

Étude de la variabilité des constituants de l'aérosol dans la ville de Sfax (Tunisie)

Study of aerosol constituents variability in the city of Sfax (Tunisia)

Chafai AZRI, Ahmed MAALEJ, Khaled MEDHIOUB*

Résumé

L'étude chimique des principaux constituants de l'aérosol urbain récolté dans trois secteurs à activités différentes de la ville de Sfax (routière intense, industrielle intense et résidentielle) montre l'influence des sources proches, des conditions météorologiques et de l'orographie. Cette constatation est confirmée par la variation spatio-temporelle de la composition de l'aérosol. L'étude des facteurs d'émission de métaux, d'oxydes d'azote (NO_x) et de soufre (SO_x) des usines représentatives de la ville montre l'importance des aérocontaminants anthropogéniques, notamment du plomb (Pb) et des oxydes de soufre (SO_x). L'atmosphère de la ville est caractérisée par un temps majoritairement très stable et un vent relativement faible. Cette situation, qui accentue l'effet des inversions thermiques journalières, s'oppose à la bonne diffusion des polluants industriels. L'existence de certains obstacles dans la ville tels que le tergil de phosphogypse et les bâtiments accentuent l'accumulation de ces polluants par l'effet de sillage qu'engendre l'enfumage des panaches industriels. Ces obstacles pourraient entraîner une stagnation préférentielle des polluants, provoquant ainsi une différenciation zonale de l'aérosol.

Abstract

The chemical study of the main urban aerosol constituents collected according to three different activities sectors in Sfax (intensive traffic, important industrialization and residential areas) shows the effect of near sources, meteorological conditions and obstacles. This observation is confirmed by a spatio-temporary variation of the aerosol composition. The study of emission factors of metals, nitrogen oxides (NO_x) and sulphur oxides (SO_x) coming from representative factories of the town, shows the importance of anthropogenic contaminants, notably of Pb and SO_x . The Sfax atmosphere was mostly stable and characterized by low wind velocities. This condition, that accents the effect of daily thermal inversions, is not favorable to a good diffusion of industrial pollutants. The presence of some obstacles, such as phosphogypsum deposit and buildings, would be eventually favorable to the accumulation of these pollutants when the industrial plumes fold back the soil. These obstacles could generate a preferential stagnation of pollutants, leading to a zonal differentiation of the aerosol.

Introduction

Les études relatives aux particules en suspension dans l'air ont mis en évidence, dans des zones urbaines côtières, trois principales sources : marine, terrigène et anthropogénique. La source marine est responsable de la mise en suspension dans l'air, par effet de pétilllement, de vésicules liquides riches en solubles. Cette source

s'est montrée riche en chlorure de sodium et en sels de potassium, de magnésium et de calcium [1-3], avec une nette abondance du sodium et du chlore. La source terrigène comporte l'apport des éléments crustaux issus des sols érodés, qui englobe principalement SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , argiles, CaSO_4 et NaCl. Leur présence dans l'atmosphère est fonction de leur forme chimique, de la nature des sols et de la force des vents. La source anthropogénique englobe de son côté des éléments provenant de sources autres que la mer et la terre. Elle comporte principalement les éléments résultant de l'activité socio-économique (industries, trafic routier, incinération des déchets...).

* Unité de Recherche « Étude et Gestion des Environnements Côtiers et Urbains », École Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), BPW 3038 Sfax, Tunisie.

Dans la région de Sfax (Tunisie), la zone urbaine et les activités industrielles se sont développées plus rapidement que la mise en œuvre de techniques de prévention et de traitement de la pollution engendrée. Les premiers constats soulignent en effet une importante dégradation de l'ensemble des ressources naturelles, en relation avec les principales activités industrielles qui longent la côte sur une dizaine de kilomètres [4, 5]. Leurs émanations gazeuses et particulaires, sans traitement préalable, contribuent d'une façon significative à l'enrichissement de l'aérosol dans l'atmosphère de la région.

Le présent travail porte sur l'étude de l'évolution spatio-temporelle des principaux constituants de l'aérosol côtier de la ville de Sfax, afin d'identifier ses différentes composantes marine, terrigène et anthropogénique et leurs taux de contribution respectifs.

Méthodologie

Le prélèvement des particules en suspension dans l'air dans trois sites urbains de la ville de Sfax a été effectué sur une période de six mois (de janvier à juin 1997). Ces sites équidistants de 2 km, alignés selon l'axe NE-SO (Figure 1), ont été choisis comme

observatoires de la qualité de l'air pour couvrir trois zones à activités différentes (le site A : zone à activité routière intense $\approx 2\,000$ véhicules/h, le site C : zone à activité industrielle intense et le site B : zone résidentielle à activités industrielle et routière réduites). L'échantillonnage est effectué par une filtration de l'air à travers des filtres nucléopore de 4,7 cm de diamètre et de 0,45 μm de porosité. Le diamètre de coupure aérodynamique de la tête de prélèvement des aérosols est de 10 μm . L'échantillonnage a été réalisé toutes les 72 heures avec un débit horaire de 180 litres.

Pour l'analyse des particules, on a procédé par un cumul de filtres correspondant à des séquences d'échantillonnage de 15 jours (360 h). Le but essentiel est d'atteindre les limites de détection des appareils d'analyse utilisés (absorption atomique et chromatographie en phase liquide). On a procédé ainsi à la mise en solution des particules collectées. Au préalable, les filtres ont été désolidarisés de leurs supports et placés dans des béchers. On a ajouté à chaque échantillon 20 ml d'eau désionisée. Après trois heures de vibration par un appareil ultrasonique, les solutions de chaque échantillon ont été analysées par absorption atomique (pour les composés Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et K^+), par chromatographie en phase

