

Pollution atmosphérique particulaire dans la ville de Kenitra (Maroc)

Atmospheric particulate pollution in Kenitra (Morocco)

Mustapha ZGHAID*, Yves NOACK**, Moussa BOUNAKLA***, Fouad BENYAICH****

Résumé

Les villes du Maroc sont soumises à une pollution atmosphérique particulaire élevée due au trafic automobile, à l'industrialisation, mais également à des apports terrigènes importants, liés à l'aridité du climat et à la proximité du désert. Les réseaux de surveillance étant encore peu développés, les données sur ces villes sont rares. Le présent travail est une première étude de la pollution particulaire et métallique dans la ville de Kenitra. Les prélèvements ont été effectués avec un préleveur PM₁₀ de type Partisol, dichotomous (fraction PM_{2,5} et fraction PM_{2,5-10}) et Gent (permettant de séparer une fraction grossière et une fraction fine). Les résultats révèlent, en été, des concentrations en PM₁₀ élevées, de l'ordre de 80 µg/Nm³, supérieures aux normes européennes et aux recommandations de l'OMS et comparables à celles mesurées dans d'autres villes africaines. Le rapport PM_{2,5}/PM₁₀ est faible (inférieur à 0,5), avec une variation saisonnière, montrant l'importance des apports terrigènes et de la remise en suspension. Les concentrations en certains métaux (plomb, nickel) sont également très supérieures aux normes. Les sources sont essentiellement le trafic automobile, en particulier les transports en commun très vétustes, des sources industrielles diffuses ou ponctuelles et les apports terrigènes. Le climat aride favorise les fortes concentrations en particules. Au vu de ces résultats, il apparaît nécessaire de développer les études dans ces villes, tant sur les niveaux de pollution que sur leurs effets sanitaires et environnementaux, ainsi que de mettre en place des réseaux de surveillance, d'améliorer la réglementation et de veiller à son respect.

Mots clés

Maroc. Métaux lourds. Matière particulaire. Pollution urbaine.

Abstract

Towns of Morocco are exposed to a high atmospheric particulate pollution due to automobile traffic, industrialization, but also to soil dusts (in relation with aridity and desert proximity). Monitoring networks and data about air pollution are still rare. The present study is a preliminary work about particulate and heavy metals pollution in the city of Kenitra. Aerosols had been collected with a PM₁₀ sampler (Partisol), a dichotomous sampler (PM_{2,5} and PM_{2,5-10} fractions) and a stacked filter unit (Gent type) with a fine fraction (below 2.5 µm) and a coarse fraction. In summer, the average PM₁₀ concentration is near 80 µg/Nm³, above the EEC rules and WHO recommendations, but similar to some other African towns. The ratio PM_{2,5}/PM₁₀ is low (below 0.5), with a seasonal variation in relation with meteorology. The lead and nickel concentrations are also very low, in relation with the use of leaded gasoline and the oldness of many vehicles. This preliminary work reveals high levels of pollution (especially PM₁₀, Pb and Ni) in the town of Kenitra. The major sources are traffic, soil dusts and resuspension of deposited particles. It is necessary to develop monitoring network and sanitary and environmental impact studies in these cities.

Keywords

Morocco. Heavy metals. Particulate matter. Urban pollution.

* Université Moulay Ismaïl – Faculté des sciences, Département de physique – BP 4010 – Béni M'Hamed – Meknès 50000, – Maroc – E-mail : zgheid_must@yahoo.fr

** CEREGE – Université Aix-Marseille – CNRS, IRD, CdF – BP 80 – 13545 Aix-en-Provence Cedex 4 – France – E-mail : noack@cerege.fr

*** Centre national de l'énergie, des sciences et des techniques nucléaires (CNESTEN) – BP 1382 R.P. – Rabat 10001 – Maroc – E-mail : moussabounakhla@yahoo.fr

**** Université Moulay Ismaïl – Faculté des sciences, Département de physique, et École supérieure de technologie (EST) – BP 4010 – Béni M'Hamed – Meknès 50000 – Maroc – E-mail : benyaich@fs-umi.ac.ma

1. Introduction

À l'instar des pays développés, les pays émergents sont soumis à une pollution atmosphérique importante, aussi bien urbaine qu'industrielle. Le parc automobile y est souvent ancien, l'industrialisation parfois anarchique, la réglementation en matière d'émissions atmosphériques encore balbutiante et les réseaux de surveillance rares. De plus, les pays à climat aride ou semi-aride, en particulier ceux de la rive sud de la Méditerranée, sont exposés à une pollution atmosphérique particulière d'autant plus importante qu'ils présentent des grandes zones sans couverture végétale. Les sols dénudés donnent naissance à des envols de poussières « naturelles », auxquels s'ajoutent les apports sahariens, le tout contribuant fortement à cette pollution particulière. La contribution de ces apports aux dépassements de la norme européenne sur les PM_{10} est maintenant bien montrée [1-8].

Cet article présente les résultats d'une première étude de la pollution atmosphérique particulaire et en métaux lourds sur la ville de Kenitra au Maroc, pour laquelle il n'y a actuellement aucune donnée sur la pollution atmosphérique.

2. Sites, prélèvements et méthodes d'étude

2.1. Le site d'étude

La ville de Kenitra, située à une cinquantaine de kilomètres au nord de Rabat, en bordure de l'océan Atlantique, compte une population d'environ 400 000 habitants. Les vents y sont essentiellement de direction Ouest à Nord-Ouest (venant de la mer). Outre un trafic automobile important (axe routier Rabat-Tanger), la ville présente une industrialisation faite de petites entreprises et une activité portuaire. Les prélèvements ont eu lieu à proximité immédiate de la gare routière (Figure 1). Situé au centre de la ville, ce site se caractérise par une circulation automobile très importante ; c'est le lieu de stationnement de nombreux autocars et des « grands taxis » ; le niveau de vétusté, et donc de pollution, de ces véhicules est nettement

plus élevé que le niveau moyen du parc automobile. Le site est également bordé par la voie ferrée Fès-Meknès-Rabat. Les préleveurs étaient installés dans une cour, séparés des véhicules par un mur d'environ 3 m de haut.

2.2. Les campagnes de prélèvements

Les prélèvements ont été faits avec trois types de matériel :

- un préleveur bas débit (16,7 l/mn) Partisol 2000 (Thermo) équipé d'une tête PM_{10} . Les filtres utilisés étaient des filtres en téflon de porosité $2\ \mu m$ (Zefluor de Pall Gellman). La durée des prélèvements était de 24 heures (de 8 h du matin à 8 h le lendemain). Trois campagnes ont eu lieu, pour un total de 90 filtres : du 6 juin au 5 juillet 2007, du 18 juillet au 16 août 2007 et du 20 août au 18 septembre 2007 ;
- un préleveur dichotomous (Graseby Andersen), permettant de prélever séparément la fraction $PM_{2,5}$ et la fraction $PM_{2,5}-PM_{10}$. Les prélèvements ont eu lieu en même temps que ceux du Partisol, à raison d'une semaine de prélèvement par campagne Partisol ;
- un préleveur de type Gent [9, 10], constitué de deux filtres en polycarbonate placés en série. La porosité des filtres ($8\ \mu m$ pour le premier et $0,4\ \mu m$ pour le second), couplée avec un débit de 17 l/mn environ, permet d'obtenir une fraction fine (plus ou moins équivalente à des $PM_{2,5}$) et une fraction grossière (type TSP). Ce type de préleveur, préconisé par l'AIEA en Afrique, a l'avantage d'être simple d'emploi et très bon marché, mais ne possédant pas de régulation de débit, il ne maintient pas une coupure granulométrique constante. Les prélèvements ont été effectués de juin 2007 à mai 2008, à raison d'un prélèvement tous les six jours.

