

Utilisation des lichens comme bio-indicateurs de la pollution atmosphérique par le plomb, cadmium et zinc de la région de Rabat-Sale-Zemmour-Zaër (Maroc)

**Fatima-Zahra OUALI ALAMI^{1*}, Abdellah ELABIDI², Latifa MOUHIR¹, Mohamed FEKHAOUI³
et Amal SERGHINI³**

¹*Université Hassan II, Faculté des Sciences et Techniques Mohammadia, Département de Génie des Procédés et Environnement, BP 146 Mohammadia, Maroc*

²*Institut National d'Hygiène, Laboratoire d'hydrobiologie-hygiène industrielle et environnementale, Avenue Ibn Battouta BP 1014 R.P Rabat, Maroc*

³*Institut Scientifique, Unité de pollution, d'écotoxicologie et risque sanitaire, Département de Zoologie et Ecologie Animale, Université Mohammed V-Agdal, BP 703 Agdal, Rabat, Maroc*

* Correspondance, courriel : oualialami.fatimazahra@gmail.com

Résumé

Au Nord-Ouest du Maroc, la région de Rabat-Salé-Zemmour-Zaër présente une importance socio-économique pour le royaume. En effet, elle est sujette à deux sources de pollution; le trafic routier et les rejets des poteries. Considérant le risque de contamination métallique de l'Homme et de l'environnement, une étude a été conduite pour évaluer la pollution métallique de l'atmosphère. Elle a porté sur les bio-indicateurs lichens (*Xanthoria Parietina*). C'est ainsi que des échantillons de thalle de *Xanthoria Parietina* ont été prélevés au cours de la période située entre janvier et juillet 2007 et trois éléments métalliques Plomb(Pb), Cadmium(Cd) et Zinc(Zn) ont été détectés. Les résultats de suivi spatial obtenus au niveau des quatre stations étudiées (Kamra, Centre ville, Oulja et Allal Behraoui) ont révélé des concentrations moyennes mensuelles dépassant les normes requises à l'exception de la station de Allal Behraoui. Les résultats de suivi temporel obtenus au niveau des lichens montrent que la variation saisonnière atmosphérique des métaux est très marquée avec des teneurs plus élevées en hiver et plus basses en été.

Mots-clés : *métaux lourds, lichens, plomb, cadmium, zinc, Rabat, salé, Zemmour, Zaër, Maroc.*

Abstract

Use of lichens as bioindicators of air pollution by lead, cadmium and zinc in the region of Rabat-Sale-Zemmour-Zaër (Morocco)

North western Moroccan Atlantic Coast, named Rabat-Salé-Zemmour-Zaër, represent an important socio-economic niche to the country. However this area is conversely subjected to two sources of metal pollution mainly road traffic and pottery emissions that, affect air quality. This study was conducted to assess the metal pollution of the atmosphere at four stations belonging to urban (Kamra, Downtown and Oulja) and rural (Allal Behraoui) locations within this important geographic area. It focused on the bio-indicators lichen (*Xanthoria parietina*) which able to accumulate large amounts of metal traces.

Thus samples of thallus *Xanthoria Parietina* were collected during the period between January and July 2007 and three metals Lead (Pb), Cadmium (Cd) and zinc (Zn) levels were investigated. The results of the spatial monitoring obtained at the four stations studied (Kamra, Downtown, Oulja and Allal Behraoui) showed monthly average concentrations exceeding the standards required except station Allal Behraoui. Time tracking results obtained in lichens showed that the seasonal variation of atmospheric metal is marked with higher contents in winter and lower in summer. Our results showed that overall, the concentrations of three metal pollutants are higher in urban sites than rural sites and the metal trace elements tend to increase with increasing duration of exposure, humidity and solubility metals.

Keywords : *heavy metal, lichens, lead, cadmium, Zinc, Rabat, sale, Zemmour, Zaêr, Morocco.*

1. Introduction

L'atmosphère de plusieurs régions du monde a été soumise à la pollution urbaine, industrielle et artisanale. Toutes ces activités ont une incidence chimique des propriétés atmosphériques. L'émission des métaux dans l'atmosphère est devenue un grave problème pour l'environnement et la santé [1]. Il est possible d'évaluer la qualité de l'air à l'aide d'appareils de mesure, cependant leur coût élevé ne permettra jamais de couvrir l'ensemble du territoire et les méthodes basées sur l'analyse des filtres d'aérosols, pour surveiller la qualité de l'air nécessitent, en général de fréquentes interventions de contrôle et de maintenance. L'utilisation d'organismes vivants pour l'évaluation de la qualité de l'air et de la bioindication lichénique, doit être un outil à privilégier. D'après [2] les lichens sont utilisés depuis une quarantaine d'années pour suivre la contamination de l'environnement par les éléments traces métalliques et sont capables d'accumuler de grandes quantités d'éléments en utilisant leurs caractères d'alimentation qui dépend totalement de l'atmosphère [3-8]. Les Lichens accumulent facilement les polluants atmosphériques dans leurs tissus sans effets négatifs importants sur leur survie ou leur croissance. Ils ont été reconnus comme des indicateurs potentiels de la pollution de l'air dès les années 1860 en Grande-Bretagne et le reste de l'Europe. Aujourd'hui, ils dominent parmi les organismes d'évaluation de la qualité de l'air par sa qualité de croissance lente idéale pour les études à long terme de la pollution atmosphérique [9]. La valeur des lichens en tant que bio accumulateurs d'oligoélément est en grande partie attribuée à leur rapport élevé de surface/volume et propriétés élevées d'échange cationique. De même leurs manques des racines, des cuticules cireuses et des stomates permettent à beaucoup de contaminants d'être absorbés au-dessus de la surface entière de thalle [10,11]. Cette étude a été donc entreprise pour évaluer les niveaux de contamination métalliques dans les thalles de lichen *Xanthoria Parietina* de la région de Raba-Salé-Zemmour-Zaêr.