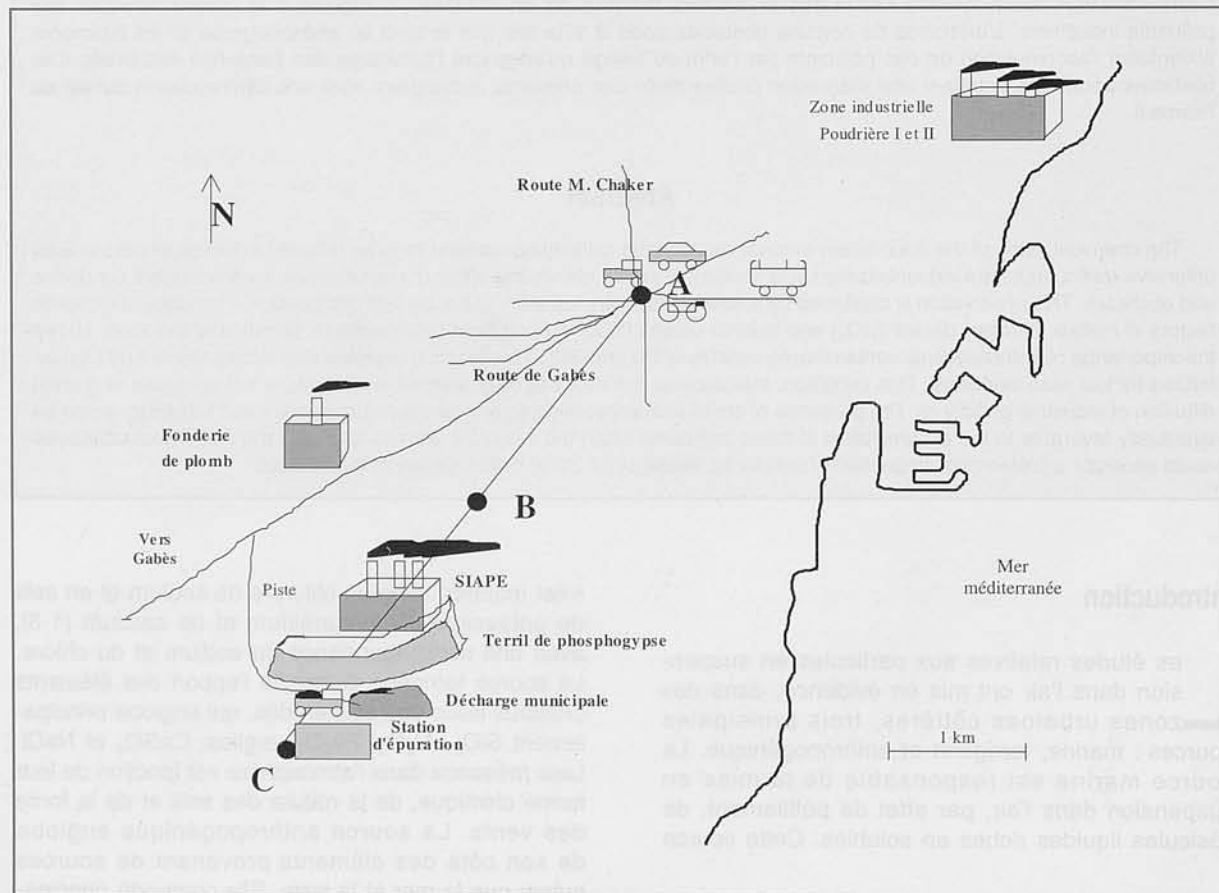


Figure 1.
Carte de localisation des sites de prélèvement des aérosols dans la ville de Sfax.
Map of aerosol sampling sites in the city of Sfax.

liquide (pour les composés Cl^- , PO_4^{3-} , NO_3^- et SO_4^{2-}) et par colorimétrie (pour l'ion NH_4^+). Auparavant, on a déterminé les rendements d'extraction du sodium à l'aide de filtres témoins sur lesquels une quantité connue de sodium a été déposée et qui ont subi le même traitement que les échantillons étudiés. Nous avons ainsi trouvé que le rendement moyen d'extraction est voisin de 98 %. Les concentrations des différents composés ont été calculées à partir de l'équation (1).

$$C(\mu\text{g}/\text{m}^3) = C' \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} / V_{\text{air}} \quad (1)$$

C : Concentration de l'élément chimique dans l'air, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$;

C' : Concentration mesurée, en $\mu\text{g}/\text{ml}$;

$V_{\text{H}_2\text{O}}$: Quantité d'eau désionisée utilisée pour extraire les particules par agitation aux ultrasons, en ml ;

V_{air} : Volume d'air échantillonné, en m^3 .

Les différents filtres lavés, débarrassés de leur fraction soluble, ont subi par la suite une attaque acide pour l'analyse des métaux lourds (Pb, Zn, Cu, Cd et Ni) présents dans la fraction insoluble.

Les sites sélectionnés sont placés, non loin de la zone industrielle qui regroupe diverses activités (Figure 1, p. 122). Parmi celles qui pourraient constituer des sources potentielles d'enrichissement local de l'aérosol urbain sfaxien, citons en particulier la SIAPE (société de traitement chimique des phosphates), la fonderie de plomb, la décharge municipale, et le complexe industriel Poudrière I et II. Leurs caractéristiques sont regroupées dans le tableau 1 ci-dessous.

Résultats et discussion

Caractérisation physico-chimique des aérosols récoltés au niveau des trois sites sélectionnés

Les résultats d'analyse des principaux éléments solubles et des métaux lourds dans les aérosols urbains récoltés dans les trois sites A, B et C (Tableau 2, p. 124 ; Figure 2, p. 125) montrent des écarts très marqués, notamment pour Na^+ , Ca^{++} ,

PO_4^{3-} , SO_4^{2-} et Pb, ce qui traduit un enrichissement différent de l'aérosol dans un espace urbain relativement réduit (sites à faible espacement), imposé par une influence majeure de sources proches qui méritent d'être identifiées. Dans ce sens, deux approches d'étude ont été adoptées. Elles englobent l'étude des facteurs d'enrichissement et le traitement des données par analyse multivariée.

