

ARTICLES

Étude de la variation saisonnière de l'aérosol du Nord Tunisien

Seasonal variation of trace elements over Northern Tunisia

Faten ELLOUZ*, Mohamed MASMOUDI*, Jean-Paul QUISEFIT**

Résumé

L'étude menée sur l'aérosol atmosphérique du Nord Tunisien a été réalisée au niveau du site de Boumhel, une région urbaine, côtière et montagneuse. Les prélèvements (120 filtres) se sont déroulés au cours des années 2006 et 2007 à l'aide de la filtration totale et de l'impacteur.

Les concentrations calculées par l'analyse spectrométrique de fluorescence X témoignent d'une variation saisonnière importante des teneurs des différents éléments chimiques analysés, à savoir : Ti, Fe, Si, Al, Ca, Mg, Mn, Na, Cl, S, K, Zn et Pb. Les concentrations les plus élevées sont enregistrées pendant l'été (mois de juin) alors qu'on note les plus faibles valeurs au printemps (mois d'avril). Cette variation s'explique en fonction des conditions météorologiques locales du site. On souligne en particulier l'influence des vents sahariens secs et chauds (Sirocco) sur les concentrations des éléments d'origine terrigène. Le calcul des facteurs d'enrichissement FE/croûte (avec une référence crustale, l'Al) et FE/eau de mer (avec une référence marine, le Na) a permis de distinguer les sources probables qu'on peut attribuer aux différents éléments. L'examen des distributions massiques effectuées pour tous les éléments montre que les éléments d'origine terrigène se présentent généralement en fraction grossière, ce qui prouve la présence d'une source locale alors que les éléments marins et mixtes apparaissent sous deux modes.

Mots clés

Aérosols. Variation saisonnière. Sources. Nord Tunisien.

Abstract

Concentrations of elements measured in aerosol samples collected at April 2006, February, June and December 2007 were investigated to understand temporal variability of trace elemental concentrations. Collected samples were analyzed by a wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry for eleven elements including Ti, Fe, Si, Al, Ca, Mg, Mn, Na, Cl, S, K, Zn and Pb. Concentrations of elements were found to vary greatly on times scales (months). In order to evaluate the major factors affecting this variability, the meteorological parameters for selected site were discussed. Results demonstrated a significant variability of chemistry percentage. The higher concentrations of aerosols were detected in June were flow from the North and SSE sectors are more frequent. However, the lower concentrations of aerosols were recorded in April where flow came from the North Eastern and North Western sectors. The Enrichment Factors (FE) calculated for four months showed a variability of the origins of some elements.

Keywords

Aerosols. Seasonal variation. Sources. Northern Tunisia.

* Département de physique, Université de Sfax, Tunisie – E-mail : faten_ellouz@yahoo.fr – Fax : 216 74 274 437.

** Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques – France.

1. Introduction

Les particules d'aérosols jouent un rôle important dans la modification des conditions de vie sur terre. D'une part, ils agissent sur le climat en intervenant sur le bilan radiatif terrestre et la formation des nuages. D'autre part, ils peuvent être nocifs pour la santé humaine. L'aérosol forme un mélange complexe de contributions naturelles et anthropiques. Son identification nécessite la connaissance de l'ensemble des éléments chimiques qui le composent, leur concentration atmosphérique, leur rapport d'abondance et la distribution en taille des particules auxquelles ils sont associés [1]. Comme les principaux types d'aérosols sont produits par des sources géographiquement distinctes [2], ces estimations basées sur une composition moyenne de l'aérosol à l'échelle planétaire sont susceptibles de présenter des variations considérables d'une région à une autre ; les aérosols anthropiques se concentrent autour des régions industrielles, les sels de mer suivent naturellement la répartition des océans alors que les poussières minérales sont majoritaires autour des régions désertiques (Sahara) [3]. À cette variabilité spatiale, vient s'ajouter la variabilité temporelle des émissions qui est caractéristique de chaque type de source [4]. En particulier, si les émissions des espèces d'origine anthropique dépendent du développement des industries et du transport, les variations temporelles des émissions naturelles sont, elles, très sensibles aux conditions climatiques et météorologiques. La variabilité spatiale et temporelle des concentrations d'aérosol va donc être étroitement liée aux systèmes météorologiques qui contrôlent les processus de transport et de dépôt des particules. Ces processus météorologiques sont naturellement susceptibles d'être très différents d'une région à une autre. Ainsi, l'un des grands défis des sciences de l'atmosphère est de quantifier, comprendre et prédire l'impact des émissions des aérosols sur la qualité de l'air à l'échelle régionale. D'où le but de ce présent travail qui consiste à étudier la variabilité tem-

porielle de la composition chimique de l'aérosol du Nord tunisien et à cerner les origines probables des différents composants de cet aérosol.