2. Matériel et méthodes

2-1. Sites d'étude

Situé au Nord-Ouest du Maroc sur la côte atlantique, la région de Raba-Salé-Zemmour-Zaêr couvre une superficie de 9580km² et 7,9% de la population totale du royaume. Il est limitée au Nord et au Nord-Est par la région de Gharb Cherarda Benihssen ; à l'Ouest par l'Océan Atlantique ; à l'Est et au Sud-Est par la région de Meknès Tafilalt ; au Sud et au Sud-Est par la région de Chaouia-Ourdigha.

Pour notre étude, les sites de prélèvement ont été choisis et classés en fonction de leurs densité du trafic routier; il s'agit de la zone :

- **Kamra (S1)**: classée haute densité ;
- **Centre ville (S2)**: de moyenne densité ;
- **Oulja (S3)**: à forte activité industrielle (complexe artisanal) ;
- **Allal Bahraoui (S4)**: la plus éloignée du Centre urbain (zone rurale de faible densité et zone témoin). (*Figure 1*).

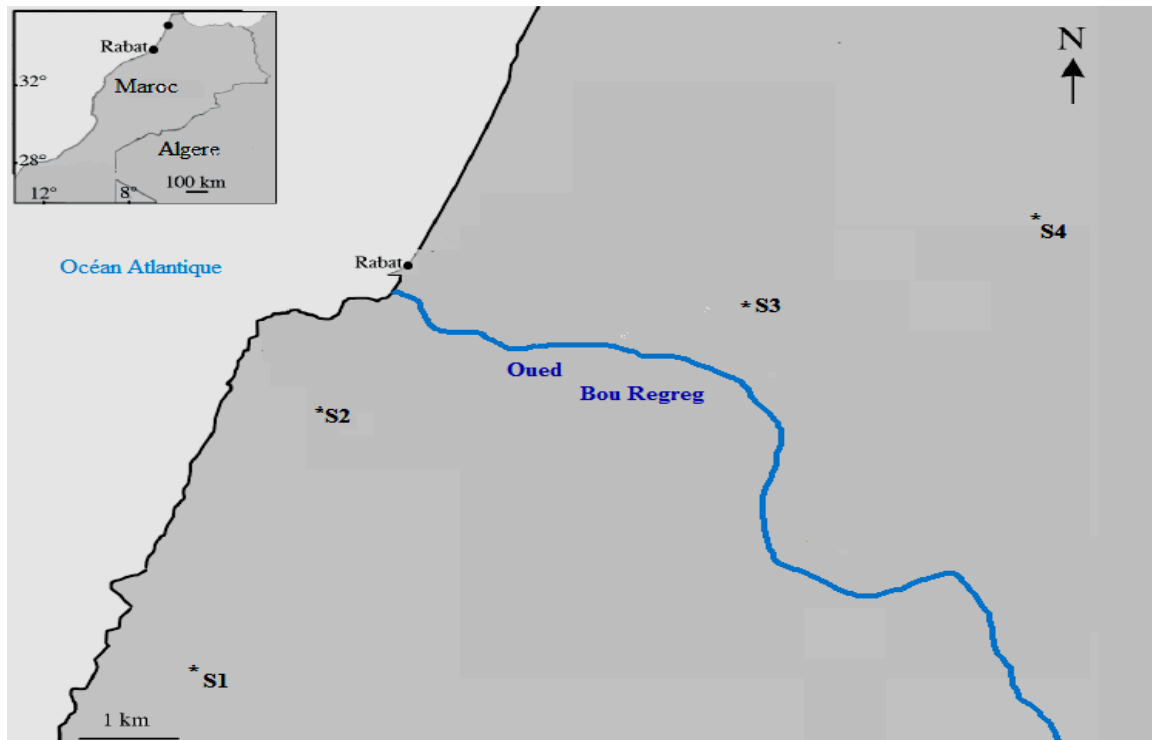


Figure 1 : Localisation des stations d'étude au niveau de Raba-Salé-Zemmour-Zaêr

2-2. Prélèvement des échantillons de lichen (*Xanthoria Parietina*)

Des prélèvements ont été effectués entre janvier et juillet 2007 au niveau des quatre sites précités. Le choix des échantillons lichen a porté principalement sur des thalles de lichen d'environ 20 cm de taille à 1,5cm du sol.

