0,036	66,928	0,027	741,968	0,200	52,181	0,033
17/04/2016	PM3	0,956	65,811	0,042	150,847	0,095	200,836	0,042	39,636	0,010	767,381	0,216	0,000	0,000
17/04/2016	PM7	0,943	51,695	0,033	0,000	0,000	190,458	0,035	45,613	0,013	769,809	0,217	46,179	0,029
27/04/2016	PM0	2,7901	284,255	0,179	994,643	0,628	567,172	0,044	127,759	0,046	2071,872	0,634	0,000	0,000
27/04/2016	PM1	0,95	429,752	0,271	1152,797	0,728	182,771	0,031	135,138	0,070	743,974	0,201	0,000	0,000
27/04/2016	PM3	0,9783	124,958	0,079	467,109	0,295	182,287	0,030	98,603	0,047	807,548	0,241	37,038	0,023
27/04/2016	PM7	0,9192	0,000	0,000	323,466	0,204	155,639	0,013	47,909	0,015	761,383	0,212	0,000	0,000
08/05/2016	PM0	2,7711	0,000	0,000	0,000	0,000	221,965	0,000	86,874	0,020	1660,748	0,375	109,458	0,069
08/05/2016	PM1	0,9273	55,749	0,035	0,000	0,000	129,831	0,000	43,036	0,012	739,791	0,199	0,000	0,000
08/05/2016	PM3	0,9495	0,000	0,000	85,094	0,054	176,275	0,026	44,731	0,013	780,489	0,224	0,000	0,000
08/05/2016	PM7	0,9379	35,696	0,023	0,000	0,000	163,410	0,018	22,988	0,000	732,622	0,194	0,000	0,000

TABLE 0.27: Concentrations des métaux lourds dans les filtres (Deuxième partie)

Date	Classe Granulométrique	Masse Filtre chargé	Zn(μg)	Zn ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cu(μg)	Cu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fe(μg)	Fe ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mn(μg)	Mn ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ti(μg)	Ti ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
01/03/2016	PM0	2,7949	372862,942	119,321	1332,916	0,841	7610,848	3,027	10266,366	3,321	2073,285	0,000
01/03/2016	PM1	0,9918	158138,216	63,008	2815,472	1,777	12134,881	7,316	5942,618	2,664	940,772	0,000
01/03/2016	PM3	0,9391	122090,259	40,250	976,965	0,617	13641,273	8,267	3765,002	1,289	1024,737	0,028
13/03/2016	PM0	2,7511	359075,690	110,617	1685,159	1,064	6962,346	2,618	8882,284	2,447	3011,547	0,189
13/03/2016	PM1	0,9322	131623,787	46,269	2285,167	1,443	7674,616	4,500	4322,304	1,641	1309,648	0,208
13/03/2016	PM3	0,9685	128863,477	44,526	1354,980	0,855	12169,696	7,338	4630,011	1,835	1189,057	0,132
19/03/2016	PM0	2,784	378769,074	123,049	1334,789	0,843	6970,245	2,623	11433,081	4,058	3439,855	0,460
19/03/2016	PM1	0,967	145653,543	55,126	3111,148	1,964	8072,110	4,751	4313,710	1,635	1121,449	0,089
19/03/2016	PM3	0,9834	116220,169	36,544	1802,503	1,138	17225,785	10,530	3330,117	1,015	372,571	0,000
27/03/2016	PM0	2,7646	363986,241	113,717	1666,307	1,052	9052,904	3,938	10991,884	3,779	2885,800	0,110
27/03/2016	PM1	0,939	130479,430	45,546	3112,240	1,965	6793,618	3,944	4267,116	1,606	1111,476	0,083
27/03/2016	PM3	0,9569	120213,491	39,065	1550,513	0,979	13805,340	8,370	3793,869	1,307	839,307	0,000
30/03/2016	PM0	2,7972	355879,924	108,599	3061,340	1,933	18475,926	9,886	10028,214	3,171	2807,885	0,061
30/03/2016	PM1	0,9308	102908,727	28,140	825,685	0,521	5519,793	3,139	2785,484	0,671	1354,146	0,236