Facteurs d'enrichissement

Par référence au Cl et au Ca, choisis respectivement comme références des sources marine et terrigène, les facteurs d'enrichissement (FE) des différents éléments sont déterminés par les formules (2 et 3)

$$\text{FE/croûte} = (\text{X/Ca})_{\text{aérosol}} / (\text{X/Ca})_{\text{croûte}} \quad (2)$$

$$\text{FE/eau de mer} = (\text{X/Cl})_{\text{aérosol}} / (\text{X/Cl})_{\text{eau de mer}} \quad (3)$$

et se classent en trois catégories :

- peu ou pas enrichis : $\text{FE} < 10$;
- enrichis : $10 < \text{FE} < 1\,000$;
- fortement enrichis : $\text{FE} > 1\,000$.

En l'absence de modèles appropriés aux sols de l'Afrique du Nord, on a eu recours à ceux de Mason [8] et de Brewer [9] pour déterminer les facteurs d'enrichissement des éléments analysés. Les valeurs de ces facteurs sont regroupées dans le tableau 3, p. 125.

À partir de ces données se dégagent les faits suivants :

- Ca^{++} est enrichi par rapport à l'eau de mer, il est typiquement crustal. $\text{Fe}^{(2+3)+}$ est peu enrichi par rapport à la croûte ($\text{FE} < 10$) et fortement enrichi par rapport à l'eau de mer ($10 < \text{FE} < 5 \cdot 10^5$). Il est essentiellement d'origine crustale ;
- Cl^- est typiquement marin suite à son important enrichissement par rapport à la croûte ;
- Na^+ et K^+ sont à la fois peu ou pas enrichis par rapport à la croûte et à l'eau de mer. Ils présentent ainsi des origines mixtes liées à ces deux sources ;

Tableau 1.

Les sources potentielles de pollution dans la ville de Sfax et leurs caractéristiques.

Potential pollution sources in the city of Sfax with their specifications.

Sources potentielles de pollution locale	Caractéristiques
SIAPE	Traitement chimique des engrais phosphatés à partir d'une roche naturelle de composition chimique $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{F}$, Na, Mg, CO_3 , Zn, Cu, Cd, Ni... • émissions de poussières à la source évaluées à 160 kg/h [6]
Fonderie de plomb	Récupération du plomb à partir de vieilles batteries • émissions de poussières à la source = 74 kg/h [7]
Poudrière I et II	Diverses usines utilisant le fuel lourd à 2,75 % de soufre et les grignons d'olive déshuilés comme combustibles • émissions de poussières = 125 kg/h [6]
Décharge municipale	Incinération à l'air libre des déchets urbains

Tableau 2.

Concentration des éléments solubles et des métaux lourds dans les aérosols récoltés au niveau des sites A, B et C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).Concentration of soluble elements and heavy metals in aerosols sampled in sites A, B and C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Période d'échantillonnage de l'année 1997	Site	Cl ⁻	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Fe ⁽²⁺³⁾⁺ *	K ⁺	PO ₄ ³⁻ ($\mu\text{g P}/\text{m}^3$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{g N}/\text{m}^3$)	SO ₄ ⁼ ($\mu\text{g S}/\text{m}^3$)	NH ₄ ⁺ ($\mu\text{g N}/\text{m}^3$)	Pb	Zn	Cu
Ja2 (du 15 au 31 janvier)	A	9,040	5,770	5,820	1,420	0,090	1,300	0,140	0,430	1,730	0,450	0,540	0,120	0,090
	B	7,070	4,640	1,470	0,350	0,020	0,210	0,020	0,300	0,490	0,280	0,140	0,180	0,050
	C	10,800	10,080	1,710	0,680	0,050	0,820	0,180	0,420	2,350	0,510	0,310	0,060	0,020
Fe1 (du 1 ^{er} au 15 février)	A	1,830	1,560	2,090	0,380	0,150	0,530	0,170	0,610	1,990	0,520	0,130	0,050	0,010
	B	0,630	0,830	1,780	0,130	0,040	0,270	0,110	0,410	0,830	0,330	0,060	0,040	0,040
	C	2,080	1,030	5,380	2,160	0,060	3,590	11,430	1,610	11,960	1,630	0,050	0,060	0,020
Fe2 (du 16 au 28 février)	A	4,000	2,500	3,350	0,490	0,100	0,860	0,280	0,850	2,050	0,560	0,070	0,050	0,020
	B	2,000	3,890	1,920	0,260	0,050	0,350	0,240	0,490	1,590	0,380	0,050	0,020	0,020
	C	3,100	3,040	1,320	0,280	0,020	0,660	0,640	0,670	1,160	0,510	0,050	0,010	0,010
Ms1 (du 1 ^{er} au 15 mars)	A	10,170	3,190	4,280	0,100	0,140	1,370	0,350	1,810	4,800	1,240	0,160	0,060	0,040
	B	12,620	3,620	4,240	0,270	0,140	1,060	0,680	1,940	4,090	0,770	0,030	0,050	0,010
	C	5,280	9,160	1,380	0,310	0,080	1,050	0,750	0,760	1,670	0,640	0,050	0,010	0,010
Ms2 (du 16 au 31 mars)	A	2,820	3,450	3,430	0,260	0,030	0,320	0,490	0,700	1,840	0,490	0,080	0,020	0,020
	B	2,030	1,210	1,100	0,230	0,040	0,230	0,160	0,480	1,020	0,310	0,030	0,040	0,010
	C	5,700	5,030	0,610	0,400	0,040	0,780	1,940	0,670	2,150	0,560	0,070	0,010	0,010
Av1 (du 1 ^{er} au 15 avril)	A	13,950	3,820	3,950	0,750	0,140	1,450	0,170	0,750	2,980	0,760	0,170	0,080	0,020
	B	14,500	3,570	2,220	0,760	0,080	1,370	0,210	0,680	2,290	0,530	0,030	0,040	0,010
	C	8,360	7,540	1,030	0,510	0,050	0,770	0,940	0,420	1,370	0,470	0,070	0,010	0,010
Av2 (du 16 au 30 avril)	A	4,540	5,600	12,530	1,470	2,460	3,580	0,840	0,240	1,830	0,480	0,050	0,050	0,020
	B	5,980	4,810	4,380	1,120	0,090	1,150	1,300	0,570	4,480	0,310	0,020	0,010	0,010
	C	2,290	6,260	3,490	1,400	0,070	2,090	5,810	0,930	5,520	0,940	0,070	0,030	0,020
Ma1 (du 1 ^{er} au 15 mai)	A	2,750	3,380	7,680	1,560	0,120	1,660	0,560	1,050	8,700	2,220	0,050	0,010	0,010
	B	2,450	1,020	3,990	1,280	0,020	0,940	1,320	0,910	0,640	1,410	0,020	0,010	0,010
	C	1,200	6,320	0,780	0,950	0,010	0,850	2,060	0,920	2,140	0,830	0,080	0,060	0,040
Ma2 (du 16 au 31 mai)	A	0,960	3,250	6,950	0,640	0,020	0,540	0,190	1,480	1,300	0,340	0,050	0,010	0,010
	B	0,640	3,160	5,020	0,790	0,030	0,180	0,920	1,400	1,040	0,220	0,020	0,010	0,010
	C	1,060	2,910	3,950	0,390	1,070	0,120	0,230	1,150	0,720	1,390	0,060	0,040	0,030
Jn1 (du 1 ^{er} au 15 juin)	A	4,260	3,330	5,340	0,390	0,020	0,460	0,150	0,510	1,540	0,420	0,060	0,030	0,010
	B	2,680	3,300	2,290	0,330	0,010	0,450	0,100	0,510	0,900	0,250	0,020	0,010	0,010
	C	3,970	4,150	0,630	0,600	0,020	0,600	0,370	0,730	1,830	0,480	0,040	0,020	0,020
Jn2 (du 16 au 30 juin)	A	2,860	2,300	0,550	0,320	0,020	0,360	0,290	0,960	1,280	0,320	0,080	0,010	0,010
	B	2,980	2,320	2,980	0,360	0,050	0,280	0,390	0,520	1,510	0,200	0,020	0,010	0,010
	C	2,920	2,340	3,120	0,390	0,050	0,300	2,220	0,760	3,060	0,560	0,040	0,020	0,020
Moyenne	A	5,200	3,470	5,090	0,710	0,300	1,130	0,330	0,850	2,730	0,710	0,130	0,040	0,020
	B	4,870	2,940	2,850	0,540	0,050	0,590	0,490	0,750	1,720	0,450	0,040	0,030	0,020
	C	4,250	5,260	2,130	0,730	0,140	1,060	2,420	0,820	3,080	0,780	0,080	0,030	0,020