2-3. Préparation des échantillons

Les thalles prélevés sont lavés trois fois par l'eau bi distillée, sèches à l'étuve a 65° c jusqu'à séchage total, puis elles sont broyées et tamisées pour enlever les tiges non broyées.

2-4. Minéralisation et dosage des métaux traces

Environ 0,5 g d'échantillon de lichen sèches sont pèses dans des bombes de digestion en Téflon, 4 ml d'acide nitrique sont ajoutés et les bombes sont bien fermées et maintenues à une température ambiante pendant 24 h pour une prédigestion. Elles sont ensuite placées dans un bain de sable à 120 °C jusqu'à ce que les solutions deviennent claires et limpides (en générale pendant 4 h).

Après refroidissement le contenu des bombes est transvasé dans des tubes de dilution de 50ml et complétée à 50 ml par l'eau bi distillée [12].

2-5. Analyse statistique

La validité des méthodes analytiques a été vérifiée par contrôle interne à l'aide des échantillons standards [13] et par contrôle externes à l'aide d'exercices d'inter calibration [14, 15]. La comparaison des teneurs en plomb, cadmium et zinc entre les différentes stations a été réalisée à l'aide d'un Test-t de Student, pour des données non appariées. L'examen des teneurs des lichens en métaux a été effectué par analyse en composantes principales (ACP). Elle a concerné les trois variables Pb, Cd, et Zn. Cette méthode a été réalisée avec du logiciel XL STAT [16].

3. Résultats et discussion

3-1. Variation spatio-temporelle

3-1-1. Variation spatiale

Les valeurs relevées montrent d'une contamination irrégulière et importante, en effet les teneurs moyennes annuelles les plus élevées en plomb et cadmium et zinc sont notées au niveau de la zone urbaine (stations S1, S2 et S3), et que les concentrations les plus faibles de ces métaux ont été enregistré au niveau de la zone rurale de Allal Behraoui (S4). Les teneurs en plomb les plus élevées sont notées au niveau des stations de Oulja, Centre ville et Kamra (zone urbaines) avec des valeurs respectives de 415.45 $\mu\text{g/g}$, 96.75 $\mu\text{g/g}$, et 75.35 $\mu\text{g/g}$. La différence de concentration en plomb entre ces stations (à part entre Kamra et Centre ville) est hautement significative ($P < 0.0001$). Les concentrations moyennes en plomb au niveau de la station rurale de Allal Behraoui sont relativement très faibles avec 29.03 $\mu\text{g/g}$ et la différence de concentration en plomb entre cette station et les autres est hautement significatives ($P < 0,0001$) (**Figure 2 et Tableau 1**).

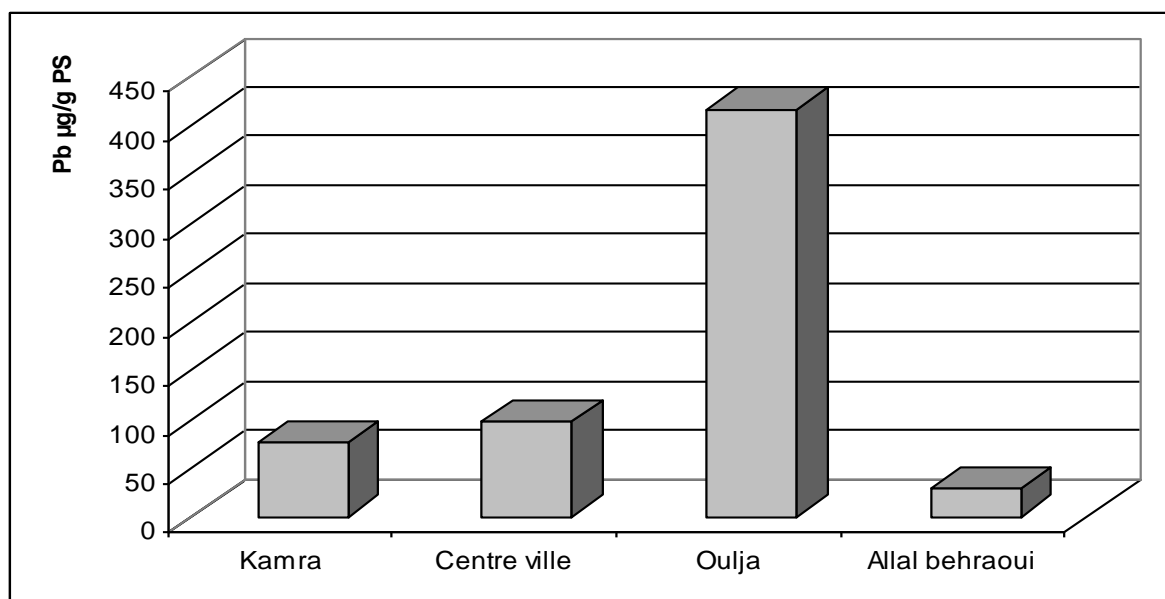


Figure 2 : Variation spatiale des Teneurs moyenne annuelles en plomb dans les lichens ($\mu\text{g/g}$ en poids sec)

Tableau 1 : Comparaison des teneurs moyennes annuelles du plomb dans les liches entre les différents sites à l'aide du test-t de Student