2. Site d'étude, échantillonnage et technique d'analyse

Situé en banlieue sud de Tunis, le site de Boumhel (latitude : 36°44'N, longitude : 10°19'E) est borné par la mer Méditerranée à l'est et au nord et la montagne de Boukarnine à l'ouest (Figure 1). Ce massif montagneux de 576 m d'altitude étendu sur 3 600 m du nord au sud et 1 800 m d'est en ouest constitue le dernier maillon de la dorsale tunisienne. Il est constitué par des affleurements de calcaire jurassique résistants, plissés et faillés. Ce site urbain et côtier est situé loin des activités industrielles. Le climat est méditerranéen. La Tunisie se trouve à la jonction entre une zone tempérée et une zone tropicale mais le climat varie considérablement du nord au sud. Au nord, le climat est typiquement méditerranéen avec des hivers doux (décembre, janvier et février) et des étés chauds et humides (juin, juillet et août) caractérisés par des brises marines fréquentes. Dans le sud du pays, à proximité du Sahara aride, on note des fortes températures en été et des températures très faibles en hiver. Les températures mensuelles moyennes varient de 11 °C (janvier) à 28 °C (août). Les précipitations mensuelles sont de 39 mm en moyenne. Les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative varient de 58 à 83 %. Le régime des vents à Tunis présente une forte disparité d'une saison à une autre.

Cent vingt prélèvements ont été effectués au cours des mois de juin, décembre, février et avril. Nous avons choisi ces périodes représentatives des quatre saisons de l'année, où on note des conditions météorologiques distinctes. Les données journalières des différents paramètres météorologiques fournis



Figure 1.
Localisation du site d'étude.
Location of the sampling site.

collecte de plus de 90 % pour les particules de $0,1 \mu\text{m}$ de diamètre. Les diamètres aérodynamiques de coupure de chaque étage de l'impacteur sont respectivement : $> 8 \mu\text{m}$; $4 \text{ à } 8 \mu\text{m}$; $2 \text{ à } 4 \mu\text{m}$; $1 \text{ à } 2 \mu\text{m}$; $0,5 \text{ à } 1 \mu\text{m}$ et $< 0,5 \mu\text{m}$ [5-6].

L'analyse élémentaire des échantillons d'aérosols collectés a été effectuée par spectrométrie de fluorescence X au sein du Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques à Paris 7 [7]. Dans notre étude, la fluorescence X a porté sur les éléments suivants : Ti, Fe, Si, Al, Ca, Mg, Mn, Na, Cl, S, K, Zn et Pb. Toutes les analyses ont été effectuées par un spectromètre Siemens de type SRS 303. La précision analytique est comprise entre 2 et 8 % selon les éléments et les échantillons analysés.

3. Résultats et discussions

3.1. Variabilité des concentrations atmosphériques élémentaires

L'analyse des concentrations moyennes en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station de Boumhel montre que les éléments les plus abondants sont par ordre d'importance : Si, Ca, Al, Fe, S, Na, Mg et Cl. Les moins abondants sont : Ti, K et Mn. On remarque que ces concentrations présentent une grande variabilité temporelle. De même, on note que les teneurs en Pb et Zn sont inférieures au seuil de détection car le site de Boumhel est situé loin des grandes activités industrielles.

Par comparaison avec d'autres sites en Tunisie (Sfax) et ailleurs, on voit que les teneurs sont susceptibles de varier d'un site à un autre (Tableau 2). Cette variabilité de la répartition des concentrations de chaque élément dans l'aérosol peut être due à la position géographique de chaque site, la nature du sol, les fluctuations du débit des sources d'émissions ainsi que les conditions climatiques générales.