NB. Les teneurs en Cd et en Ni sont inférieures à la limite de détection de l'appareil d'analyse adopté.

* Fe⁽²⁺³⁾⁺ signifie le fer soluble total, c'est-à-dire la somme de Fe²⁺ et Fe³⁺.

• SO₄⁼ est enrichi par rapport à la croûte et peu enrichi par rapport à l'eau de mer. Il est donc issu des sources mixtes marine et anthropogénique ;

• PO₄³⁻ est peu enrichi à enrichi par rapport à la croûte et très enrichi par rapport à l'eau de mer. Il provient donc des sources mixtes crustale et anthropogénique ;

• Pb est très enrichi par rapport à la croûte et à l'eau de mer, il provient de la source anthropogénique.

• quant au Zn et au Cu, ils sont peu enrichis par rapport à la croûte et très enrichis par rapport à l'eau de mer. Ils semblent donc provenir de la source crustale.

Traitement statistique des données par analyse en composante principale

Le traitement statistique des données par analyse en composante principale (ACP) met en évidence,

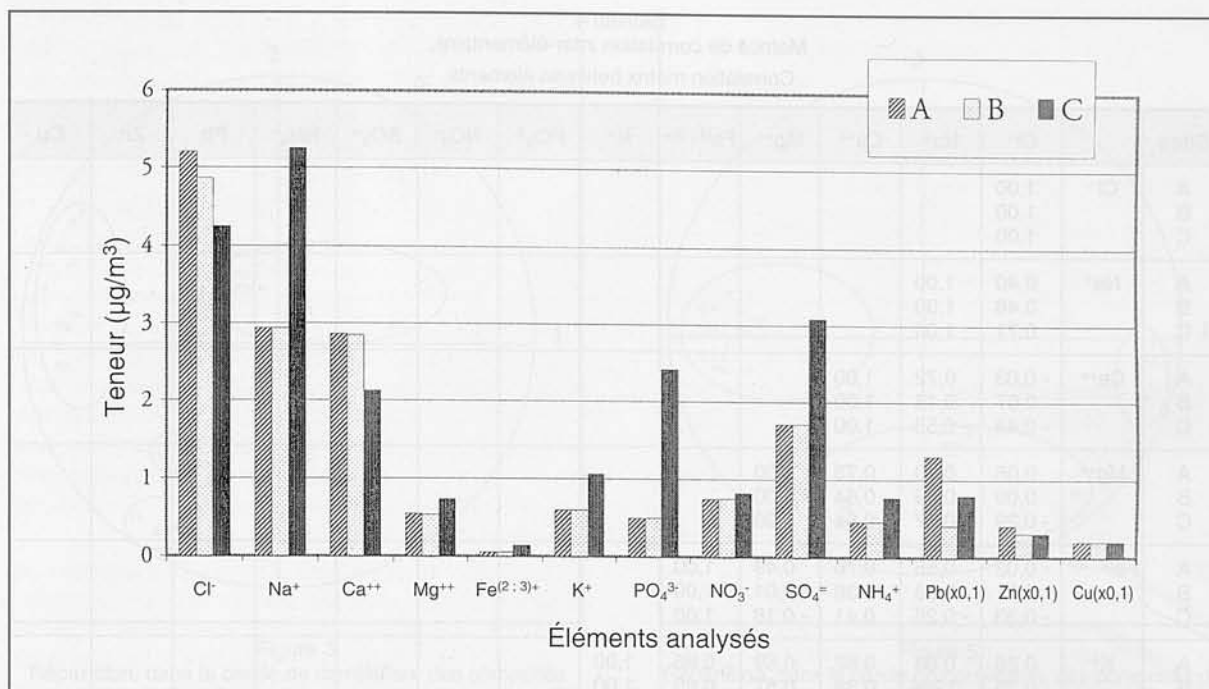


Figure 2.

