



Caractérisation physico-chimique des particules atmosphériques en suspension et identification de leurs sources de pollution dans la ville de Meknès au Maroc
(Physical and chemical characterization of suspended atmospheric particles and source identification in town of Meknes in Morocco)

H. Ait Bouh^{1*}, F. Benyaich², Y. Noack³, M. Bounakhla⁴, M. Tahri⁴

¹ *Université Moulay Ismaïl, Faculté des Sciences, Département de Physique, BP 4010, Béni M'Hamed, Meknès 50000, Maroc.*

² *Ecole Supérieure de Technologie (EST), Meknès, Maroc.*

³ *Centre Européen de Recherches et de l'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE), Aix en Provence, France.*

⁴ *Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaire (CNESTEN), Kenitra, Maroc.*

Received 15 Nov 2011, Revised 21 Feb 2012, accepted 21 Feb 2012

* Corresponding Author: haitbouh@gmail.com ,

Abstract

The purpose of this study is the characterization and the source identification of the suspended atmospheric particles (PM-10) in Town of Meknes in Morocco. The particles were collected, between March 2007 and April 2008, and the concentrations of nine elements (Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Pb and Zn) were analysed, whereas solubility degree of metals was determined by sequential extractions. The results obtained make it possible to see that the chemical compositions present quite seasonal variation with generally the same distribution for fine and coarse fractions. It is also noted that Pb concentrations are higher than the air quality standards. Moreover, sequential extractions showed that except of Ca and K, elements were found in insoluble oxide phases. While, application of particles morphologies and micro-analyses and statistical techniques like: Ascending Hierarchical Clustering (AHC), Principal Component Analysis (PCA) and Positive matrix factorization (PMF), show the influence of the natural and anthropogenic sources: mineral emissions (cement factory), re-suspended soil particles, road traffic and rail traffic.

Keywords: Atmospheric particulate matter, physical and chemical characterisation, Ascending Hierarchical Clustering (AHC), Principal Component Analysis (PCA), Positive Matrix Factorization (PMF).

Résumé

Cette étude s'intéresse à la caractérisation et l'identification des sources des particules atmosphériques en suspension (PM-10) dans la ville de Meknès au Maroc. Les particules ont été collectées entre mars 2007 et avril 2008 et les concentrations de neuf éléments (Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Pb et Zn) ont été analysées. Le degré de solubilité est déterminé par les procédures des extractions séquentielles. Les résultats obtenus permettent de voir une variation saisonnière non significative de la composition chimique avec presque la même distribution entre les fractions fines et grossières. On note également que les teneurs en Pb sont supérieures aux normes de qualité. Aussi, à l'exception du Ca et du K, les autres métaux ont le moins d'impact environnemental. Concernant les sources de pollution, la caractérisation de la morphologie et la micro-analyse des particules en plus de l'application de l'ensemble de ces techniques statistiques : Classification Ascendante hiérarchique (CAH), l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Matrice à Facteurs Positifs (PMF), montrent l'influence des sources naturelles et anthropiques, notamment l'érosion du sol, le trafic routier, l'industrie de ciment et le trafic ferroviaire.

Mots clés : Matière particulaire atmosphérique, caractérisation physico-chimique, Classification Ascendante hiérarchique (CAH), Analyse en Composantes Principales (ACP), Matrice à Facteurs Positifs (PMF).

1. Introduction

La dégradation de la qualité de l'air que nous respirons et son impact sur la santé et l'environnement sont devenus préoccupants depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. Ces fléaux touchent principalement les grandes agglomérations qui connaissent un trafic routier intense et une importante implantation des unités industrielles et énergétiques. Parmi les polluants atmosphériques produits par ces sources de pollution, il faut distinguer les particules ou poussières en suspension.

Dans cette étude sont mesurées les poussières de diamètre inférieur à 10 micromètres (PM-10) en faisant la distinction entre les fractions fines et grossières. Selon leur taille (granulométrie), les particules pénètrent plus ou moins profondément dans l'arbre pulmonaire. Les particules les plus fines peuvent, à des concentrations relativement basses, irriter les voies respiratoires inférieures et altérer la fonction respiratoire dans son ensemble [1-3]. Certaines particules ont des propriétés mutagènes et cancérigènes [3, 4]. Les effets de salissure des bâtiments et des monuments sont les atteintes à l'environnement les plus perceptibles. Cet article présente les résultats d'une étude de la caractérisation Physico-chimique des particules atmosphériques en suspension ainsi que l'identification des sources de pollution atmosphérique influente le site de prélèvement dans la ville de Meknès au Maroc.

2. Matériels et méthodes

2.1. Sites et campagnes de prélèvements

Les prélèvements ont été effectués, entre mars et octobre 2007, au niveau de l'avenue des FAR au centre ville (Hamriya), près d'un axe routier à trafic automobile très important et non loin du trafic ferroviaire. Et nous avons ainsi installé nos matériels à une hauteur d'environ 4 mètres. Et depuis novembre 2007 jusqu'à avril 2008, pour des raisons logistiques, nous avons changé le site de prélèvements vers un site similaire qu'est l'avenue Allal Ben Abdallah au centre ville aussi. Ce site se trouve aussi au centre ville et il connaît un fort trafic routier avec présence non loin du trafic ferroviaire.

Afin de couvrir tous les jours de la semaine, les prélèvements ont été effectués une fois tous les six jours pour une durée de 24 h.