D'autre part, ces concentrations élémentaires présentent une variation temporelle. La Figure 2 montre

une différence très marquée des concentrations élémentaires moyennes de l'aérosol de Boumhel pendant quatre périodes d'échantillonnages (du 15 au 29 avril 2006 ; du 15 au 29 juin 2007 ; du 27 novembre au 14 décembre 2007 ; du 20 février au 6 mars 2007).

Il apparaît clairement que les teneurs les plus élevées sont détectées au mois de juin, c'est-à-dire pendant la saison estivale, caractérisée par des températures très importantes (Tableau 1) et par des brises marines qui assurent une augmentation des concentrations en éléments marins. En juin, l'apport se fait principalement par les secteurs nord (N) et sud-sud-est (SSE) (Figure 3). Les vents du nord amènent des masses d'air humide à travers la Méditerranée et par conséquent ces masses d'air peuvent charger l'atmosphère en particules maritimes riches en sel. Alors que les vents SSE (Sirocco) sont des vents secs et chauds provenant du sud du pays avec des vitesses élevées qui peuvent atteindre 16 m/s , ils chargent l'atmosphère en poussières provenant du Sahara et donc ils renforcent plutôt la composante terrigène. Le Sahara est en effet le plus grand pourvoyeur de poussières minérales pour l'atmosphère [11]. Cependant, en avril, on assiste à une baisse générale des différents éléments. Ceci peut être dû au phénomène de lessivage de l'atmosphère puisqu'on assiste à des journées pluvieuses en avril [12]. L'efficacité du processus de lessivage dépend de la taille des particules d'aérosol ainsi que de l'intensité et de la fréquence des pluies. D'autre part, la resuspension des aérosols due à l'action des vents, qui dépend de l'état de la couverture végétale de la surface du sol [13], diminue en avril.

Cet écart entre les différentes teneurs des constituants de l'aérosol traduit un enrichissement différent de l'aérosol imposé par différentes sources qui méritent d'être identifiées.

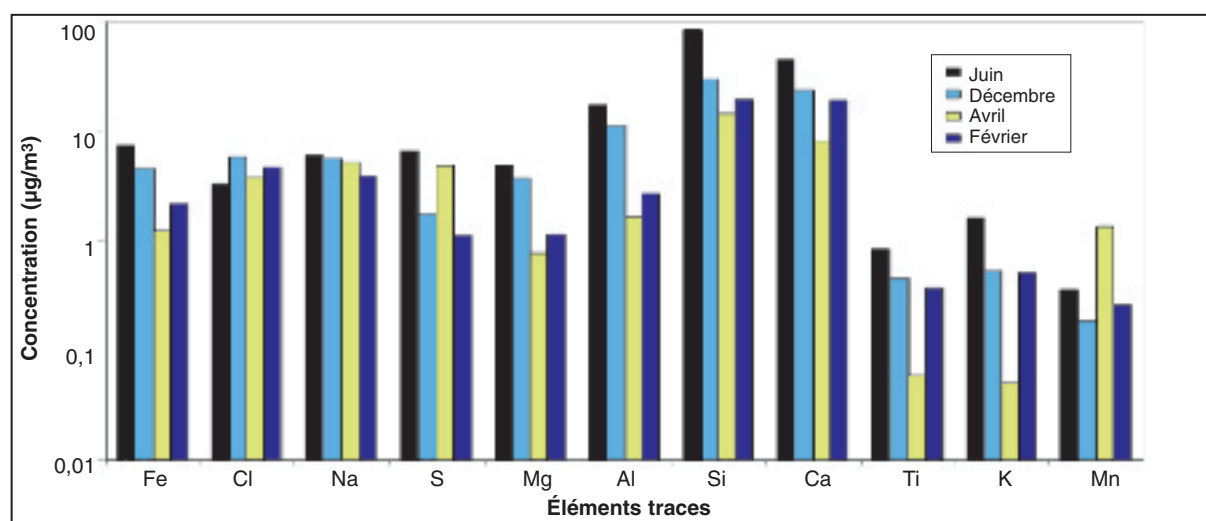


Figure 2.
Concentration des éléments pendant les quatre périodes d'échantillonnage.
Concentrations of various elements on sampling period.