Distribution des teneurs moyennes des composants des aérosols récoltés au niveau des trois sites sélectionnés A, B et C.
Spread of mean concentrations of aerosol compounds sampled in the three selected sites A, B and C.

Tableau 3.

Facteurs d'enrichissement (FE), normés au chlore et au calcium, des éléments analysés.
Enrichment factors (FE), normed with chlorine and calcium, of analysed elements.

Site	FE	Ca ⁺⁺	Fe ^{(2:3)+}	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	PO ₄ ³⁻	Pb	Zn	Cu
A	FE/Ca ⁺⁺	1	0,04	0,31	0,87	285	75	2,15	71,3	4,4	3
	FE/Cl ⁻	44,67	5.10 ⁵	10,76	1,16	1	11	2.10 ⁴	15,7.10 ⁷	3.10 ⁵	16.10 ⁵
B	FE/Ca ⁺⁺	1	0,01	0,29	1,32	476	84	6	425	5,8	3,5
	FE/Cl ⁻	26,75	9,8.10 ⁴	6	1,05	1	7,32	3,2.10 ⁴	16,7.10 ⁷	3,4.10 ⁴	17,8.10 ⁵
C	FE/Ca ⁺⁺	1	0,05	0,7	3,17	558	202,5	19,32	105	6,83	5,6
	FE/Cl ⁻	22,85	3,1.10 ⁵	12,3	2,16	1	15,10	8,8.10 ⁴	11,8.10 ⁷	2,5.10 ⁴	15,9.10 ⁵

au niveau de chaque site, la répartition des différents éléments en groupes distincts (Tableau 4, p. 126 et Figures 3, 4 et 5, p. 127).

Ce traitement statistique permet ainsi de dégager les ensembles suivants :

- au niveau du site A, un groupe terrigène constitué de (Ca⁺⁺, Na⁺, K⁺, Mg⁺⁺, Fe^{(2:3)+} et PO₄³⁻), un groupe marin associé au (Cl⁻), un groupe anthropogénique renfermant les éléments (Pb, Zn et Cu) et un groupe s'articulant autour des éléments (SO₄⁼, NO₃⁻ et NH₄⁺) qui ne coïncident pas avec les éléments des groupes précités. Il s'agit donc des composés anthropogéniques des aérosols secondaires sulfate et nitrate ;

- au niveau du site B, un premier groupe terrigène constitué de (Ca⁺⁺, NH₄⁺, Mg⁺⁺, NO₃⁻ et PO₄³⁻), un deuxième groupe marin associé au (Cl⁻, Na⁺, K⁺, Fe^{(2:3)+} et SO₄⁼) et un troisième groupe anthropogénique renfermant les éléments (Pb, Zn et Cu) ;

- au niveau du site C, un groupe terrigène formé de (Ca⁺⁺, K⁺, Mg⁺⁺, Fe^{(2:3)+}, NH₄⁺, NO₃⁻ et SO₄⁼), un groupe marin associé aux éléments (Na⁺ et Cl⁻) et un groupe anthropogénique s'articulant autour des éléments (PO₄³⁻, Pb, Zn et Cu).

À partir de ces répartitions, on aperçoit bien la variabilité dans les positions qu'occupent certains constituants tels que le Fe^{(2:3)+}, le PO₄³⁻, les SO₄⁼, les NO₃⁻ et le NH₄⁺. Elle s'explique éventuellement par les faits suivants :

Tableau 4.
Matrice de corrélation inter-élémentaire.
Correlation matrix between elements.

Sites		Cl ⁻	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Fe(2:3) ⁺	K ⁺	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼	NH ₄ ⁺	Pb	Zn	Cu
A	Cl ⁻	1,00												
B		1,00												
C		1,00												
A	Na ⁺	0,40	1,00											
B		0,48	1,00											
C		0,71	1,00											
A	Ca ⁺⁺	-0,03	0,72	1,00										
B		0,07	0,18	1,00										
C		-0,44	-0,53	1,00										
A	Mg ⁺⁺	0,06	0,70	0,73	1,00									
B		0,09	0,09	0,64	1,00									
C		-0,29	-0,27	0,64	1,00									
A	Fe(2:3) ⁺	-0,02	0,55	0,76	0,49	1,00								
B		0,71	0,33	0,36	-0,01	1,00								
C		-0,33	-0,25	0,41	-0,18	1,00								
A	K ⁺	0,28	0,68	0,82	0,69	0,88	1,00							
B		0,75	0,264	0,38	0,57	0,65	1,00							
C		-0,18	-0,21	0,59	0,93	-0,29	1,00							
A	PO ₄ ³⁻	-0,21	0,36	0,64	0,44	0,76	0,72	1,00						
B		-0,04	0,04	0,87	0,84	0,24	0,46	1,00						
C		-0,26	0,24	-0,32	0,14	-0,18	-0,03	1,00						
A	NO ₃ ⁻	-0,11	-0,46	-0,25	-0,36	-0,50	-0,38	-0,22	1,00					
B		0,35	0,07	0,72	0,16	0,60	0,34	0,47	1,00					
C		-0,73	0,64	0,79	0,72	0,34	0,66	0,77	1,00					
A	SO ₄ ⁼	0,12	-0,04	0,20	0,36	-0,10	0,26	0,33	0,33	1,00				
B		0,59	0,51	0,48	0,22	0,90	0,70	0,44	0,44	1,00				
C		-0,26	-0,40	0,73	0,94	-0,22	0,95	0,98	0,74	1,00				
A	NH ₄ ⁺	0,12	-0,04	0,20	0,36	-0,10	0,26	0,33	0,33	0,99	1,00			
B		0,20	-0,33	0,32	0,53	0,13	0,53	0,52	0,39	0,04	1,00			
C		-0,58	-0,50	0,84	0,69	0,53	0,61	0,70	0,94	0,67	1,00			
A	Pb	0,52	0,51	-0,08	0,30	-0,18	0,03	-0,39	-0,28	-0,12	-0,13	1,00		
B		0,09	0,27	-0,53	-0,39	-0,23	-0,35	-0,50	-0,38	-0,31	-0,21	1,00		
C		0,69	0,60	-0,11	0,01	-0,09	-0,06	-0,06	-0,39	-0,08	-0,19	1,00		
A	Zn	0,75	0,50	0,02	0,23	0,06	0,26	-0,30	-0,45	-0,148	-0,15	0,85	1,00	
B		0,35	0,35	-0,44	-0,30	-0,05	-0,16	-0,43	-0,20	-0,167	-0,12	0,93	1,00	
C		-0,16	-0,10	0,45	0,60	0,16	0,36	0,22	0,48	0,455	0,56	0,49	1,00	
A	Cu	0,56	0,66	0,10	0,34	-0,01	0,19	-0,226	-0,282	-0,113	-0,11	0,96	0,85	1,00
B		0,01	0,09	-0,50	-0,43	-0,19	-0,36	-0,478	-0,327	-0,311	-0,17	0,95	0,83	1,00
C		-0,47	-0,17	0,10	0,11	0,40	-0,23	0,532	0,270	-0,116	0,30	0,09	0,67	1,00