2.2. Modes opératoires

Les prélèvements ont été faits avec deux types de matériel :

- Un préleveur Gent, constitué de deux filtres en polycarbonate placés en série permettant la collecte sélective des fractions grossières de diamètre aérodynamique compris entre 2,5 et 10 μm et des fractions fines de diamètre aérodynamique inférieur ou égal à 2,5 μm [5-10].

- Un préleveur séquentielle Partisol d'une coupure granulométrique à environ 10 μm ; les membranes filtrantes sont en téflon.

Les filtres Gent ont servi à l'analyse chimique des métaux et les filtres Partisol à des extractions séquentielles et à la détermination de la morphologie et la micro-analyse des particules.

2.3. Méthode d'analyse de la matière particulaire

Les filtres Gent ont subi une attaque par 10 ml de l'acide nitrique (HNO_3) accélérée par chauffage au four micro-onde (Mars 5 CEM). La solution finale a été mélangée avec une solution standard de Se, avant d'être analysée par la Fluorescence de Rayons X en Réflexion Totale (TXRF). Les éléments chimiques déterminés sont : Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Pb, et Zn. L'analyse de l'Al a été accomplie par la Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA) de type SpectrAA 220 de Varian, sur la solution mère après dilution par l'eau distillée. Les concentrations élémentaires seront exprimées en (ng/Nm^3) aux conditions normales de température et de pression.

Certains filtres de Partisol ont subi des procédures d'extractions séquentielles suivies des analyses par Spectromètre d' Emission Atomique à Plasma Couplée par Induction (ICP-AES) de type (Jobin Yvon Ultima C) en vue d'évaluer la mobilité de certains métaux lourds. Il s'agit d'attaques successives sur un même échantillon (un filtre dans le cas présent) par des solutions d'acidité, et donc d'agressivité, croissante. Les différentes attaques peuvent être reliées à la dissolution de différentes phases minérales : F1 : sels (chlorures, sulfates, ...), F2 : carbonates, F3 : oxydes « mous », F4 : sulfures, matière organique, F5 : silicates, oxydes « durs » (type spinelle) [11, 12]. L'impact environnemental et sanitaire potentiel diminue de la fraction F1 (la plus soluble et donc a priori la plus bio-disponible) à la fraction F5, la moins soluble. A chaque étape, l'analyse de la solution, après attaque, permet de déterminer la fraction de chaque métal qui y est lié. Les résultats sont exprimés en (%) de la quantité de métal dans l'analyse totale.

Finalement, la morphologie et la micro-analyse des particules pour certains filtres choisis au hasard est réalisée par la Microscopie Électronique à Balayage couplée à la Spectrométrie à Dispersion d'Énergie (MEB-SDE). Cette technique permet, à la fois, de faire des analyses élémentaires de particules individuelles et des observations morphologiques, ce qui permet par la suite de classer les particules par leur minéralogie supposée et d'en déduire leur origine possible. Le Microscope Électronique à Balayage utilisé est de marque Philips, modèle FEG30S, le type du détecteur est Oxford-Instruments. L'analyse des rayons X se fait par un système à Dispersion d'Énergie (microsonde SDE).

3. Résultats et discussions

3.1. Composition chimique

On représente dans la [figure 1](#) les courbes des évolutions mensuelles, des teneurs en composants chimiques (Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Pb et Zn), pour les fractions fines et grossières de la fraction totale (fractions fines + fractions grossières). On constate en général, une variation saisonnière non significative. Aussi, ce sont l'Al et le Ca qui présentent les concentrations les plus élevées, suivis du Fe et du Pb.

Le [tableau 1](#) montre les rapports élémentaires des fractions (Fine/Totale) pour les quatre saisons. En effet, lorsque le rapport élémentaire des fractions (Fine/Totale) est égale à la valeur 0,5, on dit que nous avons une distribution égale entre les fractions fines et les fractions grossières. Si ce rapport est inférieur à la valeur 0,5, les composants chimiques ont une tendance vers les fractions grossières (cas des éléments terrigènes ou naturelles). Alors que si le rapport dépasse la valeur 0,5, les composants chimiques sont plus importants dans les fractions fines (provenant en particulier de sources anthropiques). Globalement, le Ca et le Fe présentent les faibles rapports élémentaires moyens des fractions (Fine/Totale) (0,29 et 0,32 respectivement). Alors que pour les autres éléments, les rapports élémentaires moyens des fractions (Fine/Totale) sont compris entre 0,41 et 0,65.