Tableau 2.
Concentrations moyennes élémentaires des particules d'aérosols (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour différents sites.
Average concentrations of elements in different sites.

| Éléments | Site de Boumhel (Tunisie) Présente étude | Site de Sfax (Tunisie) (Belghith, 1999) | Yaoundé (Cameroun) (Pélassy, 1984) | Bagauda (Nigeria) (Breavington, 1978) |
|----------|---|--|---------------------------------------|--|
| Fe | 3,88 | 1,24 | 2,35 | 5,15 |
| Cl | 4,455 | 9,9 | --- | --- |
| Na | 5,18 | 2,12 | 0,88 | 0,61 |
| S | 3,64 | 2,03 | --- | --- |
| Mg | 2,65 | --- | 0,62 | 2,33 |
| Al | 8,34 | 2,01 | 4,07 | 6,87 |
| Si | 66,41 | 4,87 | 8,74 | --- |
| Ca | 30,47 | 6,5 | 1,09 | 7,23 |
| Ti | 0,43 | 0,116 | 0,32 | 0,48 |
| K | 0,68 | 0,938 | 1,2 | 1,53 |
| Mn | 0,54 | 0,02 | 0,058 | 0,073 |

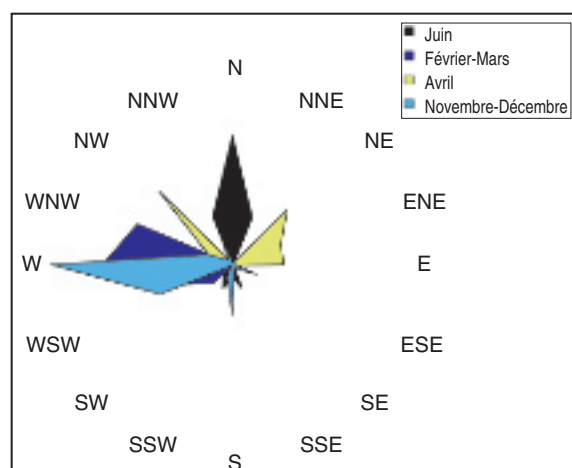


Figure 3.
Rose des fréquences du vent
durant les quatre périodes d'échantillonnage.
Frequency of wind on sampling period.

3.2. Les facteurs d'enrichissement (FE)

L'atmosphère de la région de Boumhel est par conséquent soumise à divers apports où se mêlent différentes sources qui affectent à la fois l'aspect qualitatif et quantitatif des aérosols. Pour former une vision globale sur les différentes origines des éléments contenus dans l'aérosol, nous avons eu recours au calcul des FE [14-15]. L'utilisation du facteur d'enrichissement est une méthode très employée afin de comparer l'abondance relative d'un élément dans l'aérosol à ce qu'elle serait dans un matériau de référence. Ainsi, le facteur d'enrichissement est défini comme suit :

$$FE(x) = \frac{\left(\frac{x}{\text{réf}}\right)_{\text{aérosol}}}{\left(\frac{x}{\text{réf}}\right)_{\text{matériau de référence}}}$$

où $\frac{x}{\text{réf}}$ est le rapport des concentrations de l'élément X et de l'élément de référence. En milieu urbain, les matériaux de référence sont l'eau de mer et la croûte terrestre.

Par référence à l'Al [3] et au Na [16] choisis respectivement comme références des sources terrigènes et marines et en utilisant le modèle de Mason et Moore [17], on a déterminé les FE pour tous les éléments analysés de l'aérosol pendant les quatre périodes d'échantillonnage (figure 4).

À partir des FE calculés, on déduit les faits suivants :

- les éléments tels que : Si, Al, Fe, Mn et Ti présentent des valeurs de $FE/Al < 10$, ces éléments sont très enrichis dans la répartition des FE normés au sodium $FE/Na > 1000$; ce qui confirme leur origine continentale dominante quelle que soit la période d'échantillonnage. Ce groupe d'éléments présente en général des distributions monomodales et se concentre sur une fraction grossière (Figure 5) ;
- les valeurs des FE du sodium et du potassium sont inférieures à 10 quels que soient l'élément de référence et la période d'étude, ce qui témoigne d'une double origine (marine et terrigène) pour ces deux éléments ;
- le chlore est typiquement marin quelle que soit la période, suite à son important enrichissement par rapport à la croûte ($FE/Al > 1000$) ;
- le soufre occupe une position particulière puisqu'il montre une origine marine pendant les mois de février et décembre alors qu'il présente une source autre que marine et terrigène durant les mois de juin et avril ;
- le Ca présente des valeurs de $FE > 10$ quels que soient l'élément de référence et le mois d'échantillonnage. Dans ce cas, la part importante du calcium « en excès » peut être due à une sous-estimation par le modèle utilisé (modèle de Masson) des teneurs moyennes en calcium, ou bien à la présence de chantiers de constructions ainsi que d'une usine de ciment.