Parallèlement aux prélèvements de poussières avec le Partisol, ont été faites des mesures de concentration de SO_2 avec un analyseur par fluorescence UV de type AF22M (Environnement SA), à raison de quatre campagnes d'une semaine, entre février et septembre 2007.

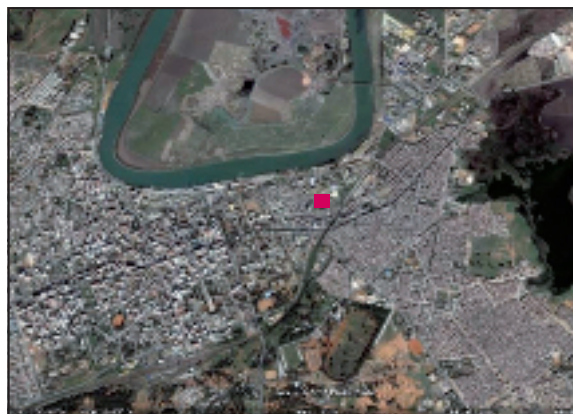


Figure 1a.

Situation du site de prélèvement, vue générale.
Localization of sampling site, general overview.



Figure 1b.

Situation du site de prélèvement, vue rapprochée.
Localization of sampling site, detailed overview.

2.3. Méthodes d'analyse

Les filtres sont pesés avant et après prélèvement sur une balance (Sartorius MP210) à 0,01 mg.

Les filtres ont été minéralisés par une attaque par HNO_3 en four micro-onde. Les solutions ont ensuite été analysées par ICP AES (Jobin Yvon Ultima C) et par absorption atomique à four graphite (Hitachi Z-8200). Les éléments analysés sont : Al, Ca, Fe, K, Na, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb et Zn.

Toutes les concentrations sont exprimées en μg ou ng par Nm^3 (conditions standards : 0 °C et 1 atm).

2.4. Extractions séquentielles

Des extractions séquentielles ont été effectuées sur les fractions $\text{PM}_{2,5}$ et $\text{PM}_{2,5-10}$ de prélèvements effectués avec le dichotomus, en utilisant la méthode mise au point pour les sédiments [11] et optimisée pour les particules atmosphériques [12, 13]. 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 croissantes. Bien que non totalement spécifiques, 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).

L'impact environnemental et sanitaire potentiel diminue de la fraction F1 (la plus soluble et donc *a priori* la plus biodisponible) à la fraction F5, la moins soluble.

À chaque étape, l'analyse de la solution après attaque permet de déterminer la fraction de chaque métal qui y est liée. Les résultats sont exprimés en pourcentage de la quantité de métal dans l'analyse totale.

3. Les résultats

3.1. Concentrations en dioxyde de soufre

Les concentrations moyennes journalières de dioxyde de soufre varient entre 44 et 94 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, avec des valeurs légèrement plus élevées en août et en septembre qu'en juin et en juillet (Figure 2). Toutes les moyennes journalières sont donc nettement en dessous de la valeur limite journalière européenne (125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Par contre, sur l'ensemble de la campagne, la moyenne s'établit à 70 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, valeur supérieure à l'objectif de qualité européen (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle).

3.2. Concentrations en particules

Les concentrations en PM_{10} varient entre 43 et 127 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, avec une croissance de début juin à mi-juillet, une stabilisation de mi-juillet à fin août, puis une décroissance en septembre (Figure 3). La moyenne s'établit à 81 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (Tableau 1), très largement au-dessus de l'objectif de qualité européen (30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Elle est voisine de la valeur limite tunisienne (80 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$) et inférieure à celle en vigueur au Maroc (200 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$).

Sur les 90 valeurs quotidiennes mesurées, seules quatre sont en dessous de la valeur limite européenne de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le nombre maximum de dépassement (35 sur l'année) est donc très largement dépassé.

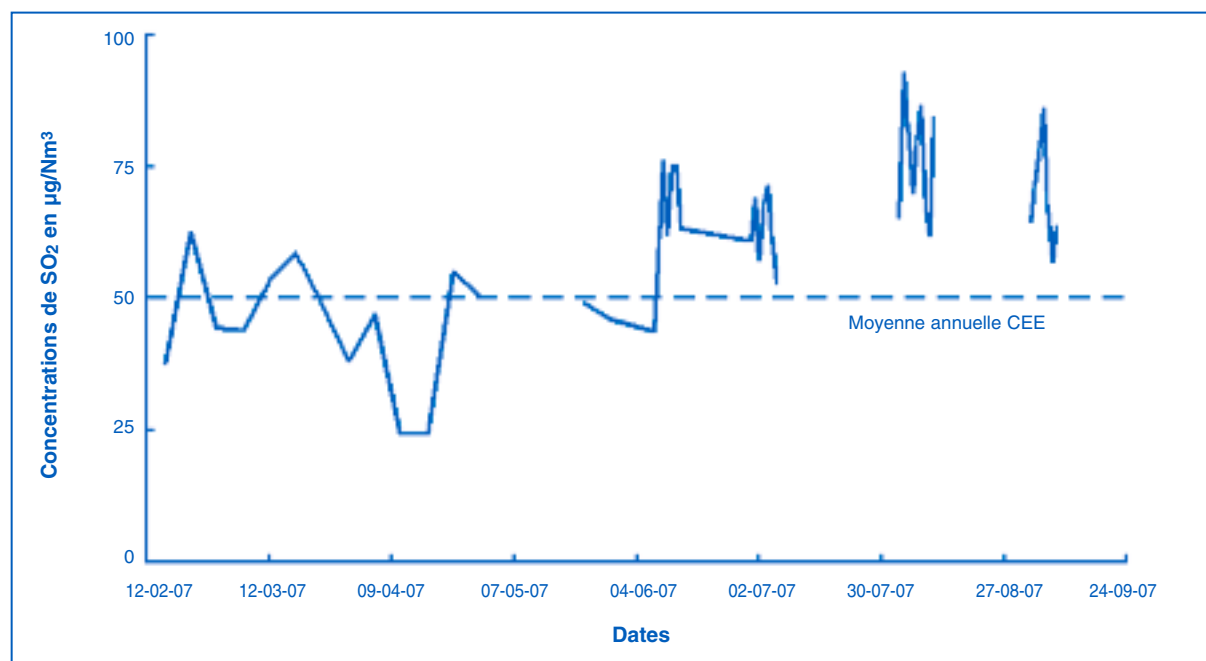


Figure 2.
Concentrations en dioxyde de soufre à Kenitra.
 SO_2 content at Kenitra.

Il n'existe pas de relation entre les concentrations en PM_{10} et celles en dioxyde de soufre.

Les prélèvements faits avec le préleveur dichotomous montrent très clairement que, dans les PM_{10} , la fraction $PM_{2,5}$ est minoritaire (Figure 4 et Tableau 1). Elle varie entre 20 et 37 $\mu g/Nm^3$, le rapport $PM_{2,5}/PM_{10}$ évoluant entre 0,29 et 0,45. La moyenne des $PM_{2,5}$ s'établit à 27 $\mu g/Nm^3$, très proche de la valeur limite européenne (25 $\mu g/Nm^3$).