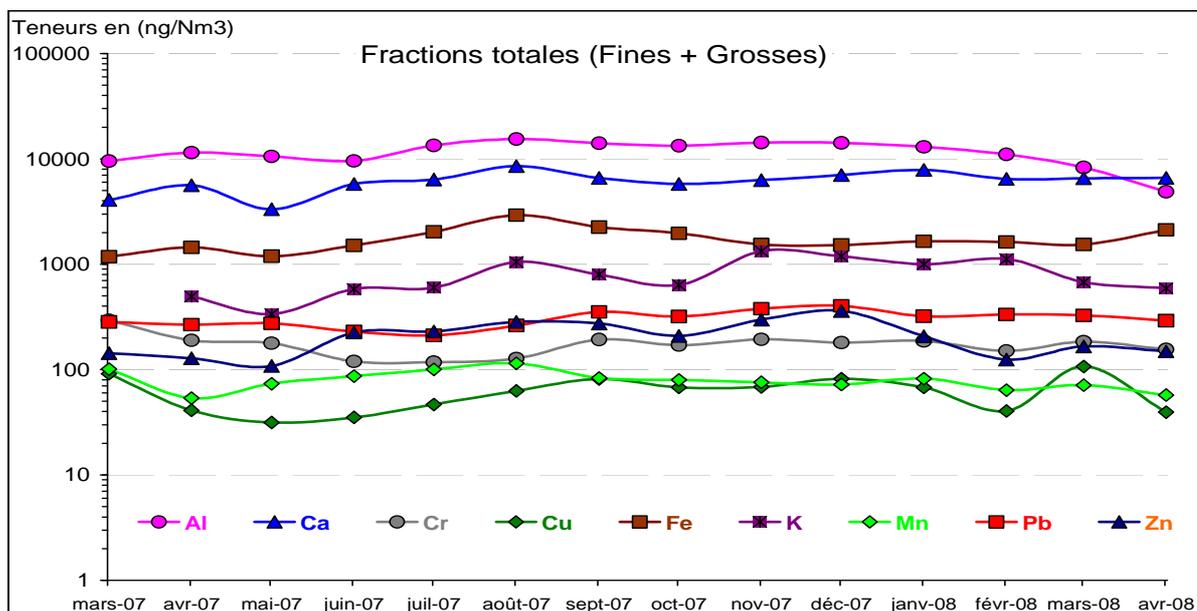


Figure 1 : Profils des évolutions des teneurs en compositions chimiques des fractions (fines + grossières).

Tableau 1 : Rapports élémentaires des fractions (Fine/Totale).

Période	Al	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Pb	Zn
Automne	0,58	0,34	0,47	0,51	0,37	0,41	0,45	0,51	0,55
Hiver	0,61	0,22	0,50	0,51	0,25	0,44	0,41	0,49	0,55
Printemps	0,70	0,23	0,51	0,48	0,32	0,40	0,47	0,50	0,48
Été	0,66	0,35	0,42	0,43	0,35	0,39	0,35	0,50	0,48
Année	0,65	0,29	0,47	0,48	0,32	0,41	0,42	0,50	0,52

Vis-à-vis les normes de qualité, notamment pour le Pb (l'élément réglementé), la valeur limite de la directive européenne et la valeur guide de l'OMS fixées à 500 ng/m³/an [13-18] sont respectées pour le Pb où la concentration moyenne est de 310 ng/Nm³/an. De même la norme marocaine (2000 ng/m³/an) [19] est aussi respectée. Cependant, l'objectif de qualité fixé à 250 ng/m³/an [13-15, 17] est nettement dépassé. Pour les autres composants chimiques mesurés aucune norme n'existe actuellement.

Afin de déterminer l'impact toxique de certains éléments, les extractions séquentielles ont été faites sur quelques filtres Partisol choisis aléatoirement. Cette étude nous a permis d'obtenir la spéciation de 8 éléments (Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Pb et Zn.). Les résultats obtenus des extractions séquentielles sont sensiblement les mêmes pour tous les échantillons (tableau 2).

Tableau 2 : Pourcentages moyens des concentrations élémentaires dans les différentes fractions des extractions séquentielles.

Fractions	K	Ca	Fe	Cu	Cr	Pb	Mn	Zn
Échangeable	64	58	3	2	0	0	0	0
Carbonatée	24	20	12	1	0	0	0	1
Réductible	12	17	19	16	12	13	0	1
Oxydable	1	4	28	15	13	8	7	2
Résiduelle	0	2	38	66	76	79	93	96

- Le Ca et le K sont plus facilement solubilisés puisque 78 à 88 % sont extraits avec les deux premières fractions. Ils sont potentiellement plus mobiles lors des variations physico-chimiques et ainsi susceptibles d'avoir le plus d'impact environnemental. La forte mobilité de ces éléments est due à leurs associations avec des sels ou à la re-suspension du sol [20]. En particulier, pour le Ca sous les formes suivantes : CaSO_4 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ et CaCO_3 [12].

- Le Fe est associé avec les différentes phases, selon l'ordre suivant : résiduelle (avec un taux de recouvrement de l'ordre de 39 %), oxydable (27 %), réductible (20 %), carbonatée (12 %) et échangeable (3 %). Pour cet élément, nous sommes probablement en présence d'un mélange de sources.

- Le Cr, le Cu et le Pb sont plus présents dans les phases résiduelles (plus que 60 %) avec une contribution non négligeable dans les phases réductibles et oxydables.

- Le Zn et le Mn sont majoritairement associés avec les phases résiduelles (plus que 90 %), leurs contributions dans les autres phases sont négligeables à nulle. Ce qui indique que ces deux éléments sont liés à une phase réfractaire (et ayant donc moins d'impact environnemental), tel que les silicates, empêchant leur mise en solution.

Nous pouvons définir en gros quatre groupes de composantes chimiques en fonction de leur répartition dans les différentes fractions :

- Un groupe facilement mobilisable composé de Ca et K ;
- Un groupe de Fe à répartition homogène entre fraction mobile et réfractaire ;
- Un groupe formé de Cr, Cu et Pb peu mobile ;
- Un groupe réfractaire non mobilisable : Mn et Zn ;

La mobilité pour les différents éléments peut être classée de l'élément le moins mobile au plus mobile selon l'ordre suivant : $\text{Zn} < \text{Mn} < \text{Pb} < \text{Cr} < \text{Cu} < \text{Fe} \ll \text{Ca} < \text{K}$.