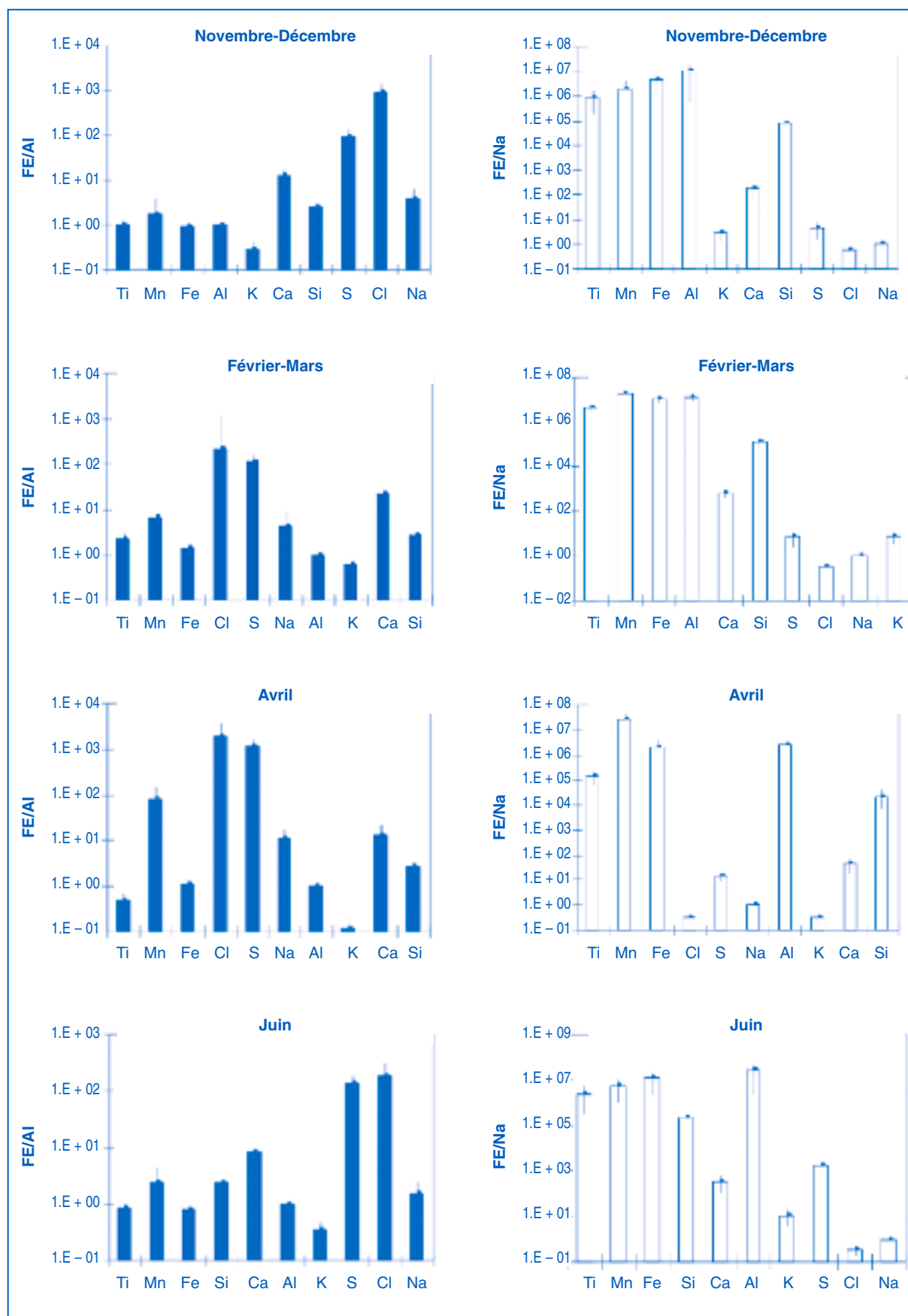


Figure 4.