L'évolution saisonnière a pu être suivie par les prélèvements faits avec les préleveurs Gent (Figure 5 et Tableau 1). Du fait des caractéristiques de ces préleveurs, les concentrations mesurées sont très nettement supérieures à celles mesurées avec le Partisol ou le dichotomous. Sur l'ensemble de la campagne, la moyenne s'établit à 158 $\mu g/Nm^3$ contre 75, mais le rapport fraction fine sur total est similaire au rapport $PM_{2,5}/PM_{10}$ (0,34 contre 0,36). L'évolution de la fraction fine montre un maximum au début de l'été (juin-juillet) et un minimum en octobre. Ce minimum peut être expliqué par la diminution du trafic routier en cette période, mois du Ramadan en 2007. La fraction grossière montre un maximum en été (juillet) et un minimum très marqué (concentration moyenne divisée par deux) en hiver. Ces extrêmes s'expliquent par les conditions météorologiques, le mois de juillet, très sec, étant favorable aux réenvols de poussières déposées sur les sols et l'hiver étant marqué par une très forte pluviosité. Ces évolutions se retrouvent dans le rapport fraction fine sur total qui passe de 0,28 en été à 0,42 en hiver.

3.3. Composition chimique

Sur la période de prélèvement de PM_{10} , 16 filtres ont été analysés (Tableau 2 et Figure 6). Les éléments analysés se répartissent en quatre groupes :

- le cadmium, avec une concentration moyenne de 3,8 ng/Nm^3 ;
- le manganèse avec une concentration moyenne de 43 ng/Nm^3 ;
- le cuivre, le chrome, le nickel, le plomb et l'aluminium, avec des concentrations moyennes entre 200 et 820 ng/Nm^3 ;
- le zinc, le fer, le sodium et le calcium, avec des concentrations moyennes supérieures à 2 000 ng/Nm^3 .

Sur l'ensemble de la période, pour un élément donné, les concentrations varient assez peu, hormis dans le cas de l'aluminium pour lequel la concentration est un peu plus élevée dans les prélèvements du mois de juin par rapport à ceux de juillet à septembre.

En ce qui concerne les métaux réglementés (cadmium, nickel et plomb), les normes européennes et marocaines sont respectées pour le cadmium et le plomb, même si les valeurs moyennes sont assez nettement supérieures (en particulier pour le plomb) à celles que l'on mesure habituellement en site urbain en Europe. Les concentrations en nickel sont par contre très largement au-dessus de la norme européenne (20 ng/Nm^3). Au Maroc, les carburants avec plomb n'ont été totalement supprimés qu'à partir du 1^{er} avril 2009.

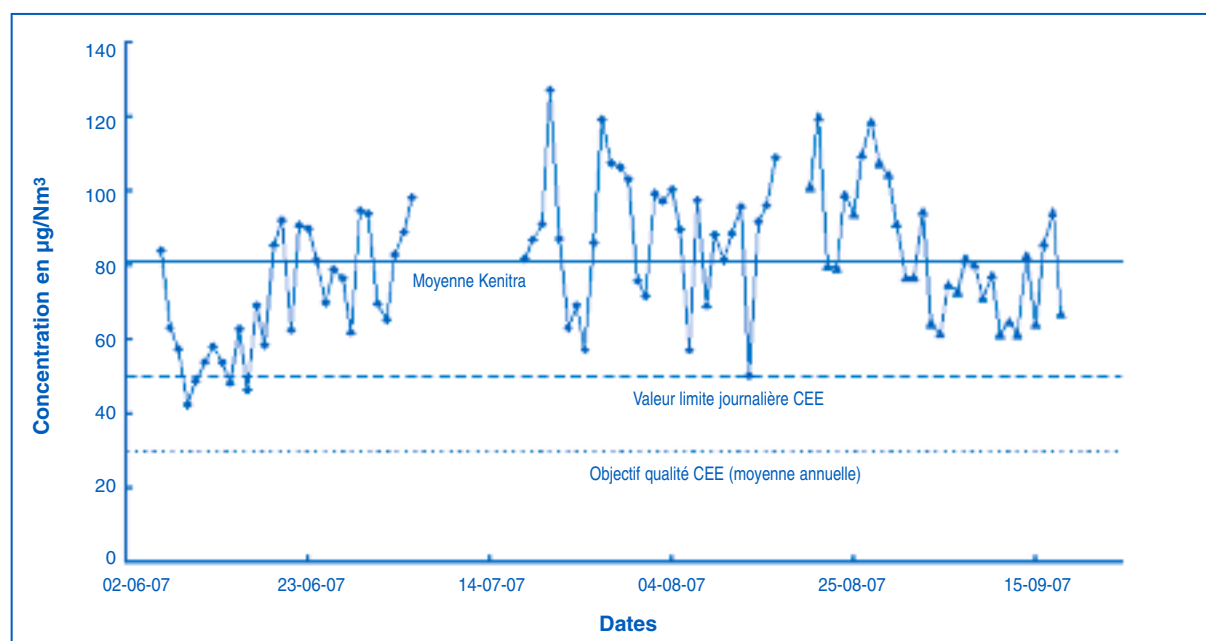


Figure 3.
Concentration PM_{10} à Kenitra.
 PM_{10} content at Kenitra.

Tableau 1.
Concentrations en particules ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$) pour les différents types de prélèvement.
Dust concentrations ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$) for the different sampling systems.

PARTISOL				PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	
	Moy			81,10	
	e.t.			18,66	
	Min			42,51	
	Max			127,34	
DICHOTOMOUS		PM _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	PM _{2,5-10} ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	PM _{2,5} /PM ₁₀
	Moy	48,85	26,86	75,71	0,36
	e.t.	10,62	4,15	13,57	0,04
	Min	33,16	20,16	56,17	0,29
	Max	73,70	37,11	106,66	0,45
GENT		Fine ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	Grosse ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	Total ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	Fine/Total
Total	Moy	105,76	52,09	158,10	0,34
	e.t.	26,00	11,95	28,95	0,08
	Min	68,09	33,06	113,88	0,21
	Max	159,24	74,25	232,19	0,46
Printemps	Moy	101,44	62,58	164,02	0,39
	e.t.	25,88	4,93	24,56	0,06
	Min	72,33	55,36	132,77	0,28
	Max	145,80	70,47	201,63	0,47
Été	Moy	134,57	52,90	187,46	0,28
	e.t.	15,29	14,43	28,82	0,04
	Min	114,59	35,02	153,02	0,22
	Max	159,24	74,25	232,19	0,34
Automne	Moy	111,36	38,43	149,79	0,26
	e.t.	10,53	4,51	8,94	0,04
	Min	85,44	30,35	127,40	0,20
	Max	122,94	48,93	163,35	0,33
Hiver	Moy	75,12	55,25	130,37	0,42
	e.t.	5,41	5,32	7,41	0,03
	Min	67,45	46,43	113,88	0,36
	Max	86,59	61,77	139,41	0,46