3.2. Différentes approches pour l'évaluation des sources de pollution

3.2.1. Morphologie et micro-analyse des particules

L'étude présentée plus haut, constitue une approche importante pour la caractérisation de la variation saisonnière des différents polluants ainsi que l'impact toxique de certains éléments. Cependant, elle reste insuffisante pour identifier les sources d'émission principales des différents composants chimiques déterminés.

Ce qui suit permet une meilleure compréhension de la situation générale concernant les problèmes d'identification et de caractérisation des sources principales de pollution influentes le site récepteur qui est le site de prélèvement.

Une identification visuelle au MEB pourrait nous permettre de différencier les particules provenant d'un processus de combustion (sphérique) de celles produites de la re-suspension de sol (forme angulaire non régulière) [20].

Pour cela, 8 filtres (Partisol et Gent) ont été choisis aléatoirement pour des analyses par MEB-SDE (figure 2).

Les photos prises par le MEB montrent que la majorité des particules sont toutes isolées et ont une taille inférieure ou égale à 5 μm . En général, les particules observées se trouvent sous plusieurs formes :

- Sphères de surface rugueuse (cendre volante ou fly ash) ou agrégat irrégulier, essentiellement composées de Fe ; elles peuvent être caractéristiques respectivement d'une combustion locale de combustibles fossiles et d'une re-suspension du sol [20] ;
- Sphérules à surface lisse riches en silicate d'aluminium (argile) et silicate de calcium pouvant constituer des cendres volantes émises par la combustion du charbon [21] ;
- Des formes spongieuses composées surtout de Ca (plus que 80 %) ;
- Des formes sub-rectangulaires de la même proportion de S et Ba (50 %) ou encore de Pb (48 %) et Cr (31 %).

Toutes ces particules contiennent en plus de ces éléments les plus abondants, d'autres éléments notamment, le Cu, le K, le Mg, le Mn, le Ni, le Zn, ...

Nous pouvons supposer donc des sources anthropiques locales, en particulier, les axes routiers (trafic automobile, érosion de structures métalliques (toiture et gouttière), usures des plaquettes des freins...) et des

sources lointaines surtout les industries minérales (cimenteries, poteries, tuilerie, briqueterie...). En effet, les industries de ciment entraînent une augmentation des teneurs en Ca [22], K, Fe, Si et Mg [23]. Pour approfondir cette étude, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) selon la méthode de Ward [24-26] a été réalisée sur l'ensemble des pourcentages atomiques des éléments formant les particules individuelles observées (18 variables et 237 observations). La figure 3 montre le dendrogramme obtenu suite à l'application de cette méthode. Cette figure montre l'existence de deux groupes principaux : le premier groupe contient le Fe et le deuxième groupe englobe les autres éléments du Ca au Zn. Ce deuxième groupe contient beaucoup d'éléments provenant de sources naturelles et anthropiques.

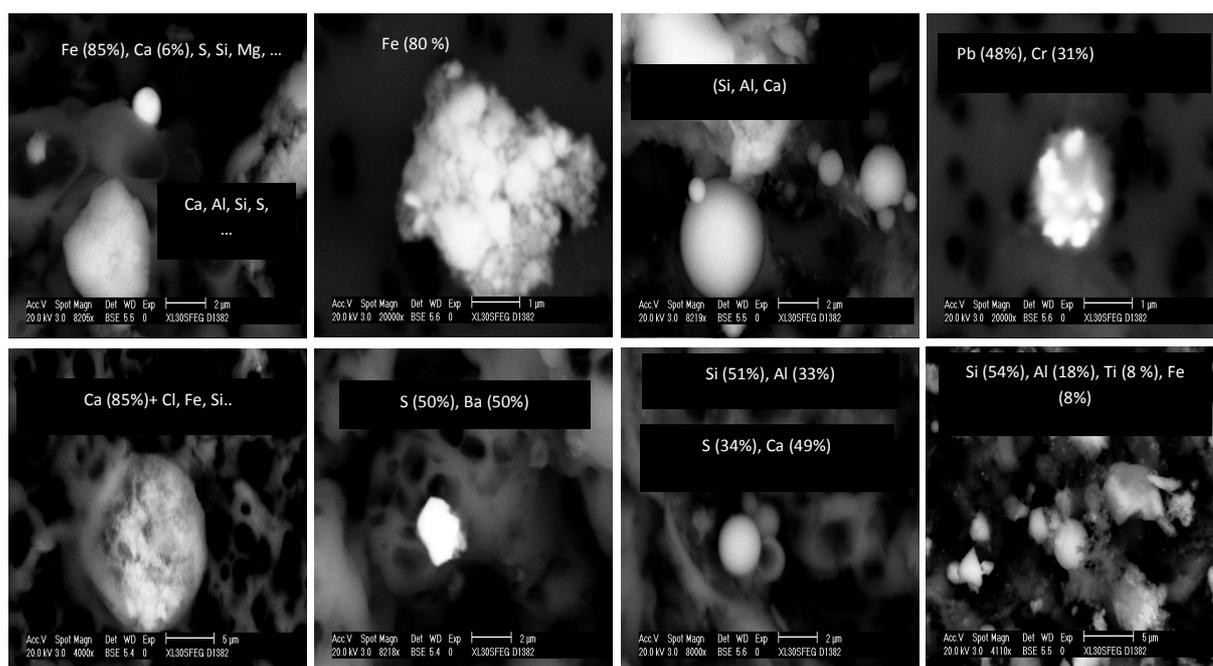


Figure 2 : Morphologies de certaines particules vues par le MEB.