• le Fe(2:3)⁺, considéré comme terrigène dans les aérosols A et C, présente une affinité avec les éléments marins dans l'aérosol B malgré son fort enrichissement par rapport à l'eau de mer (FE/Cl⁻ = 9,8.10⁴). Cela explique éventuellement, par sa bonne corrélation positive avec les SO₄⁼ (r = 0,90), le rôle qu'il occupe comme catalyseur dans les réactions d'oxydation de SO₂ ;

• le PO₄³⁻ est associé au groupe terrigène de l'aérosol C, malgré son fort enrichissement par rapport à la croûte (FE/Ca⁺⁺ = 39,25). Cela explique la contribution non négligeable de l'usine SIAPE située à proxi-

mité du site C (1 km), qui traite les phosphates pour la fabrication de l'acide phosphorique et du triple superphosphate ;

• les SO₄⁼, les NO₃⁻ et le NH₄⁺ occupent des positions très variables dans les trois répartitions précitées. En effet, s'ils sont nettement indépendants des familles terrigène, marine et anthropogénique dans l'aérosol A, on voit, en revanche, leur dépendance à ces familles dans les aérosols B et C. Au niveau de l'aérosol B, les SO₄⁼ caractérisés par leur faible enrichissement par rapport à l'eau de mer (FE/Cl⁻ = 7,32) occupent une position purement marine,

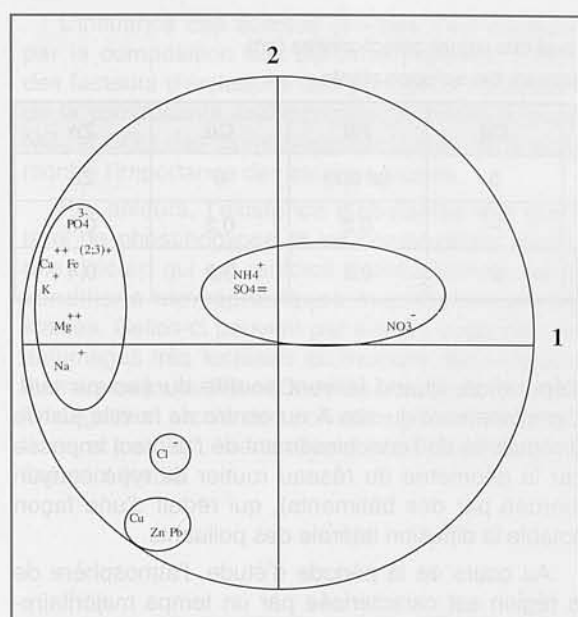


Figure 3.

Répartition, dans le cercle de corrélation, des composés de l'aérosol récolté au niveau du site A.

Spread, in the correlation circle, of compounds of the aerosol sampled in site A.

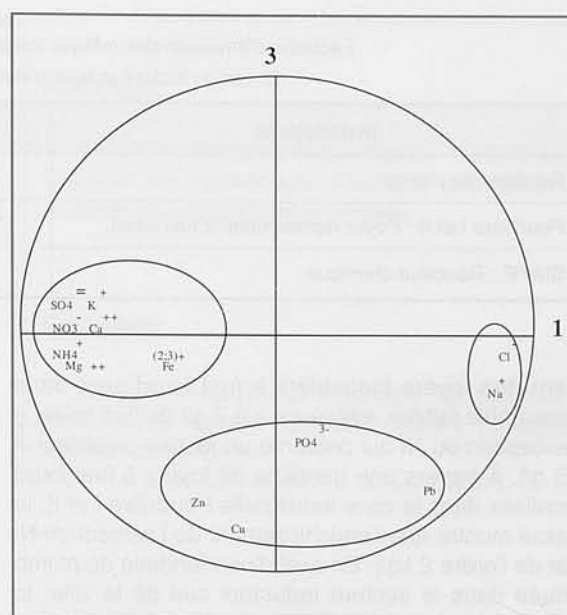


Figure 5.

Répartition, dans le cercle de corrélation, des composés de l'aérosol récolté au niveau du site C.

Spread, in the correlation circle, of compounds of the aerosol sampled in site C.