Moy = moyenne

e.t. = écart-type

Min = valeur minimale

Max = valeur maximale

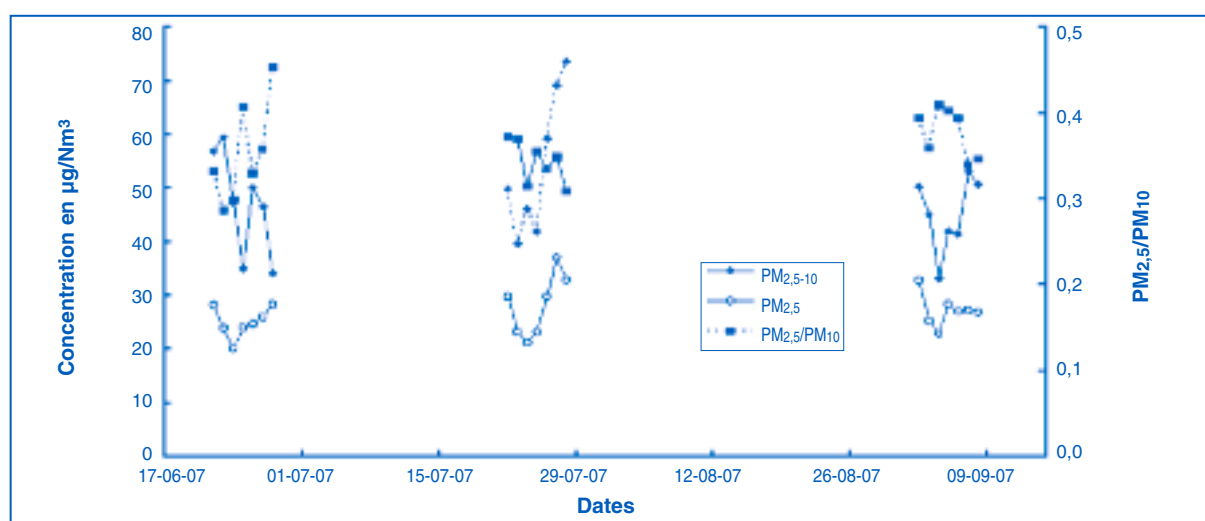


Figure 4.
Concentrations en $PM_{2,5}$ et $PM_{2,5-10}$ à Kenitra.
 $PM_{2,5}$ and $PM_{2,5-10}$ fraction concentrations at Kenitra.

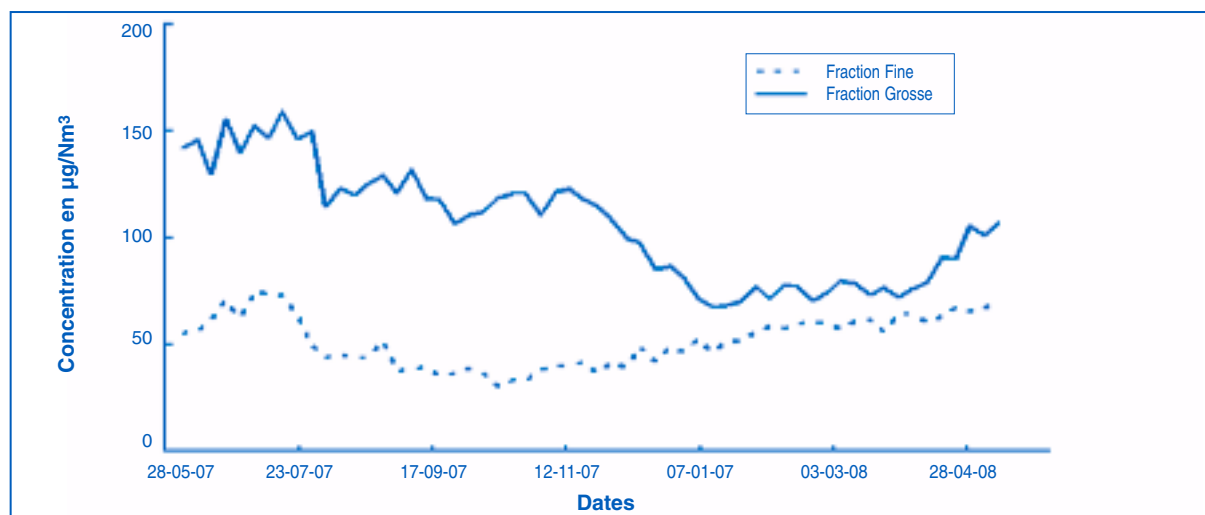


Figure 5.
Évolution des fractions « Grosse » et « Fine » des prélèvements Gent à Kenitra.
Evolution of coarse and fine fractions for Gent samples at Kenitra.

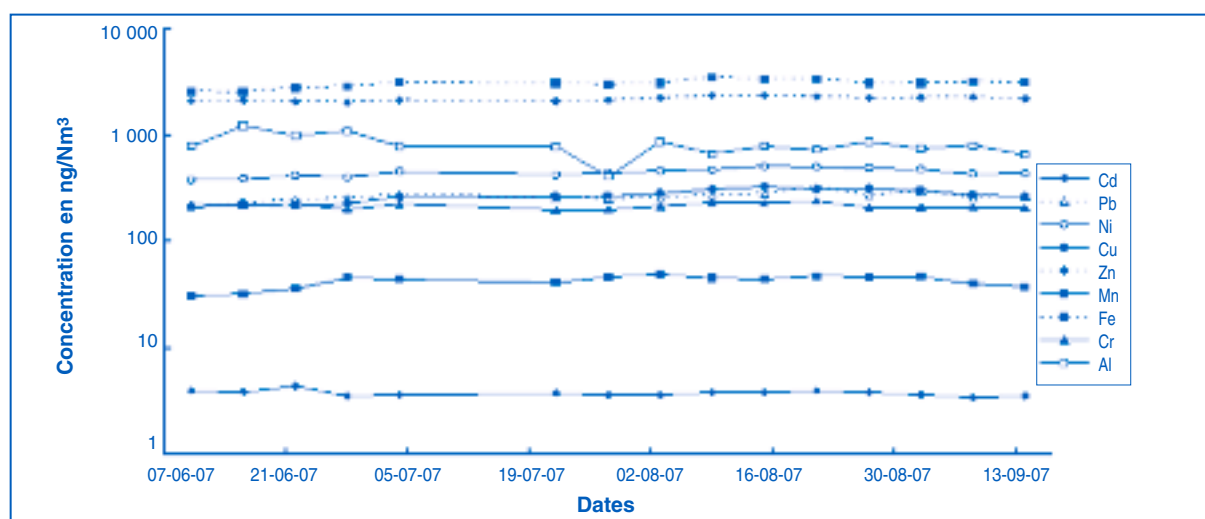


Figure 6.
Évolution des concentrations en métaux des PM_{10} .
Evolution of heavy metals concentrations in PM_{10} fraction.

Tableau 2.
Moyenne des concentrations, fractions massiques et facteurs d'enrichissement pour les PM₁₀.
Average contents, mass fractions and enrichment factors for heavy metals in PM₁₀.