		Test-t pour égalité des moyennes						
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Différence écart- type	Intervalle de confiance 95% de la différence	
							Inférieure	Supérieure
K-C	Hypothèse de variances égales	-1,990	22	,059	-21,4017	10,7568	-43,7099	,9066
	Hypothèse de variances inégales	-1,990	19,695	,061	-21,4017	10,7568	-43,8623	1,0589
K-o	Hypothèse de variances égales	- 12,200	22	,000	-340,104	27,8783	-397,920	- 282,2886
	Hypothèse de variances inégales	- 12,200	12,130	,000	-340,104	27,8783	-400,774	- 279,4351
K-B	Hypothèse de variances égales	7,034	22	,000	46,3217	6,5852	32,6647	59,9786
	Hypothèse de variances inégales	7,034	14,007	,000	46,3217	6,5852	32,1984	60,4449
C-O	Hypothèse de variances égales	- 11,151	22	,000	-318,702	28,5794	-377,973	- 259,4328
	Hypothèse de variances inégales	- 11,151	13,286	,000	-318,702	28,5794	-380,310	- 257,0956
C-B	Hypothèse de variances égales	7,436	22	,000	67,7233	9,1077	48,8352	86,6115
	Hypothèse de variances inégales	7,436	12,496	,000	67,7233	9,1077	47,9663	87,4803
O-B	Hypothèse de variances égales	14,163	22	,000	386,4263	27,2844	329,8418	443,0107
	Hypothèse de variances inégales	14,163	11,158	,000	386,4263	27,2844	326,4771	446,3754

K : Kamra, C : Centre ville, O : Oulja, B : Allal Behraoui).

Concernant le cadmium les concentrations moyennes relevées au niveau des quatre sites d'étude varient entre une valeur minimale de à 0.156 µg/g à la station de Alla Behraoui et une valeur maximale de 0.38 µg/g à la station d'Oulja et la différence de concentration en cadmium entre ces deux stations et les autres est hautement significatives (P<0,0001). Des teneurs du Cadmium moins élevées dans la zone urbaine sont notées au niveau des stations de Kamra et du Centre-ville avec des valeurs respectives de 0.268 µg/g et 0.257 µg/g. la différence de concentration entre ces deux stations est non significative (*Figure 3 et Tableau 2*).

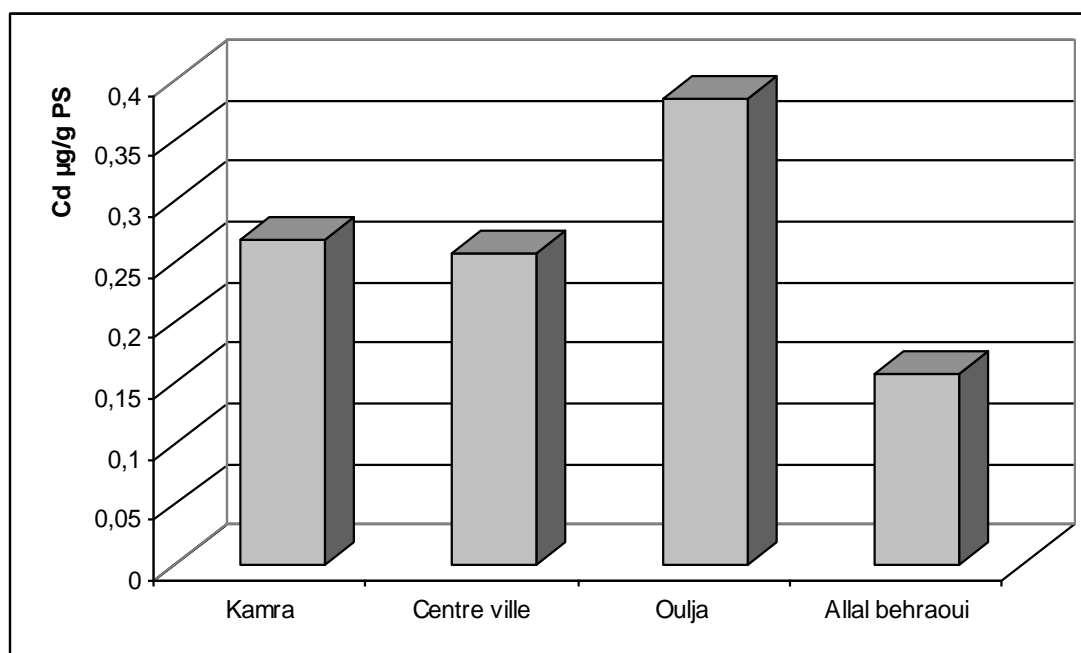


Figure 3 : Variation spatiale des Teneurs moyenne annuelle en cadmium dans les lichens ($\mu\text{g/g}$ en poids sec)

Tableau 2 : Comparaison des teneurs moyennes annuelles du cadmium dans les lichens entre les différents sites à l'aide du test-t de Student