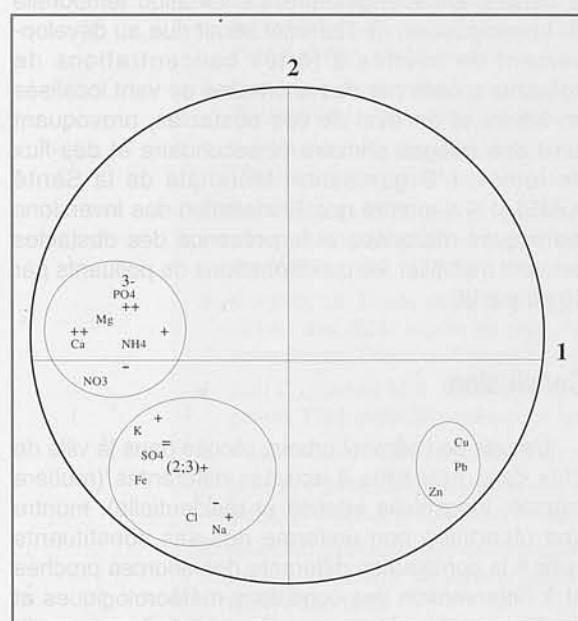


Figure 4.

Répartition, dans le cercle de corrélation, des composés de l'aérosol récolté au niveau du site B.

Spread, in the correlation circle, of compounds of the aerosol sampled in site B.

alors que dans l'aérosol C, malgré leur fort enrichissement par rapport à l'eau de mer et à la croûte ($FE/Cl^- = 15,1$ et $FE/Ca^{++} = 202,5$), ils occupent une position purement terrigène. Il s'agit probablement d'une adsorption du SO_2 sur des particules terrigènes et/ou d'un simple enrichissement par des

retombées particulières riches en sulfates issues de la SIAPE. En ce qui concerne NO_3^- et NH_4^+ , leur association à la famille terrigène dans les aérosols B et C résume éventuellement une adsorption locale du HNO_3 et du NH_3 sur des particules terrigènes et/ou une origine crustale naturelle. À proximité des sites B et C, l'existence de certaines sources anthropogéniques émettrices de ces types de polluants [Société des engrais phosphatés (SIAPE), décharge municipale et bassins de lagunage de la station d'épuration des eaux usées] pourrait favoriser l'enrichissement anthropogénique en NO_3^- et en NH_4^+ . Les travaux d'Allani [10] ont mis en évidence, dans la lagune aérée de la station d'épuration, un relargage des boues vers la surface, engendré par des processus anaérobies dans les sédiments confinés du fond, qui dégagent certains gaz parmi lesquels on peut citer le NH_3 , le N_2 , le CO_2 et le CH_4 .

Par ailleurs, l'étude des facteurs d'émission de Ni, Cd, Pb, Cu et Zn de certaines usines représentatives de la ville confirme leur contribution non négligeable à l'enrichissement de l'aérosol urbain sfaxien en métaux lourds. En effet, nous constatons d'après les données regroupées dans le tableau 5, p. 128, que les facteurs d'émission de Zn émis par le réacteur chimique de la SIAPE dépassent 9 g/t de phosphate traité, ce qui engendre journalièrement un apport atmosphérique voisin de 8 kg ; les facteurs d'émission de Ni, Cd et Cu viennent en second lieu avec des valeurs variant entre 2 et 3,2 g/t (soit un apport compris entre 1,8 et 3 kg/j), alors que le facteur d'émission de Pb est relativement faible, de l'ordre 0,3 g/t ($\approx 0,3$ kg/j). Les facteurs d'émission de métaux éma-

Tableau 5.
Facteurs d'émission des métaux toxiques en aval des usines sélectionnées (g/t).
Emission factors of toxic metals downstream the selected plants.

Installations	Ni	Cd	Pb	Cu	Zn
Fonderie de plomb	2,3	5	68 000	6	25
Poudrière I et II : Foyer représentatif à fuel lourd	15,6	—	0,2	0,2	0,6
SIAPE : Réacteur chimique	3,1	2	0,3	3,2	9,4

nant des foyers industriels à fuel lourd sont dans l'ensemble faibles, inférieurs à 0,7 g/t de fuel brûlé, à l'exception du Ni qui présente un facteur supérieur à 15 g/t. À travers une trentaine de foyers à fuel lourd localisés dans la zone industrielle Poudrière I et II, le calcul montre que l'enrichissement de l'aérosol en Ni est de l'ordre 2 kg/j. En aval d'une fonderie de plomb située dans le secteur industriel sud de la ville, le facteur d'émission de Pb est de 68 kg/t de matière première. Il mène, en l'absence de système de traitement, à un enrichissement journalier de l'aérosol à raison de 200 kg.

Le calcul des flux d'émission d'oxydes de soufre (SO_x) des installations précitées montre que le réacteur chimique de la SIAPE émet en moyenne 4,5 t/j de SO_x (équivalent SO_2), valeur équivalente à un facteur d'émission de 25 kg de SO_x /t de phosphates traités. Les flux d'émission d'oxydes d'azote (NO_x) sont relativement faibles. La valeur la plus importante est de 0,7 t/j de NO_x (équivalent NO_2). Elle est engendrée par des foyers à grignons d'olives, qui émettent l'équivalent de 14 kg de NO_x par tonne de grignon brûlé.

Ces diverses données montrent ainsi l'importance de la composante anthropogénique locale, notamment des oxydes de soufre, qui peuvent enrichir l'aérosol sfaxien en sulfate à partir des processus de conversion gaz/particules.