Conc. (ng/Nm ³)	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Fe	Ca	Na	K	Al
Moy	3,77	219	272	43	449	267	2 205	3 079	5 916	2 248	1 272	819
e.t.	0,24	13	38	6	40	25	104	274	359	86	56	193
Min	3,44	199	212	31	385	227	2 036	2 582	5 321	2 102	1 169	413
Max	4,40	244	330	50	512	328	2 365	3 512	6 578	2 404	1 344	1 239
FM (%)	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Fe	Ca	Na	K	Al
Moy	0,005	0,27	0,33	0,05	0,54	0,32	2,71	3,73	7,28	2,76	1,57	1,05
e.t.	0,002	0,09	0,07	0,01	0,13	0,08	0,82	0,88	2,30	0,81	0,52	0,58
Min	0,003	0,18	0,24	0,04	0,41	0,23	1,89	2,60	4,75	1,87	1,04	0,38
Max	0,008	0,48	0,49	0,07	0,85	0,50	4,68	5,61	12,83	4,62	2,86	2,69
EF	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Fe	Ca	Na	K	Al
Moy	3 873	178	1 133	6	830	1 864	3 501	7	16	10	6	
e.t.	1 040	48	374	2	252	551	995	2	5	3	2	
Min	2 488	112	578	3	450	990	2 127	4	10	6	4	
Max	7 000	310	2 067	13	1 526	3 286	6 314	13	30	18	12	

Conc. = concentration – FM (%) = fraction massique – EF = facteur d'enrichissement
Moy = moyenne – e.t. = écart-type – Min = valeur minimale – Max = valeur maximale

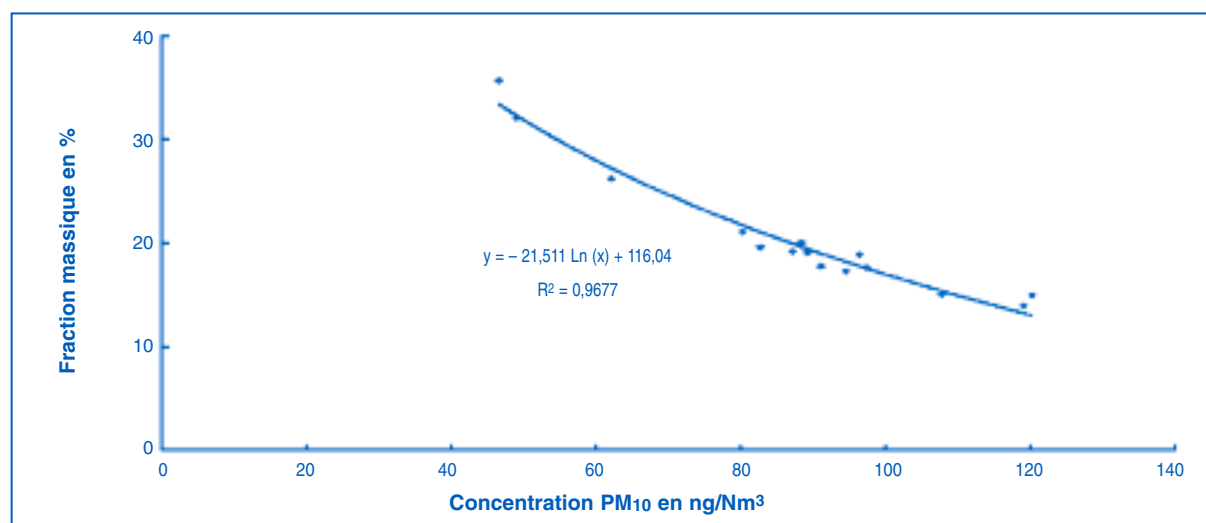


Figure 7.
Relation entre la concentration en PM₁₀ et la fraction massique des métaux.
Relation between PM₁₀ concentration and heavy metals mass fractions.

Les fractions massiques (gramme de métal par gramme de PM₁₀) montrent des valeurs plus importantes au mois de juin que de juillet à septembre. Il y a en fait une corrélation négative entre la somme des fractions massiques des éléments analysés et la concentration en PM₁₀ (Figure 7 et Tableau 2). Parmi les éléments minéraux non analysés, seul le silicium pourrait atteindre une concentration importante et son évolution est sans doute similaire à celle de l'aluminium ; il ne peut donc expliquer cette relation. L'explication peut être que les PM₁₀ sont formées d'un mélange d'une fraction minérale à peu près constante en concentration (la somme des éléments

analysés varie entre 15,7 et 18,2 µg/Nm³, et entre 20,8 et 24 µg/Nm³ si l'on considère les éléments majeurs sous forme d'oxydes) et d'une fraction non analysée (aérosols secondaires, matière organique...) en proportion variable et responsable de l'augmentation de concentration des PM₁₀.

Les facteurs d'enrichissement ont été calculés en utilisant l'aluminium comme élément de référence et la composition moyenne de la croûte continentale [14], en l'absence de données sur les sols de la région. Deux groupes d'éléments se distinguent très nettement (Figure 8 et Tableau 2) :

Tableau 3.
Moyennes des concentrations, fractions massiques et facteurs d'enrichissement
pour les fractions fine et grossière des prélèvements Gent.
*Average contents, mass fractions and enrichment factors for heavy metals
in fine and coarse fractions for Gent samples.*

FINE												
Conc. (ng/Nm ³)	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Fe	Ca	Na	K	Al
Moy	2,16	84	263	23	166	342	1 413	1 936	1 015	600	396	129
e.t.	0,32	13	37	4	42	51	161	237	170	69	37	52
Min	1,80	48	192	16	105	236	1 005	1 508	729	458	328	58
Max	2,87	109	359	35	262	477	1 664	2 569	1 566	757	467	285
FM (%)												
Moy	0,004	0,17	0,53	0,05	0,34	0,69	2,85	3,89	2,04	1,22	0,82	0,27
e.t.	0,001	0,03	0,11	0,01	0,13	0,17	0,60	0,79	0,47	0,32	0,24	0,15
Min	0,003	0,07	0,31	0,03	0,21	0,34	1,73	2,91	1,33	0,70	0,45	0,14
Max	0,008	0,24	0,85	0,06	0,70	1,10	4,20	5,62	3,14	2,01	1,30	0,81
EF												
Moy	14 620	474	7 485	22	1 963	15 739	15 134	31	18	18	13	
e.t.	4 133	175	2 528	8	479	5 267	5 010	8	5	6	4	
Min	7 415	135	2 178	7	1 225	5 080	4 721	11	6	6	5	
Max	30 839	808	13 420	35	4 077	28 478	27 544	51	26	39	27	
GROSSE												
Moy.	1,95	60	156	76	146	217	661	2 114	11 576	2 705	1 462	1 876
e.t.	0,28	11	38	9	18	21	91	231	1 901	225	252	263
Min	1,56	42	97	63	112	179	485	1 745	7 929	2 329	1 075	1 458
Max	2,45	83	234	98	178	267	877	2 534	16 344	3 262	2 214	2 477
FM (%)												
Moy	0,002	0,06	0,16	0,08	0,14	0,22	0,67	2,12	11,48	2,67	1,43	1,84
e.t.	0,000	0,02	0,07	0,02	0,03	0,07	0,22	0,59	3,03	0,56	0,27	0,36
Min	0,001	0,03	0,06	0,04	0,09	0,13	0,34	1,32	7,29	1,76	0,90	1,21
Max	0,002	0,10	0,27	0,12	0,21	0,33	1,06	3,29	17,76	3,90	1,90	2,54
EF												
Moy	828	21	276	5	112	621	438	2	13	5	3	
e.t.	90	5	86	1	13	96	85	0	2	0	0	
Min	651	12	153	3	89	471	282	1	8	4	2	
Max	1 110	32	414	6	154	779	666	3	18	6	4	