		Test-t pour égalité des moyennes						
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Différence écart-type	Intervalle de confiance 95% de la différence	
							Inférieure	Supérieure
K-C	Hypothèse de variances égales	,680	22	,504	,01079	,01588	-,02214	,04372
	Hypothèse de variances inégales	,680	20,218	,504	,01079	,01588	-,02231	,04389
K-o	Hypothèse de variances égales	-7,032	22	,000	-,11679	,01661	-,15124	-,08235
	Hypothèse de variances inégales	-7,032	19,509	,000	-,11679	,01661	-,15149	-,08209
K-B	Hypothèse de variances égales	10,557	22	,000	,11121	,01053	,08936	,13305
	Hypothèse de variances inégales	10,557	16,212	,000	,11121	,01053	,08890	,13352

C-O	Hypothèse de variances égales	-6,813	22	,000	-,12758	,01873	-,16642	-,08875
	Hypothèse de variances inégales	-6,813	21,900	,000	-,12758	,01873	-,16643	-,08874
C-B	Hypothèse de variances égales	7,367	22	,000	,10042	,01363	,07215	,12869
	Hypothèse de variances inégales	7,367	13,950	,000	,10042	,01363	,07117	,12966
O-B	Hypothèse de variances égales	15,751	22	,000	,22800	,01448	,19798	,25802
	Hypothèse de variances inégales	15,751	13,587	,000	,22800	,01448	,19686	,25914

K : Kamra, C : Centre ville, O : Oulja, B : Allal Behraoui).

Quand au zinc, les concentrations moyennes les plus élevées ont été enregistrée à la station de Oulja et les plus faibles ont été noté à la station de Allal Behraoui avec respectivement comme valeurs moyennes de 129.3 et 42.25 $\mu\text{g/g}$ en poids sec. La différence de concentration est non significative entre la station du Centre ville et les deux autres stations urbaines (Kamra et Oulja) et elle est hautement significations entre la station de Kamra et celle de Oulja et entre la station de Alla Behraoui et les autres stations ($P < 0.0001$) (Figure 4 et Tableau 3).

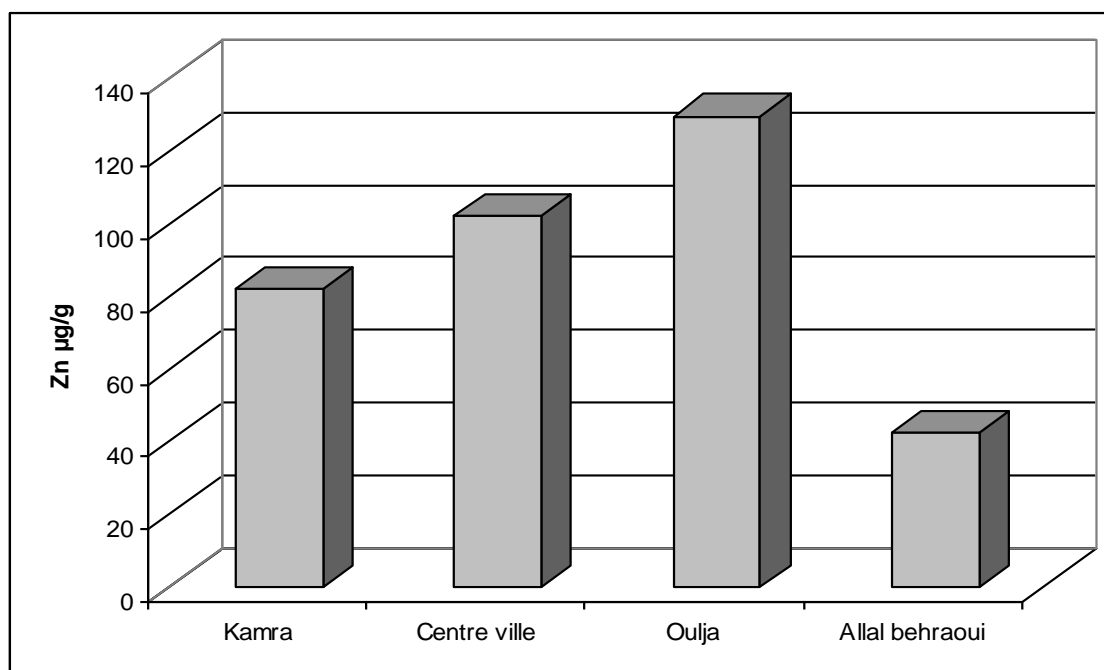


Figure 4 : Variation spatiale des Teneurs moyenne annuelle en zinc dans les lichens ($\mu\text{g/g}$ en poids sec)

Tableau 3 : Comparaison des teneurs moyennes annuelles du zinc dans les lichens entre les différents sites à l'aide du test-t de Student