Une analyse plus fine de l'arbre de classification permet de séparer l'ensemble des éléments, caractérisant les particules individuelles, en cinq classes ou groupes :

- Le premier groupe associe l'Al avec le Si. Ces deux éléments peuvent avoir comme origine l'érosion de la croûte terrestre [27] et l'envol des poussières de sol. Ils peuvent également être issus de sources anthropiques, plus particulièrement, la combustion du charbon [28, 29] ou encore l'industrie sidérurgique ou la production de ciment [30] ;
- Le deuxième groupe contient le Ba et le S qui peuvent provenir du trafic automobile ;
- Le troisième groupe est présenté par le Ca. En effet, selon la morphologie des particules contenant cet élément, il peut provenir des industries de production de ciments [22] ;
- Le quatrième groupe associe l'ensemble des éléments (Cl, Cr, Cu, K, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Sn, Ti et Zn). Il s'agit d'un mélange de particules à la fois d'origine naturelle et anthropique provenant de la re-suspension des particules terrigènes contaminées par un mélange de sources anthropiques proches, en particulier le trafic automobile.
- Le cinquième groupe est présenté par le Fe seul. Nous pouvons estimer une source différente de celles déjà citées, du moment que les prélèvements ont été effectués dans une zone proche du trafic ferroviaire.

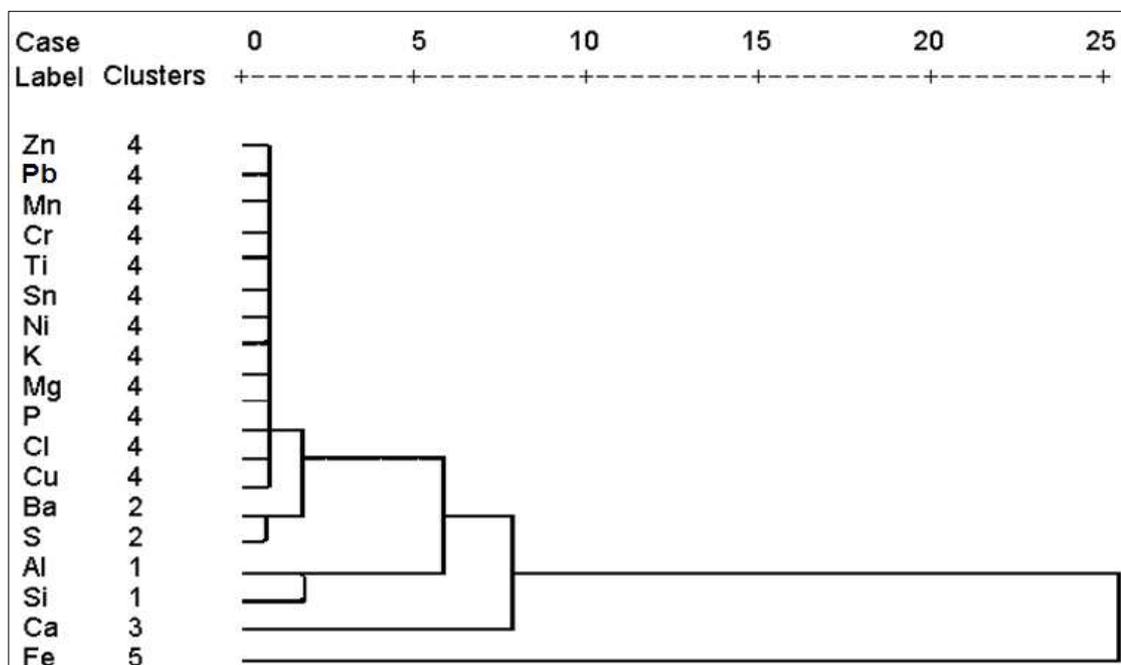


Figure 3 : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) appliquée aux 18 métaux. Méthode de WARD ; carrée de la distance euclidienne.

3.2.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Afin de confirmer les origines naturelle et anthropique supposées par le MEB-EDS et la CAH, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) sera appliquée dans une première approche en vue de déterminer les sources influentes le site de prélèvement. En effet, l'ACP permet l'obtention des corrélations entre les composants chimiques et les sources trouvées au niveau du site récepteur.

Pour l'ensemble des échantillons et des composants chimiques étudiés, l'application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) est validée par le test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) et Bartlett [31] (tableau 3).

Tableau 3 : Tests de validation de l'ACP pour l'ensemble des échantillons analysés.

Tests	Fine	Grosse	
Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)	0,63	0,70	
Bartlett	Chi-2 approximité	143,55	284,92
	Signification de Bartlett	0,00	0,00

Pour la qualité d'extraction des variables [25, 31] (tableau 4), on remarque que l'Al pour les fractions fines et grossières et le Mn dans le cas des fractions fines, présentent de faibles taux d'extractions (< 60 %) d'où la conclusion que les interprétations doivent être faites avec prudence. Les autres variables sont bien présentés et pris en considération par l'ACP.

Tableau 4 : Qualité de la représentation des variables (communalité).