Les facteurs d'enrichissement normés au Na et à l'Al durant les quatre périodes d'échantillonnage.
Enrichment factors values (with reference Al and Na) on sampling period.

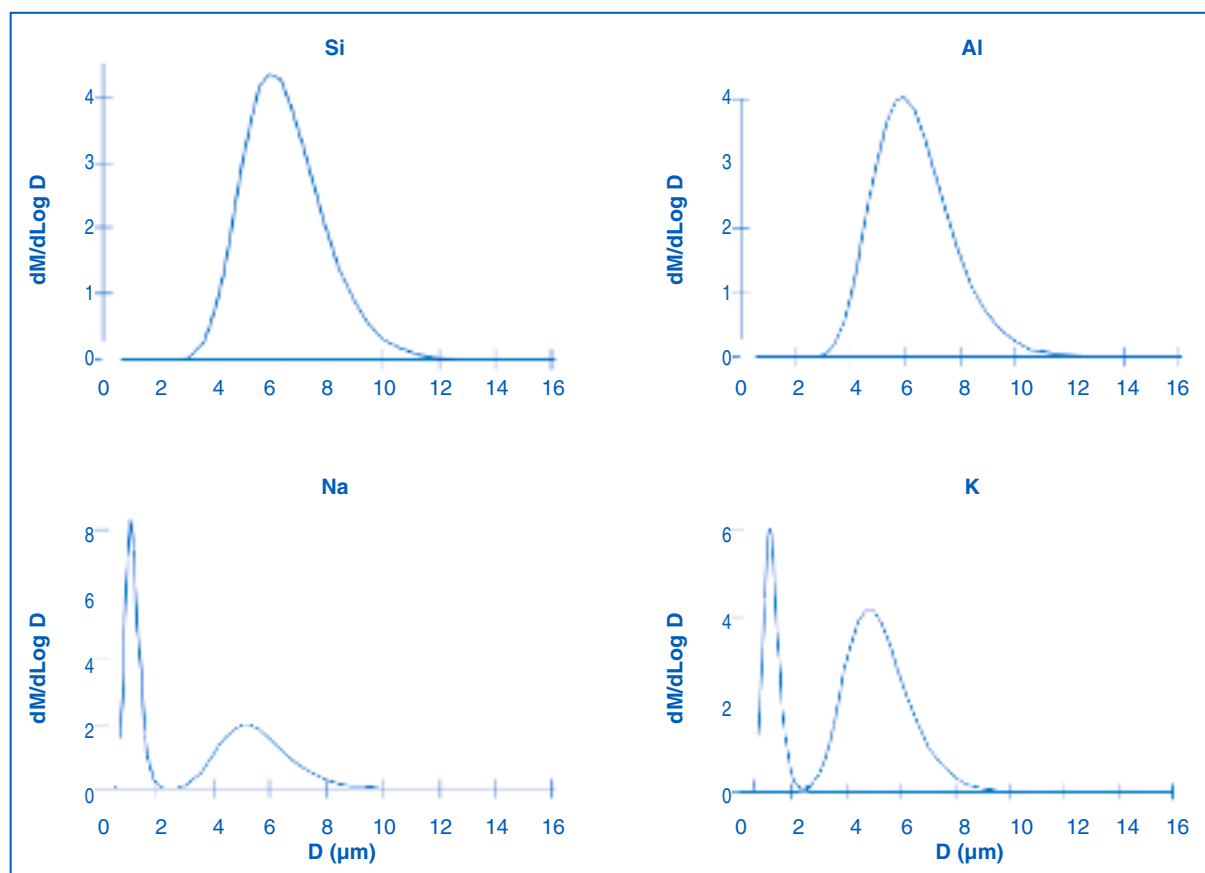


Figure 5.
Distribution granulométrique du Si, Al, Na et K (avril 2006).
Mass size distribution of Si, Al, Na and K (April 2006).