		Test-t pour égalité des moyennes					Intervalle de confiance	
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Différence écart-type	95% de la différence	
							Inférieure	Supérieure
K-C	Hypothèse de variances égales	-1,516	22	,144	-14,2983	9,42969	-33,8543	5,25765
	Hypothèse de variances inéégales	-1,516	20,313	,145	-14,2983	9,42969	-33,9488	5,35222
K-o	Hypothèse de variances égales	-4,745	22	,000	-41,7275	8,79483	-59,9668	-23,48814
	Hypothèse de variances inéégales	-4,745	21,297	,000	-41,7275	8,79483	-60,0018	-23,45318
K-B	Hypothèse de variances égales	7,563	22	,000	44,0175	5,81978	31,94801	56,08699
	Hypothèse de variances inéégales	7,563	12,536	,000	44,0175	5,81978	31,39718	56,63782
C-O	Hypothèse de variances égales	-2,703	22	,013	-27,4291	10,14743	-48,4736	-6,38469
	Hypothèse de variances inéégales	-2,703	21,726	,013	-27,4291	10,14743	-48,4890	-6,36928
C-B	Hypothèse de variances égales	7,561	22	,000	58,3158	7,71304	42,31996	74,31171
	Hypothèse de variances inéégales	7,561	11,852	,000	58,3158	7,71304	41,48723	75,14444
O-B	Hypothèse de variances égales	-12,38	22	,000	-85,7450	6,92250	-100,101	-71,38861
	Hypothèse de variances inéégales	-12,38	12,067	,000	-85,7450	6,92250	-100,818	-70,67140

K : Kamra, C : Centre ville, O : Oulja, B : Allal Behraoui

Pour l'interprétation des résultats, il n'existe pas de normes par rapport aux teneurs des lichens en éléments traces. Selon [17] et [18] les valeurs retenues pour comparer les résultats par rapport aux valeurs de référence définies à partir des travaux de la littérature (**Tableau 4**) sont 8-15 µg/g pour le plomb, 0,1-0,2 µg/g pour le cadmium et 30-50 µg/g pour le zinc.

Tableau 4 : *Comparaison de la charge métallique de lichen de Rabat-Salé-Zemmour-Zaër avec d'autres régions du monde (moyenne, valeurs limites)*

Country-Region	Pb	Cd	Zn	Numéros de Références
Kosovo	8.67(9.1- 282.1)	1.08(0.41- 3.48)	149.5(8- 272)	[19]
Russia-Norilsk	1.26(0.78- 5.79)	0.12(0 - 0.38)	20.05(9.73- 29.6)	[20]
Italy-Colline Metallifere	3.88(0.68- 11.20)	0.26(0.06- 0.69)	25.9- 57.7	[21]
Canada-Barrenbdlands, Nunavut	6.44(0.76- 19.70)	0.15(0.06- 0.24)	22(15- 44)	[22]
Grenland	1.72(0.32- 4.29)	0.09(0.05- 0.16)	17.65(6.48- 36.9)	[23]
Italy- Veneto	7.66(0.8- 34.1)	0.27(0.11- 1.5)	33.56(20- 99)	[24]
Singapore	11.86(2.83-16.59)	0.2(0.14- 0.28)	65.58(44.17-83.16)	[25]
Italy- Pavia	21.25(14-30)	0.275(0.21- 0.35)	109.2(94- 140)	[26]
Italy- Pisa	3.44(0- 27.66)	0.228(0.087-0.57)	30.15(5.5- 80.5)	[27]

Globalement, les concentrations en plomb sur les sites urbains sont plus importantes que sur les sites ruraux. Cette tendance peut s'expliquer par la différence de l'intensité du trafic automobile entre ces deux types de sites. Les teneurs élevées en plomb enregistrées à la station de Oulja pourraient être attribuées aux rejets atmosphériques des potiers à proximité de cette station étudiée qui sont très chargées en cet élément à cause de la forte utilisation de la galène (PbS) par les poteries [28, 29], comme il a été signalé précédemment. Cependant toutes les concentrations en plomb au niveau de toutes les stations se situent en dessus des valeurs de référence précitées (8-15µg/g). Nous avons observé des concentrations relativement importantes de plomb dans les lichens de la station de Allal Behraoui (zone rurale) par rapport aux autres matrices étudiées (sol et atmosphère) et cela peut expliquer la forte capacité des lichens qui sont connus pour accumuler les substances aéroportées aux concentrations bien plus grandes que ceux dans l'atmosphère [1].

Les utilisations du cadmium sont très nombreuses, en métallurgie (protection anticorrosion), pour la fabrication d'accumulateurs, des pigments ou de différents matériaux. Il est présent également dans plusieurs minerais. Les principales sources de cadmium atmosphérique sont la production des métaux non ferreux, la combustion des combustibles fossiles, l'incinération des ordures ménagers, la fabrication du fer et de l'acier. Dans notre zone d'étude, les principales sources du cadmium sont le trafic routier (émission à partir des véhicules suite à la combustion des carburants et l'usure des pièces et des pneus), les potiers, la métallurgie ainsi que l'incinération des ordures ménagers présents dans la zone de Oulja. Cela explique certainement que les plus importantes concentrations aient été mesurées dans les lichens de la station de Oulja.

En zone rurale, nous avons trouvé des quantités de cadmium non négligeables qui peuvent avoir comme origine l'utilisation des engrais (les engrais «superphosphate» contiennent du cadmium [30]. Le zinc (matériaux sous la forme d'oxyde, de sulfate, de chlorure ou encore organique) est un élément naturellement présent dans les sols. Il est généralement émis dans l'atmosphère sous la forme de petites particules, à partir du trafic routier et de diverses industries. Nous avons observé des concentrations relativement importantes de zinc dans les lichens de la station de Oulja et celle du Centre ville dont l'origine est le trafic routier et les poteries de Salé.