Extraction	Al	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Pb	Zn
Fine	<u>0,51</u>	0,76	0,75	0,62	0,71	0,62	<u>0,57</u>	0,64	0,75
Grosse	<u>0,29</u>	0,80	0,88	0,79	0,79	0,84	0,77	0,90	0,65

Les résultats obtenus, après analyse factorielle suivie d'une rotation optimale selon l'algorithme varimax, sont présentés dans le [tableau 5](#).

Trois composantes possédant des valeurs propres supérieures à 1 et expliquant 65,75 % et 74,48 % de la variance totale ont été retenues respectivement pour les fractions fines et les fractions grossières.

Dans le cas des fractions fines, la première composante montre une bonne corrélation entre le Cr, le Cu et le Pb et une moins significative avec le Mn. Elle explique 25,99 % de la variance de l'ensemble des données. La deuxième composante explique 21,60 % de la variance totale. Cette composante est principalement associée avec le Ca et le Fe et secondairement au K. La dernière composante associe l'Al avec le Zn, elle explique 18,16 % de l'information. Alors que pour les fractions grossières, la première composante présente une corrélation très importante entre le Ca, le Fe, le K, le Mn et le Zn, elle explique 38,42 % de la variance totale. La deuxième composante est fortement corrélée avec le Cr et le Cu, avec 19,75 % de la variance totale. La dernière composante est corrélée avec le Pb seul, elle explique 16,30 % de la variance totale.

Tableau 5 : Matrice des Composantes après rotation pour les fractions fines et grossières.

Variables	Fractions fines			Fractions grossières		
	C1	C2	C3	Ca	Cb	Cd
Al	0,09	0,01	0,71	<u>0,54</u>	0,04	0,03
Ca	-0,23	0,79	0,28	0,73	0,01	0,51
Cr	0,83	-0,22	-0,12	-0,18	0,91	0,13
Cu	0,68	-0,05	0,40	0,43	0,76	0,16
Fe	0,08	0,84	0,00	0,85	-0,12	0,22
K	0,52	<u>0,54</u>	0,23	0,81	0,03	0,42
Mn	<u>0,59</u>	0,44	-0,14	0,68	0,45	-0,33
Pb	0,70	0,14	0,36	0,17	0,22	0,91
Zn	0,08	0,24	0,83	0,74	0,31	0,05
Valeurs propres	2,34	1,94	1,63	3,46	1,78	1,47
% de la variance totale	25,99	21,60	18,16	38,42	19,76	16,30

3.2.3. Factorisation Matricielle Positives (PMF)

L'application de l'ACP, nous a permis de dénombrer et de caractériser les sources de pollution, mais pas de les quantifier. Pour cela, on applique l'approximation du modèle récepteur basée sur la méthode PMF [32-34]. En vue d'identifier et quantifier les profils des sources de pollution. En effet, un profil d'émission est un dénombrement de la participation massique de divers composants chimiques considérés, à l'émission d'une source donnée. Ces profils sont absolument nécessaires pour comprendre et expliquer les teneurs mesurées.

On se basant sur les résultats obtenus par l'ACP, on retient, par PMF, trois sources principales.

Pour chaque source obtenue par PMF, on peut définir un profil caractérisé par une signature (éléments contribuant à plus de 50 % à la source) et par une contre-signature (éléments contribuant à moins de 10 % à la source). On comprend par signature un groupement de métaux caractéristiques de la source [35].

Dans le cas des fractions fines et d'après le [tableau 6](#), on remarque que c'est la source " 2 " qu'est la plus dominante en contenant un pourcentage élémentaire important de la plupart des composants chimiques étudiés. Alors que la source " 1 " est la moins importante.

Tableau 6 : Pourcentages élémentaires des fractions fines pour les trois sources.

Fine	S1	S2	S3
Al	54	37	10
Ca	61	1	38
Cr	10	59	31
Cu	15	63	22
Fe	0	23	77
K	8	46	46
Mn	16	42	42
Pb	24	50	26
Zn	40	60	0

La première source est composée surtout de (61 % du Ca, 54 % de l'Al et 40 % du Zn). Cette source est caractérisée par l'absence du Fe, une présence très faible du K (8 %), Cr (10 %), Cu (15 %), Mn (16 %) en plus d'une participation de 24 % du Pb. En absence des traceurs du trafic automobile, nous pouvons considérer qu'il s'agit d'une source terrigène ou encore d'une source anthropique différente du trafic (combustion). En effet, par MEB-SDE nous avons supposé que le Ca pourrait être lié à la cimenterie.

La deuxième source est caractérisée par (63 % du Cu, 60 % du Zn, 59 % du Cr et 50 % du Pb), en plus de la contribution du K (46 %), Mn (42 %) et Al (37 %). Le Fe ne présente que 23 %, alors que le Ca est presque absent. Nous pouvons penser que cette source pourrait être un mélange de particules à la fois d'origine naturelle et anthropique provenant de la re-suspension des particules terrigènes contaminées par un mélange de sources anthropiques proches, en particulier le trafic automobile. En effet, le Zn peut être émis lors de l'abrasion des pneus, le Cu lors de l'usure des freins [36] et le Pb en plus de ces deux facteurs peut être attribué aux échappements [37].