FM = fraction massique – EF = facteur d'enrichissement

Moy = moyenne – e.t. = écart-type – Min = valeur minimale – Max = valeur maximale

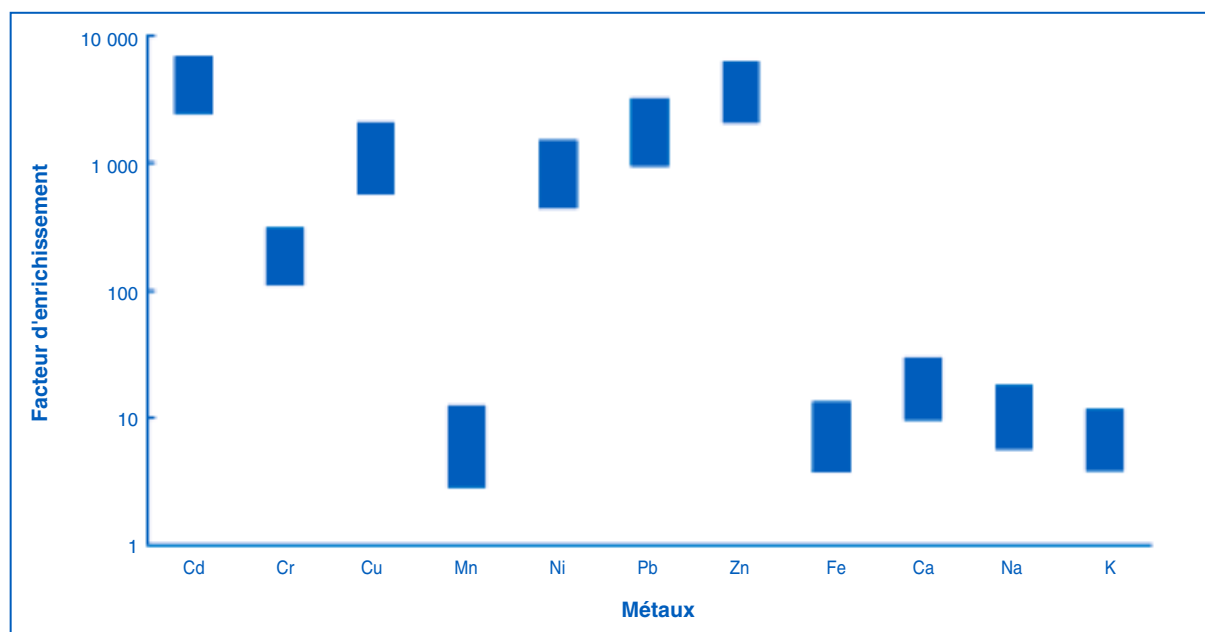


Figure 8.

Facteurs d'enrichissement pour les PM₁₀.
Heavy metals enrichment factors in PM₁₀ fraction.

- les éléments classiquement considérés comme naturels (en l'absence d'industries spécifiques) que sont le fer, le calcium, le sodium et le potassium ainsi que le manganèse. Les valeurs moyennes évoluent entre 6 et 16, avec une valeur maximale de 30 pour le calcium ;
- les éléments très enrichis, considérés comme anthropiques, que sont le cadmium, le cuivre, le nickel, le plomb, le zinc et dans une moindre mesure le chrome.

Les prélèvements faits avec les Gents montrent des concentrations plus importantes en cadmium, cuivre, chrome, nickel, plomb et zinc dans la fraction fine que dans la fraction grossière (Tableau 3). Manganèse, calcium, sodium, potassium et aluminium sont par contre plus concentrés dans la fraction grossière. Les concentrations en fer sont équivalentes dans les deux fractions, mais du fait de la plus faible concentration en particules dans la fraction fine, la fraction massique du fer y est plus importante. Comme pour les PM₁₀, on retrouve une corrélation négative entre la somme des fractions massiques des éléments analysés et les concentrations en particules. Cette somme varie entre 9 et 19 % pour la fraction fine et entre 13 et 30 % pour la fraction grossière. Les facteurs d'enrichissement, calculés de la même façon que pour les PM₁₀, confirment l'anthropisation de la fraction fine, avec des facteurs très élevés pour le cadmium, le cuivre, le nickel, le plomb et le zinc, un peu plus faible pour le chrome (Tableau 3). Pour cette fraction fine, il existe une variation saisonnière des facteurs d'enrichissement avec un minimum en été et des valeurs deux fois plus élevées en hiver pour le cuivre, le chrome, le plomb et le zinc. Cette variation

est due à des concentrations plus élevées en aluminium (et également en fer) en été par rapport à l'automne et l'hiver, marqueurs d'un apport terrigène plus important. Des facteurs inférieurs à 30 dans la fraction fine et à 15 dans la fraction grossière confirment l'origine essentiellement « naturelle » du fer, du calcium, du sodium et du potassium, mais aussi du manganèse, présent dans certains sols de la région de Kenitra.

Les extractions séquentielles ont été faites sur les fraction PM_{2,5} (fraction fine) et PM_{2,5-10} (fraction grossière) de prélèvements faits avec le préleveur dichotomous.

Dans la fraction fine (Figure 9a), pour tous les métaux, la fraction F5, correspondant aux phases minérales les plus réfractaires (et donc ayant le moins d'impact environnemental) est la plus importante, variant de 40 % pour le fer à 95 % pour le zinc. C'est pour le cadmium et le plomb que les fractions les plus disponibles (F1 et F2), susceptibles d'avoir le plus d'impact environnemental, sont les plus importantes (50 % pour le plomb). Hormis pour le plomb et le zinc, la fraction F4, assimilable aux sulfures mais surtout à la matière organique, varie de 10 à 50 %. C'est pour le Manganèse qu'elle est la plus importante, en accord avec les caractéristiques de ce métal.

Pour la fraction grossière, les proportions des fractions F1 et F2 augmentent pour le cadmium, le cuivre, le fer et le manganèse (Figure 9b). Sauf pour le fer et le plomb, la contribution de la fraction résiduelle F5 diminue assez fortement. Pour tous les métaux, la fraction F4, liée à la matière organique, est bien présente.