3-1-2. Variation temporelle

La variation temporelle du plomb, cadmium et zinc montre que ces éléments traces ont une tendance à augmenter avec l'augmentation de la durée d'exposition, et cela peut être expliqué selon [26] à ce que ces éléments traces sont susceptibles d'être associés aux substances particulaires déposées sur la surface des lichens. Des augmentations et des diminutions temporelles des concentrations d'éléments traces dans les lichens sont généralement rapportées de la littérature [21]. En effet l'accumulation des métaux par les lichens se fait selon [31] soit par un dépôt des particules en suspension de l'atmosphère sur la surface du thalle, soit par une accumulation intracellulaire, soit par accumulation des métaux au niveau de la paroi cellulaire et selon dans quel fraction, parmi ces trois, où l'étude a été faite qu'on peut avoir une augmentation ou diminution de la variation temporelle. Ainsi par exemple selon [32] la fraction intercellulaire présente des concentrations plus élevées en été qu'en hiver. Les concentrations en plomb les plus faibles sont observées en septembre (premier mois de la culture des lichens à Rabat-Salé-Zemmour-Zaër) et cela pour tous les sites étudiés avec $\mu\text{g/g}$ en poids sec comme valeur moyenne la plus faible enregistrée à la station de Kamra (pour la zone urbaine), ces concentrations ont eu tendance d'augmenter jusqu'à la période d'été (juillet et août) où une diminution assez remarquable a été observée. Cette diminution peut être expliquée par les deux paramètres météo logiques qui varient beaucoup en cette période à savoir la précipitation qui est nulle en juillet et août et l'humidité qui est faible en cette période (*Figure 5*).

Cette constatation de diminution des teneurs en plomb et cadmium en juillet et août nous a poussés à analyser ces teneurs dans les lichens avant et après lavage avec l'eau distillée et nous avons remarqué que les teneurs de ces éléments dans les lichens lavés augmentent de 20%. En effet, la précipitation peut jouer un rôle important dans la variation saisonnière, ainsi selon [33] les différentes quantités de précipitations peuvent influencer les résultats et cela par un lavage important des particules déposées sur la surface des lichens. Cependant les lichens sont métaboliquement très actifs quand l'humidité est élevée et les mois d'hiver sont ainsi les plus favorables pour la croissance et l'accumulation des polluants [34]. Mais selon [35] la pluie, surtout dans les zones urbaines, contient des quantités importantes des éléments traces métalliques qui peuvent ainsi contaminer les lichens par un dépôt humide. Bien qu'un équilibre entre ces deux mécanismes (lavage et dépôt humide) pourrait être responsable de cette variation saisonnière. De même on peut selon [21] les lichens peuvent perdre une certaine biomasse ou devenir saturés avec des éléments, de manière significative changeant leur structure extérieure et exécution physiologique, cela peut expliquer la diminution des teneurs en plomb en juillet et août. La même constatation de diminution des teneurs en juillet et août a été observée pour le cadmium et la différence de concentration entre un mois et autre est généralement hautement significative (*Figure 6*).