La troisième source est composée majoritairement de 77 % du Fe, avec une contribution importante du K (46 %), Mn (42 %) et Ca (38 %) en plus de la présence du Cr, Cu et Pb avec des pourcentages variant entre 22 et 31 %, une faible participation de l'Al (10 %) et une contribution nulle du Zn. Nous pouvons donc supposer l'existence d'une source différente du trafic automobile ou encore naturelle. Il peut également s'agir d'une source lointaine suite à l'érosion éolienne du sol ou du trafic ferroviaire comme nous l'avons signalé dans le cas des résultats obtenus par MEB-EDS. La présence du Cr et du Pb peut s'expliquer par la remobilisation des particules du sol déjà contaminées.

D'une façon similaire aux fractions fines, les fractions grossières présentent à priori les mêmes profils des sources avec quelques différences au niveau de certaines proportions ([tableau 7](#)).

La source " a " est composée principalement du Ca qui participe par 76 % et du K (55 %). On enregistre également une participation significative des éléments Cr, Cu, Fe, Mn et Pb (entre 37 et 47 %). Le Zn ne participe que par 25 %, alors que l'Al est totalement absent. Cette source peut-être assimilée à la troisième source obtenue dans le cas des fractions fines.

Pour la source " b " à l'exception du Fe qui présente 53 %, la participation des autres composants chimiques est relativement faible (< 30 %) notamment pour l'Al, Ca, K, Mn et Zn. Les autres éléments, tels que le Cr, le Cu et le Pb ont des participations négligeables à nulles. Nous pouvons donc supposer une source anthropique du Fe (comme c'était le cas pour la CAH), différente du trafic routier et de la cimenterie. En effet, cela peut-être expliquée par les formes sphériques des particules de Fe obtenues par le MEB-SDE. En

plus, on note que les deux sites de prélèvements (Avenue des FAR et avenue Allal Ben Abdallah) sont proches du trafic ferroviaire.

Tableau 7 : Pourcentages élémentaires des fractions grossières pour les trois sources.

Grosse	Sa	Sb	Sc
Al	0	18	82
Ca	76	21	3
Cr	42	0	58
Cu	37	10	53
Fe	44	53	3
K	55	25	20
Mn	37	27	36
Pb	47	8	46
Zn	25	17	57

La source " c " est une source mixte qui présente presque les mêmes composants chimiques et une grande similarité avec la source 2 des fractions fines. Notamment, les traceurs du trafic automobile dépassent 50 %, en particulier le Zn (57 %), le Cr (58 %), le Cu (53 %) et le Pb (46 %). Cependant, nous constatons une participation très importante de l'Al (82 %). Quant au Ca et au Fe, la participation est négligeable.

De plus, vue les pourcentages élémentaires des composants chimiques constituant chaque source, on peut dire que c'est la source " a " qui est la plus dominante, suivie de la source " c ", puis de la source " b ".

Finalement, on remarque, qu'à l'exception du Fe et du Pb obtenues pour les fractions grossières, respectivement par la source " b " dans le cas de la PMF et la composante 3 dans le cas de l'ACP, les deux méthodes d'analyses multi-variables convergent vers les mêmes types de sources. Les quelques différences observées entre l'ACP et la PMF sont dues au fait que l'ACP fournit pour chaque élément chimique sa corrélation à chacune des sources, alors que la PMF permet en plus de quantifier la contribution de chaque élément dans chacune des sources estimées.

Conclusion

La majorité des éléments analysés présente la même distribution pour les fractions fines et les fractions grossières et en général, ne montrent pas une grande variabilité saisonnière. L'étude de la mobilité montre, qu'à l'exception de certains éléments majeurs qui sont fortement mobilisables (Ca et K), les métaux lourds sont généralement peu ou pas mobiles. Concernant l'identification et la caractérisation des principales sources de pollution, une première estimation des sources principales de pollution a été obtenue par le MEB-ESD et la CAH. Quant à l'application du PMF, elle a été validée par une comparaison avec l'ACP. Pour l'ensemble des fractions fines et grossières, les principaux résultats obtenus par les différentes techniques présentent trois grandes sources d'empoussièrement : une source naturelle terrigène, une source urbaine émanant du trafic automobile et de la re-suspension du sol et une source industrielle probablement celle de production de ciment. Nous avons également soupçonné la contribution du trafic ferroviaire dans le cas du Fe. Avec une grande similitude entre les fractions fines et grossières.

Remerciements

Cette étude a été effectuée avec le soutien du programme franco-marocain VOLUBILIS (AI MA/05/129). Les auteurs remercient toutes personnes ayant aidé à la réalisation de ce travail.