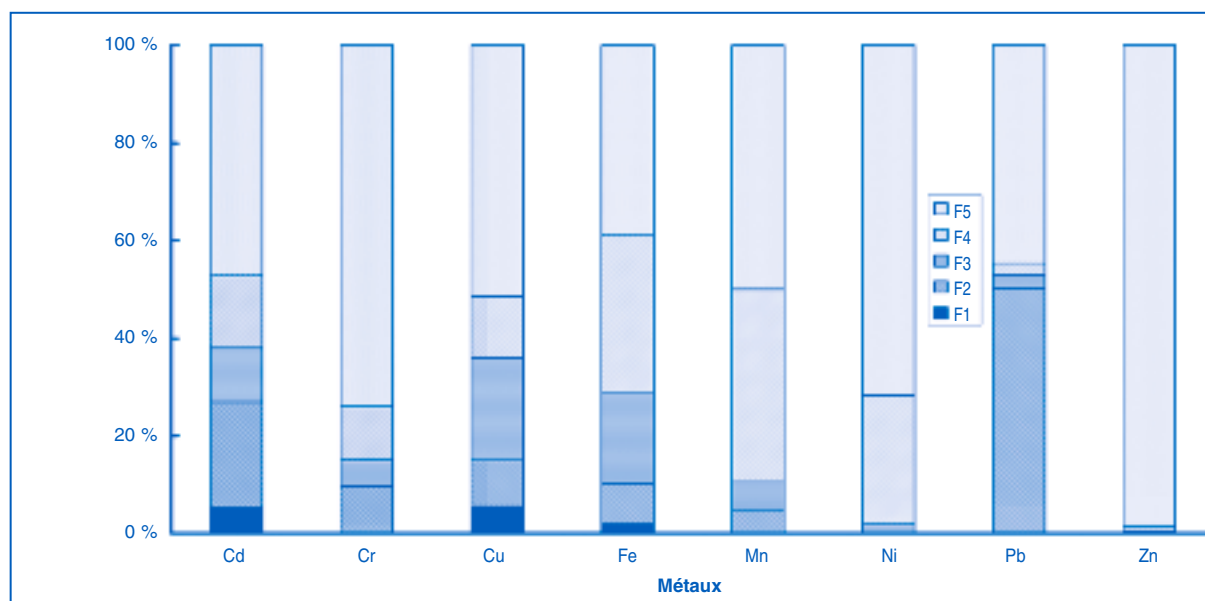


Figure 9a.
Extractions séquentielles, fraction fine.
Results of sequential extractions, fine fraction.

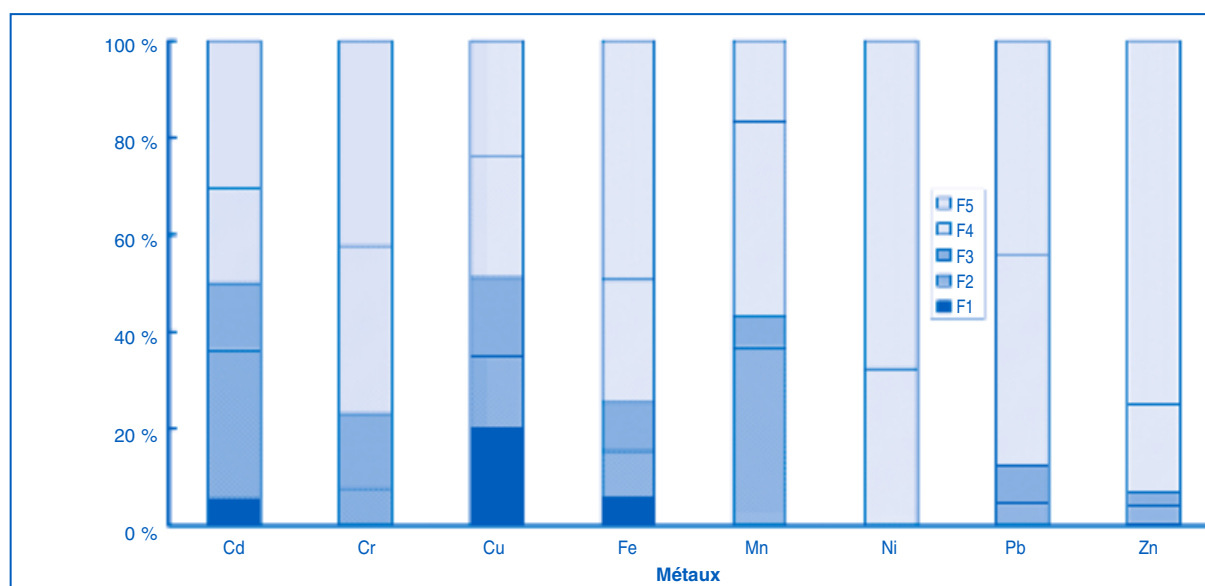


Figure 9b.
Extractions séquentielles, fraction grossière..
Results of sequential extractions, coarse fraction.

4. Comparaison avec d'autres villes africaines

D'une façon générale, il existe très peu de données disponibles sur la pollution particulaire et les métaux en Afrique (Tableau 4).

Au Maroc, malgré l'existence de réseaux de surveillance, aucune donnée de ces réseaux n'est actuellement publique. Dans une étude à vocation sanitaire sur des écoliers à Mohammedia, des concentrations en TSP variant entre 60 et 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour un site industriel et 36 et 74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour un site urbain sont mesurées entre 2000 et 2004, avec une diminution la dernière année [15]. En Tunisie, pour

l'année 2006, les moyennes de concentration en PM_{10} variaient entre 80 et 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les grandes agglomérations [16], soit l'ordre de grandeur de la concentration moyenne à Kenitra.

En Algérie, à Didouche Mourad (près de Constantine) sur un site urbano-industriel, la concentration moyenne en TSP, mesurée en hiver, était de 117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, un peu plus faible qu'à Kenitra sur la même saison (130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) [17]. Par contre, les teneurs en métaux sont très nettement plus faibles (pour le plomb, 46 ng/m^3 contre 220 à Kenitra).

L'étude faite au Caire en 1999 révèle des concentrations tant en PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ qu'en métaux très élevées et largement supérieures à celles mesurées

Tableau 4.
Concentrations en particules et en métaux dans différentes villes d'Afrique.
Particulates matter and heavy metals contents in different Africa towns.

Lieu	Site	Granulo.	Dates	PM	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Fe	Al	Réf.
Kenitra (Maroc)	trafic	PM ₁₀	06/07-09/07	81	4	219	272	43	449	267	2 205	3 079	819	cette étude
		Coarse	06/07-05/08	106	2	60	156	76	146	217	661	2 114	1 876	
		Fine	06/07-05/08	52	2	84	263	23	166	342	1 413	1 936	129	
Didouche Mourad (Algérie)	urbano-industriel	TSP	11/02-04/03	300	1	16	24	50	11	46				[17]
Le Caire (Égypte)	trafic	PM ₁₀	01/99-03/99	220						4 800		4 300	3 000	[18]
		PM _{2,5}		85						1 600		500	100	
Izmir (Turquie)	urbain	PM ₁₀		80	2	26	45	29	16	141	289	921	1 311	[19]
		PM _{2,5}	06/04-05/05	64	1	24	36	16	16	92	177	393	834	
Dar Es Salaam (Tanzanie)	trafic	PM ₁₀	05/05	51		1	6	16	2	58	370	610	410	[20]
	urbain	Coarse	05/?	30			3	21	1	14	19	470		
		Fine	05/?	10			2	2	1	39	24	31		
Adis Abeba (Éthiopie)	urbain	PM ₁₀	01/04-02/04	90						< 100				[21]
Harare (Zimbabwe)	urbano-industriel	TSP	07/02-12/02	106	5				223	160				[22]
		PM ₁₀	07/02-12/02	60	6				166	170				
		PM _{2,5}	07/02-12/02	41	5				180	185				

Particules en µg/m³ et métaux en ng/m³.

à Kenitra [18]. Les carburants plombés ayant été supprimés en Égypte en 1996, la très forte concentration mesurée (4,8 µg/m³) doit être attribuée à d'autres activités (métallurgie, combustion de déchets...) que les transports. Le faible rapport PM_{2,5} sur PM₁₀ (0,39), équivalent à celui de Kenitra, est attribué à un réenvol important des poussières déposées sur les sols.