30/03/2016	PM3	0,952	114503,437	35,460	813,617	0,514	8153,594	4,802	3582,233	1,174	703,795	0,000
03/04/2016	PM0	2,7611	370037,459	117,537	1515,954	0,957	8725,435	3,731	10337,862	3,366	3022,714	0,196
03/04/2016	PM1	0,9416	144906,722	54,654	2469,967	1,559	8069,314	4,749	4450,218	1,722	829,540	0,000
03/04/2016	PM3	0,9721	132025,412	46,522	1830,007	1,155	18761,909	11,499	4211,371	1,571	836,871	0,000
13/04/2016	PM0	2,7653	369430,862	117,154	1758,703	1,110	10814,452	5,050	10992,233	3,779	2046,737	0,000
13/04/2016	PM1	0,9285	139100,674	50,989	4450,328	2,810	7780,440	4,567	4418,982	1,702	957,098	0,000
13/04/2016	PM3	0,9524	129101,792	44,676	1413,924	0,893	11019,325	6,611	4033,985	1,459	982,924	0,002
13/04/2016	PM7	0,9259	136777,448	49,522	256,178	0,162	4808,476	2,690	4404,016	1,692	924,956	0,000
17/04/2016	PM0	2,765	359408,138	110,827	1164,037	0,735	7544,413	2,985	10871,869	3,704	2787,922	0,048
17/04/2016	PM1	0,9328	123365,748	41,055	4700,463	2,967	8404,295	4,960	4208,644	1,569	1047,171	0,043
17/04/2016	PM3	0,956	117526,625	37,369	1691,785	1,068	15016,666	9,135	3915,480	1,384	1024,641	0,028
17/04/2016	PM7	0,943	125697,911	42,528	458,637	0,290	8320,579	4,908	3724,454	1,263	935,428	0,000
27/04/2016	PM0	2,7901	439193,073	161,196	6376,160	4,025	17144,132	9,046	17668,866	7,995	3971,205	0,795
27/04/2016	PM1	0,95	155973,983	61,641	11026,717	6,961	11981,277	7,219	5444,821	2,350	1255,967	0,174
27/04/2016	PM3	0,9783	131111,844	45,945	6796,925	4,291	16568,019	10,114	4616,764	1,827	1051,418	0,045
27/04/2016	PM7	0,9192	139810,669	51,437	1824,465	1,152	14089,994	8,550	6130,485	2,782	757,081	0,000
08/05/2016	PM0	2,7711	243221,581	37,477	3109,784	1,963	8787,629	3,770	6592,890	1,002	1933,258	0,000
08/05/2016	PM1	0,9273	124898,111	42,023	3351,911	2,116	5524,714	3,143	3929,313	1,393	978,190	0,000
08/05/2016	PM3	0,9495	120365,077	39,161	5031,780	3,177	17017,309	10,398	4770,639	1,924	1381,589	0,254
08/05/2016	PM7	0,9379	116520,391	36,734	1507,430	0,952	7994,378	4,702	3604,950	1,188	952,062	0,000

TABLE 0.28: Concentrations des métaux lourds dans les filtres (Troisième partie)

Date	Classe Granulométrique	Masse Filtre chargé	Sc(μg)	Sc ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ca(μg)	Ca ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	K(μg)	K ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	S(μg)	S ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ba(μg)	Ba ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
01/03/2016	PM0	2,7949	146,425	0,000	40352,067	2,659	63357,896	0,000	4163,115	2,628	18262,575	11,310
01/03/2016	PM1	0,9918	43,738	0,000	17842,750	4,625	19211,583	0,000	4089,519	2,582	4973,361	3,007
01/03/2016	PM3	0,9391	72,198	0,016	21944,720	7,215	20151,151	0,570	1027,892	0,649	0,000	0,000
13/03/2016	PM0	2,7511	175,548	0,006	39192,226	1,927	65015,041	0,319	2622,541	1,656	13243,603	8,142