4. Conclusion

Ce travail rapporte les concentrations calculées par spectrométrie de fluorescence X des différents composants analysés, à savoir le Ti, Fe, Si, Al, Ca, Mg, Mn, Na, Cl, S, K, Zn et Pb, au niveau du site de Boumhel durant quatre périodes d'échantillonnage. La zone d'étude est une région urbaine bornée par la Méditerranée au nord et à l'est et la montagne de Boukarnine à l'ouest.

On note tout d'abord des teneurs importantes pour les éléments marins et terrigènes alors que les éléments anthropiques présentent des concentrations inférieures au seuil de détection. La moyenne des concentrations des composants de l'aérosol varie en avril entre $0,056 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le K et $14,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour

le Si. Ce dernier présente la concentration la plus importante, suivi par Ca, Na, S, Cl, Al, Fe, Mn, Mg, Ti et K.

Les teneurs les plus élevées sont enregistrées pendant l'été (mois de juin) alors qu'on note les plus faibles concentrations au printemps (mois d'avril). Cette variabilité s'explique par les conditions météorologiques locales du site, en particulier les précipitations et le vent. Le calcul des facteurs d'enrichissement a permis d'envisager les sources probables des différents composants de l'aérosol tunisien. L'examen des distributions massiques effectuées pour tous les éléments montre que les éléments d'origine terrigène se présentent généralement en fraction grossière, ce qui prouve la présence d'une source locale alors que les éléments marins et mixtes apparaissent sous deux modes.

Références

1. Masmoudi M, Belghith I, Chaabane M. Elemental particle size distributions measured and estimated dry deposition in Sfax region (Tunisia). *Atmospheric research* 2002 ; 63 : 209-19.
2. D'Almeida GA. A model for Saharan dust transport. *J Clim App Meteor* 1986 ; 25 : 903-16.
3. Gomes L, Bergametti G. Submicron Desert dusts: a Sandblasting. *Process J Geophys Research* 1990 ; 95 (13) : 927-35.
4. Andreae MO. Climate effects of changing atmospheric aerosol levels. World Survey of Climatology, vol. XVI, Future Climate of the World, A. Henderson – Sellers (éd), 1994.
5. Bergametti G, Vie le Sage R, Grubis B, Dulieu B, Elichegaray C. *Environ tech lett* 1982 ; 3 : 297.
6. Gomes L, Bergametti G, Dulac F, Ezat U. Assessing the actual size distribution of atmospheric aerosols collected with a cascade impactor. *Journal Aerosol Science* 1989 ; 21.
7. Quisefit JP, Gaudichet A. Prélèvement des aérosols atmosphériques et analyses inorganiques. *Analisis* 1998 ; 26.
8. Belghith MI. Étude physico-chimique des aérosols atmosphériques en milieu urbain côtier, cas de la région de Sfax. Thèse de l'université de Tunis II, 1999.
9. Pelassy P. La composition chimique de l'aérosol atmosphérique de Yaoundé (Cameroun). Recherche de ses sources. *Atmospheric Environment* 1984 ; 18 (10) : 2245-59.
10. Beavington F. Comparative studies of trace elements in air particulate in Northern Nigeria. *The Science of the total environment* 1978 : 239-44.
11. Schutz L. long range transport of desert dust with special emphasis on the Sahara. *Ann N Y Acad Sci* 1980 ; 338 : 515-32.
12. Slinn SA, Slinn WGN. Predictions for particle deposition on natural waters. *Atmospheric Environment* 1980 ; 14 : 1013-6.
13. Güllü G, Olmez I, Aygun S, Tuncel G. Atmospheric trace element concentrations over the eastern Mediterranean Sea: factors affecting temporal variability. *Journal of Geophysical Research* 1998.
14. Manoli E, Voutsas D, Samara C. Chemical characterization and source identification/ apportionment of fine and coarse air particles in Thessaloniki, Greece. *Atm Environ* 2002 ; 36 : 949-61.
15. Bilos C, Colombo JC, Skorupka CN, Rodriguez Preza MJ. Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina. *Environmental pollution* 2001 : 149-58.
16. Laurent B. Simulation des émissions d'aérosols désertiques à l'échelle continentale : analyse climatologique des émissions du nord-est de l'Asie et du nord de l'Afrique. Thèse de doctorat, 2005.
17. Mason B, Moore CB. Principles of geochemistry. Wiley, New York 1982.