Bien que non située en Afrique, la ville d'Izmir (Turquie) présente une certaine analogie avec Kenitra en ce qui concerne les concentrations en PM₁₀, plomb (suppression des carburants au plomb en 2003) et aluminium [19]. Par contre, le rapport PM_{2,5} sur PM₁₀ y est nettement plus élevé (0,80 contre 0,36 en moyenne).

À Dar Es Salaam [20], les prélèvements ont été effectués pendant deux semaines durant la saison humide. Les concentrations qui y sont mesurées doivent donc être revues à la hausse dans la perspective d'une moyenne annuelle ; la valeur moyenne en PM₁₀ ne devrait pas alors être très différente de celle obtenue à Kenitra. Le plomb y est considéré comme essentiellement d'origine industrielle.

En Éthiopie [21], où les carburants plombés ont été retirés en 2003, les concentrations en plomb mesurées à Addis Abeba sont faibles (inférieures à 100 ng/m³). La campagne ayant eu lieu pendant la saison sèche, la valeur mesurée pour les PM₁₀ est tout à fait comparable à celle de Kenitra.

Malgré une campagne de prélèvement majoritairement en saison sèche, les concentrations en TSP et PM₁₀ mesurées à Harare (Zimbabwe) sont inférieures à

celles mesurées à Kenitra [22]. Le rapport PM_{2,5} sur PM₁₀ y est également très élevé (0,68). Les concentrations en Plomb (160 à 185 ng/m³ suivant les fractions) se rapprochent de celles de Kenitra.

5. Conclusion

Les campagnes de mesure effectuée sur un site de trafic à côté de la gare routière de la ville de Kenitra (Maroc) indiquent des concentrations en PM₁₀ et en TSP importantes, largement supérieures à celles mesurées sur des sites similaires en Europe. La pollution particulaire y est caractérisée par une forte proportion de particules grossières, signe de réenvols importants et sans doute d'apports terrigènes, et par des concentrations en plomb, nickel et zinc très élevées. La source principale de cette pollution est le trafic de bus et taxis vétustes et probablement également la voie ferrée et de nombreuses activités artisanales. L'introduction au début de l'année 2009 d'un carburant diesel à basse teneur en soufre et la suppression de l'essence plombée devrait apporter une amélioration de la qualité de l'air sur ce site. La ville de Kenitra ne dispose actuellement que d'une station de surveillance installée sur un site de fond. Il apparaît indispensable d'installer un réseau de surveillance complet avec des stations sur des sites de trafic et industriels.

Remerciements

Cette étude a été effectuée avec le soutien du programme franco-marocain VOLUBILIS (AI MA/05/129).

Références

1. Artinano B, Salvador P, Alonso DG, Querol X, Alastuey A. Anthropogenic and natural influence of PM₁₀ and PM_{2.5} aerosol in Madrid (Spain). Analysis of high concentration episodes. *Environ Poll* 2003 ; 125 : 453-65.
2. Borbely-Kiss I, Kiss AZ, Koltay E, Szabo G, Bozo L. Saharan dust episodes in Hungarian aerosol: elemental signatures and transport trajectories. *Aerosol Science* 2004 ; 35 : 1205-24.
3. Escudero M, Querol X, Pey J *et al.* A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks. *Atmos Environ* 2007 ; 41 : 5516-24.
4. Moreno T, Querol X, Alastuey A, Viana M, Gibbons W. Exotic dust incursions into central Spain: implications for legislative controls on atmospheric particulates. *Atmos Environ* 2005 ; 39 : 6109-20.
5. Querol X, Alastuey A, Rodriguez S *et al.* PM₁₀ and PM_{2.5} source apportionment in the Barcelona metropolitan area, Catalonia, Spain. *Atmos Environ* 2001 ; 35 : 6407-19.
6. Rodriguez S, Querol X, Alastuey A *et al.* Saharan dust contributions to PM₁₀ and TSP levels in southern and eastern Spain. *Atmos Environ* 2001 ; 35 : 2433-47.
7. Rodriguez S, Querol X, Alastuey A, Kallos G, Kakaliagou O. Comparative PM₁₀-PM_{2.5} source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain. *Sci. Total Environ* 2004 ; 328 : 95-113.
8. Viana M, Querol X, Alastuey A, Cuevas E, Rodriguez S. Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network. *Atmos Environ* 2002 ; 36 : 5861-75.
9. Maenhaut W, François F, Cafmeyer J. The Gent stacked filter unit (SFU) sampler for the collection of atmospheric aerosols in two size fractions: description and instructions for installation and use. Rapport NAHRES-19. IAEA, Vienne 1993 : 249-63.
10. Hopke PK, Xie Y, Raunemaa T *et al.* Characterization of the Gent stacked filter unit PM₁₀ sampler. *Aero Sci Technol* 1997 ; 27 : 726-35.
11. Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry* 1979 ; 51 : 844-51.
12. Fernandez-Espinoza AJ, Ternero-Rodriguez M, Barragan de la Rosa FJ, Jimenez-Sanchez JC. A chemical speciation of trace metals for fine urban particles. *Atmospheric Environment* 2002 ; 36 : 773-80.
13. Sammut M. Spéciation du cadmium, du plomb et du zinc dans les poussières d'émissions atmosphériques d'origine sidérurgique. Approche de l'impact toxicologique des poussières. Thèse. Université Paul Cézanne, 2007 : 262 p.
14. Wedepohl KH. The composition of the continental crust. *Geochimica Cosmochimica Acta* 1995 ; 59 (7) : 1217-32.
15. Squalli Houssaini AS, Messaouri H, Nasri I, Roth MP, Nejari C, Bencheikroun MN. Air pollution as a determinant of asthma among schoolchildren in Mohammedia, Morocco. *International Journal of Environmental Health Research* 2007 ; 17 (4) : 243-57.
16. RNSQA. Rapport annuel sur la qualité de l'air en Tunisie. 2006 : 53 p.
www.anpe.nat.tn/up_pdf/rapport%20annuel2006.pdf
17. Ali-Khodja H, Belaala A, Demmane-Debbih W, Habbas B, Boumagoura N. Air quality and deposition of trace elements in Didouche Mourad, Algeria. *Environ Monit Assess* 2008 ; 138 : 219-31.
18. Abu-Allaban M, Lowenthal DH, Gertler AW, Labib M. Sources of PM₁₀ and PM_{2.5} in Cairo's ambient air. *Environ Monit Assess* 2007 ; 133 : 417-25.
19. Yatkin S, Bayram A. Determination of major natural and anthropogenic sources profiles for particulate matter and trace elements in Izmir, Turkey. *Atmos Environ* 2008 ; 71 : 685-96.
20. Mkoma SL, Maenhaut W, Chi X, Wang W, Raes N. Characterisation of PM₁₀ atmospheric aerosols for the wet season 2005 at two sites in East Africa. *Atmos Environ* 2009 ; 43 : 631-9.
21. Etyemezian V, Tesfaye M, Yimer A, Chow JC, Mesfin D, Nega T, Nikoloch G, Watson JG, Wondmagegn M. Results from a pilot-scale air quality study in Addis Abeba, Ethiopia. *Atmos Environ* 2005 ; 39 : 7849-60.
22. Kuvarega AT, Taru P. Ambient dust speciation and metal content variation in TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} in urban atmospheric air of Harare (Zimbabwe). *Environ Monit Assess* 2008 ; 144 : 1-14.