Références

1. Chan, L.Y., Kwok, W.S., Lee, S.C. Chan, C.Y., *Atmospheric Environment* 35 (2001) 3167-3176.
2. Falgayrac, G. Physico-chimie des micros particules pour la prévision de la spéciation du plomb, du zinc et du cadmium dans des aérosols de pollution atmosphérique. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, (2006) 173 p.
3. Keeler, G.J., Morishita, M., Young, L.H., *Experimental and Toxicologic Pathology* 57 (2005) 19-29.
4. Cahill, T.A., Morales, R., Miranda, J., *Atmospheric Environment* 30(5) (1996) 747-749.
5. Begum, B.A., Kim, E., Biswas, S.K., Hopke, P.K., *Atmospheric Environment* 38 (2004) 3025-3038.
6. Begum, B.A., Biswas, S.K., Kim, E., Hopke, P.K., Khaliqzaman, M., *Journal of the Air & Waste Management Association* 55 (2005) 227-240.
7. Begum, B.A., Biswas, S.K., Hopke, P.K., Cohen, D.D., *Aerosol and Air Quality Research* 6(4) (2006) 334-359.
8. Hitzenberger, R., Berner, A., Galambos, Z., Maenhaut, W., Cafmeyer, J., Schwarz, J., Müller, K., Spindler, G., Wierprecht, W., Acker, K., Hillamo, R., Mäkelä, T., *Atmospheric Environment* 38 (2004) 6467-6476.
9. Salma, I., Dal Maso, M., Kulmala, M., Záray, G., *Microchemical Journal* 73 (2002) 19-26.
10. Záray, G., Óvári, M., Salma, I., Steffan, I., Zeiner, M., Caroli, S., *Microchemical Journal* 76(90) (2004) 31-34.
11. Tessier A., Campbell P.G.C. Bisson M., *Analytical Chemistry* 51 (1979) 844-851.
12. Sammut M. Spéciation du cadmium, du plomb et du zinc dans les poussières d'émissions atmosphériques d'origine sidérurgiques. Thèse de Doctorat, Université Paul Cézanne Aix Marseille III, (2007) 262 p.
13. Airfobep, Mesure des niveaux moyens de dioxyde de soufre de la région de l'ouest des Bouches-du-Rhône, (2003) 36 p.
14. Airfobep, La qualité de l'air en région Midi-Pyrénées. Rapport annuel 2008 Oramip, (2008) 72 p.
15. JOUE, Directive 2004/107/CE du parlement européen et du conseil du 15 décembre 2004 concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant. Journal Officiel de l'Union Européenne, N° 23 (2005) 3-16.
16. Elichegaray, C., Bouallala, S., Colosio, J., Desqueyroux, H., Galsomies, L., Pernin, H., Poisson, N., Stroebel, R. La qualité de l'air en France - tendances et perspectives. ADEME/Département surveillance de la qualité de l'air, (2003) 16 p.
17. Oramip, La qualité de l'air en Midi-Pyrénées. Rapport annuel, (2008) 72 p.
18. WHO, Guidelines for air quality. Geneva, (2000).
19. MATEE, Pollution atmosphérique au Maroc, situation en 2002. Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement Secrétariat d'État Chargé de l'Environnement. Service de l'Air & Laboratoire National de l'Environnement. Direction de la Surveillance et de la Prévention des Risques, (2003) 45 p.
20. Le Floch, M. Caractérisation physico-chimique et traçage des émissions particulières métalliques d'une usine d'incinération d'ordures ménagères dans l'air ambiant. Exemple de l'UIOM de Toulon (Var, France). Thèse de Doctorat, Université de Droit, d'Économie et des Sciences d'Aix-Marseille, (2004) 325 p.
21. Choël, M. Analyse quantitative des particules atmosphériques par microscopie électronique à balayage couplée à la spectrométrie d'émission X. Thèse de Doctorat, Université de Littoral Côte d'Opale, (2005) 190 p.
22. Zhao, P., Feng, Y., Zhu, T., Jianhui, W., *Atmospheric Environment* 40 (2006) 5807-5814.
23. Bačić, T., Lynch, A.H., Cutler, D., *Environmental and Experimental Botany* 41 (1999) 155-166.
24. Richter, P., Grino, P., Ahumada, I. Giordano, A., *Atmospheric Environment* 41 (2007) 6729-6738.

25. Rimetz-Planchon J. Les aérosols de pollution en zone urbaine et industrielle sous influence marine. Physico-chimie des particules. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et des Technologies de Lille, (2007) 284 p.
26. Tokalioğlu, Ş., Kartal, Ş., *Atmospheric Environment* 40 (2006) 2797-2805.
27. Wedepohl, K.H., *Geochimica and Cosmochimica Acta* 59(7) (1995) 1217-1230.
28. Almeida, S.M., Pio, C.A., Freitas, M.C., Reis, M.A. Trancoso, M.A., *Atmospheric Environment* 39(17) (2005) 3127-3138.
29. Salvador, P., Artíñano, B., Querol, X., Alastuey, A. , Costoya, M., *Atmospheric Environment* 41(1) (2007) 1-17.
30. Raes, F., Dingenen, R.V., Vignati, E., Wilson, J., Putaud, J.P., Seinfeld, J.H. Adams, P., *Atmospheric Environment* 36 (2000) 3071-3087.
31. Tahri, M., Application des techniques d'analyse multiélémentaire pour l'évaluation des teneurs en métaux lourds dans les eaux, les sols et les sédiments de la région de Meknès. Thèse de Doctorat, Université Moulay Ismaïl, Meknès, (2005) 220 p.
32. Paatero, P., Tapper, U., *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 18 (1993) 183-194.
33. Paatero, P., Tapper, U., *Environmetrics* 5 (1994) 111-126.
34. Paatero, P., *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 37 (1997) 15-35.
35. Khlaifi, A., Ionescu, A., Candau, Y., *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 39(4) (2005) 437-453.
36. Weckwerth, G., *Atmospheric Environment* 35 (2001) 5525-5536.
37. Harrison, R.M., Tilling, R., Callen Romero, M.S., Harrad, S., Jarvis, K., *Atmospheric Environment* 37 (2003) 2391-2402.

(2012) ; www.jmaterenvirosci.com