À l'échelle de la ville, la variabilité spatiale des composés de l'aérosol étudié dans les sites A, B et C pourrait être attribuée non seulement à l'effet des sources avoisinantes mais aussi à l'orographie. Ainsi, à proximité de la SIAPE, principale source locale émettrice de SO_4^{2-} et de PO_4^{3-} , la présence d'un terroir de phosphogypse en amont du site C, étalé sur plusieurs hectares et ayant une hauteur de 20 m environ pourrait accentuer l'accumulation des polluants, à cet endroit, notamment par l'effet d'enfouissement qu'engendrent les inversions thermiques journalières. Cela se confirme par des écarts importants entre les concentrations de SO_4^{2-} et de PO_4^{3-} au niveau des sites B et C, situés à des distances égales par rapport à la SIAPE et exposés aux émissions de celle-ci, par des fréquences similaires des vents NE et SO (voisines de 7 % des observations). Cet obstacle pourrait également jouer le rôle d'accumulateur des émissions riches en NO_3^- et en NH_4^+ des sources de surface localisées dans le secteur sud de la ville, telles que la décharge municipale et la station

d'épuration, quand le vent souffle du secteur sud. L'emplacement du site A au centre de la ville justifie l'irrégularité de l'enrichissement de l'aérosol imposée par la géométrie du réseau routier de type canyon (bordée par des bâtiments), qui réduit d'une façon notable la diffusion latérale des polluants.

Au cours de la période d'étude, l'atmosphère de la région est caractérisée par un temps majoritairement très stable (la pression a varié entre 1 014 et 1 032 hPa), le vent a soufflé dans toutes les directions avec des vitesses relativement faibles, comprises entre 2 et 4 m/s. Ces conditions ne permettent pas la bonne diffusion des polluants. Les obstacles précités auraient également renforcé leur stagnation, ce qui explique en partie la composition et l'importance de la fraction anthropogénique. La variation temporelle de la composition de l'aérosol serait due au développement de cavités à fortes concentrations de polluants créées par des anomalies de vent localisés en amont et en aval de ces obstacles, provoquant ainsi des sillages primaire et secondaire et des flux de retour. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) [11] a montré que l'installation des inversions thermiques marquées et la présence des obstacles peuvent multiplier les concentrations de polluants par 10 ou par 20.

Conclusion

L'étude de l'aérosol urbain, récolté dans la ville de Sfax dans trois sites à activités différentes (routière intense, industrielle intense et résidentielle), montre une répartition non uniforme des ses constituants suite à la contribution différente des sources proches et à l'intervention des conditions météorologiques et de l'orographie. Les approches statistiques appliquées, basées essentiellement sur l'étude des facteurs d'enrichissement et l'analyse en composante principale, prouvent l'existence de trois sources principales :

- une source à dominance terrigène renfermant les éléments Ca^{++} , K^+ , Mg^{++} et à un moindre degré le $\text{Fe}^{(2+3)+}$ et le PO_4^{3-} ;
- une source à dominance marine regroupant le Cl et à un moindre degré le Na^+ et les SO_4^{2-} ;
- une source anthropogénique renfermant des composés sulfatés et azotés (SO_4^{2-} , NO_3^- et NH_4^+) et des métaux (Pb, Zn et Cu).

L'influence des sources proches s'est confirmée par la composition des aérosols prélevés. L'étude des facteurs d'émissions des principaux constituants de la composante anthropogénique (métaux lourds, NO_x et SO_x) des usines représentatives de la ville a montré l'importance des sources locales.

Par ailleurs, l'existence d'obstacles tels que le terroir de phosphogypse et les constructions joue un rôle d'écran qui est renforcé éventuellement par les conditions atmosphériques majoritairement très stables. Celles-ci peuvent par ailleurs engendrer des enfumages très localisés au moment des inversions thermiques journalières. De telles conditions renforcent la stagnation locale des polluants gazeux et particulaires et justifient éventuellement la différenciation de l'aérosol étudié.

Mots clés

Aérosols. Sources industrielles. Obstacles. Stabilité atmosphérique. Facteurs d'émission. Analyse en composante principale.

Keywords

Aerosol. Industrial sources. Obstacles. Atmospheric stability. Emission factors. Principal component analysis.

Références

1. Barlet A. Caractérisation des masses d'air à l'aide de quelques éléments constitutifs des aérosols atmosphériques dosés par spectrométrie d'absorption atomique. Application à l'agronomie. Thèse de Doctorat Ing, Université d'Abidjan 1974.
 2. Crozat G. L'aérosol atmosphérique en milieu naturel. Étude des différentes sources de potassium en Afrique de l'Ouest (CI). Thèse de Doctorat ès Sciences n° 844, Université Paul Sabatier, Toulouse 1974.
 3. Domergue JL. Contribution à l'étude de l'aérosol atmosphérique en région intertropicale. Thèse d'État, Université Paul Sabatier, Toulouse 1980.
 4. Ben Abdallah F, Boukhris M. Action des polluants atmosphériques sur la région de Sfax (Tunisie). *Pollution Atmosphérique* 1990 ; 127 : 292-7.
 5. Ben Abdallah F, Belgacem H, Boukhris M. Réponses des végétaux d'une région aride à une pollution atmosphérique double (SO_2 et composés fluorés). *Pollution atmosphérique* 1994 ; 143 : 117-22.
 6. Belghith MI. Étude physico-chimique des aérosols atmosphériques en milieu urbain côtier : cas de la région de Sfax. Influence des conditions météorologiques locales et synoptiques. Thèse de Doctorat, Université de Tunis II, 1999.
 7. Azri C, Serbaji MM, Medhioub K. Pollution de l'air par les rejets d'une fonderie de plomb. *TSM* 1999 (94^e année) ; 2 : 22-6.
 8. Mason B. Principles of geochemistry- 3rd edition, Wiley and sons 1966.
 9. Brewer PG. Minor elements in sea water, chemical oceanography. Riley JP, Skirrow G (eds). (2nd edition), Academic Press London 1975, 1 : 415-95.
 10. Allani M. Épuration des eaux résiduaires urbaines par le lagunage aéré et désinfection par rayonnements ultraviolets : cas de la station d'épuration de Sfax. Thèse de Doctorat Univ, Paris 1993.
 11. Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Manuel de gestion de la qualité de l'air des villes 1978 : 199 p.
- Renoux A, Boulaud D. Les aérosols. Physique et métrologie. Lavoisier Tec & Doc 1998 : 310 p.
 - Meszaros E. Fundamentals of atmospheric Aerosol Chemistry. Akademiai Kiado, Budapest 1999 : 310 p.