13/03/2016	PM1	0,9322	37,036	0,000	16612,373	3,848	22082,326	1,789	1324,759	0,836	8476,355	5,219
13/03/2016	PM3	0,9685	0,000	0,000	28820,342	11,555	22153,333	1,834	1087,451	0,687	7510,882	4,609
19/03/2016	PM0	2,784	157,101	0,000	40312,125	2,634	69763,393	3,316	4206,429	2,656	18822,485	11,664
19/03/2016	PM1	0,967	57,121	0,007	17015,922	4,103	21969,283	1,718	6472,083	4,086	0,000	0,000
19/03/2016	PM3	0,9834	0,000	0,000	14614,829	2,587	7590,530	0,000	1032,904	0,652	5023,060	3,038
27/03/2016	PM0	2,7646	173,783	0,004	39574,198	2,168	59911,923	0,000	3563,486	2,250	0,000	0,000
27/03/2016	PM1	0,939	51,861	0,003	15596,161	3,207	18292,462	0,000	2488,951	1,571	0,000	0,000
27/03/2016	PM3	0,9569	0,000	0,000	38985,694	17,973	20332,154	0,684	2279,288	1,439	0,000	0,000
30/03/2016	PM0	2,7972	201,818	0,022	59390,654	14,678	65160,131	0,410	3650,794	2,305	13162,868	8,091
30/03/2016	PM1	0,9308	65,724	0,012	17574,370	4,456	20822,787	0,994	1098,623	0,694	0,000	0,000
30/03/2016	PM3	0,952	45,791	0,000	16179,935	3,575	16613,999	0,000	542,440	0,342	0,000	0,000
03/04/2016	PM0	2,7611	170,029	0,002	42673,546	4,124	67267,050	1,740	2871,378	1,813	0,000	0,000
03/04/2016	PM1	0,9416	52,061	0,003	16419,188	3,726	20328,701	0,682	2336,006	1,475	0,000	0,000
03/04/2016	PM3	0,9721	0,000	0,000	38266,823	17,519	20954,092	1,077	2487,886	1,571	4423,317	2,660
13/04/2016	PM0	2,7653	128,033	0,000	40169,633	2,544	55936,986	0,000	3826,069	2,415	0,000	0,000
13/04/2016	PM1	0,9285	0,000	0,000	19612,195	5,742	21066,133	1,148	2538,770	1,603	4285,352	2,573
13/04/2016	PM3	0,9524	0,000	0,000	29338,901	11,883	21679,329	1,535	1949,372	1,231	0,000	0,000
13/04/2016	PM7	0,9259	50,443	0,002	13051,551	1,600	17505,454	0,000	410,868	0,259	0,000	0,000
17/04/2016	PM0	2,765	208,343	0,026	40078,869	2,486	65208,378	0,441	3385,549	2,137	14628,703	9,016
17/04/2016	PM1	0,9328	67,992	0,013	18792,469	5,225	21841,624	1,637	3505,434	2,213	0,000	0,000
17/04/2016	PM3	0,956	0,000	0,000	33711,275	14,643	20731,931	0,937	2444,033	1,543	0,000	0,000
17/04/2016	PM7	0,943	0,000	0,000	26930,288	10,362	21287,009	1,287	1348,367	0,851	0,000	0,000
27/04/2016	PM0	2,7901	205,407	0,024	49843,211	8,651	68100,286	2,266	7934,933	5,009	16785,102	10,378
27/04/2016	PM1	0,95	57,143	0,007	18546,413	5,069	21687,750	1,540	4911,225	3,101	6638,914	4,059
27/04/2016	PM3	0,9783	0,000	0,000	33984,909	14,816	19410,724	0,103	4414,481	2,787	5947,555	3,622
27/04/2016	PM7	0,9192	0,000	0,000	25074,581	9,191	15272,361	0,000	1946,553	1,229	5018,133	3,035
08/05/2016	PM0	2,7711	85,045	0,000	23931,746	0,000	30405,147	0,000	2097,002	1,324	20414,472	12,669
08/05/2016	PM1	0,9273	48,266	0,001	10946,127	0,271	16256,839	0,000	368,815	0,233	6217,899	3,793
08/05/2016	PM3	0,9495	0,000	0,000	33422,201	14,461	19660,793	0,261	1984,835	1,253	5038,208	3,048
08/05/2016	PM7	0,9379	0,000	0,000	25506,556	9,463	19057,228	0,000	999,848	0,631	5505,689	3,343