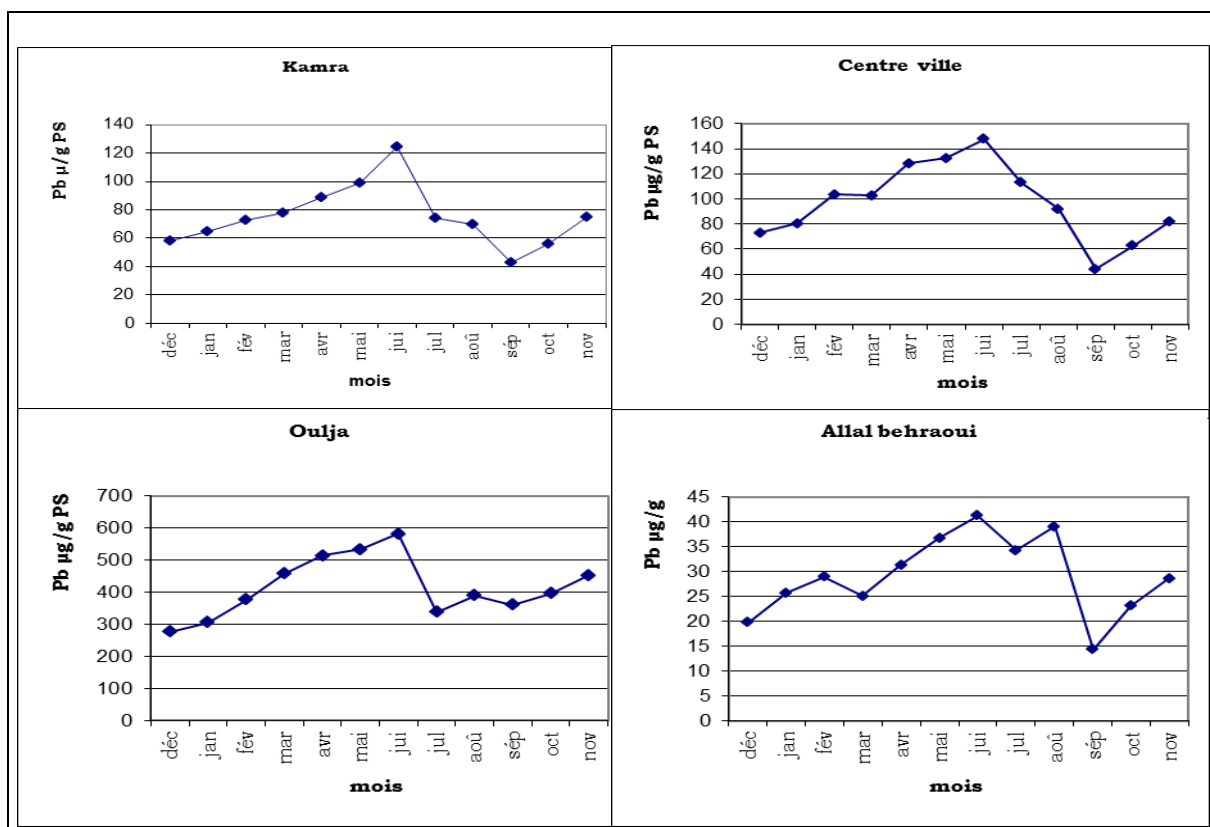


Figure 5 : Variation temporelle des teneurs moyenne en plomb dans les lichens de Rabat Salé (µg/g en poids sec)

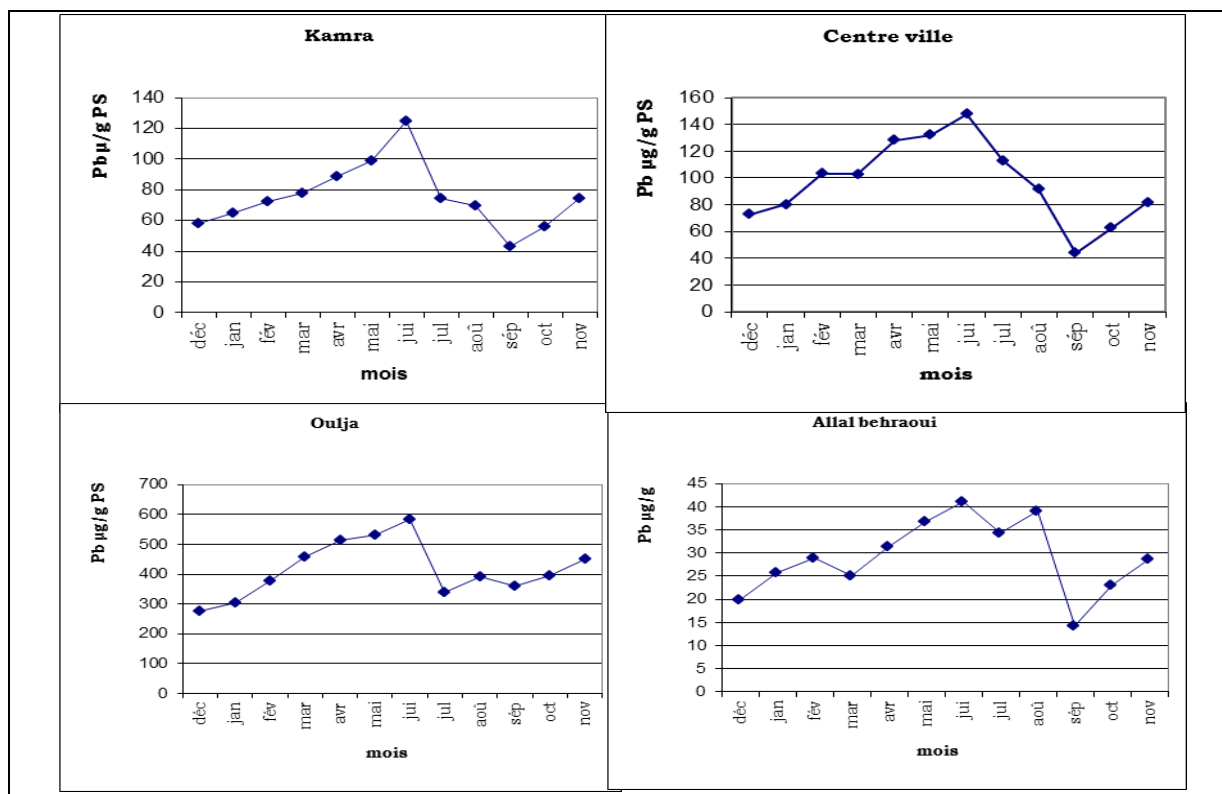


Figure 6 : Variation temporelle des teneurs moyenne en cadmium dans les lichens de Rabat Salé (µg/g en poids sec)

Pour le zinc, il semble que la variation temporelle ne suit pas le même rythme que celle du plomb et le zinc (*Figure 7*). En effet, l'accumulation de n'importe quel élément dans les lichens est liée à ses propriétés chimiques et aux propriétés des particules associées, particulièrement la solubilité. Une étude faite par [36] a prouvé que la fraction des métaux lourds solubles dans le dépôt sec est inférieure à celle dans le dépôt humide, et que le cadmium et le zinc sont beaucoup plus solubles que le plomb dans les deux dépôts sec et humide.

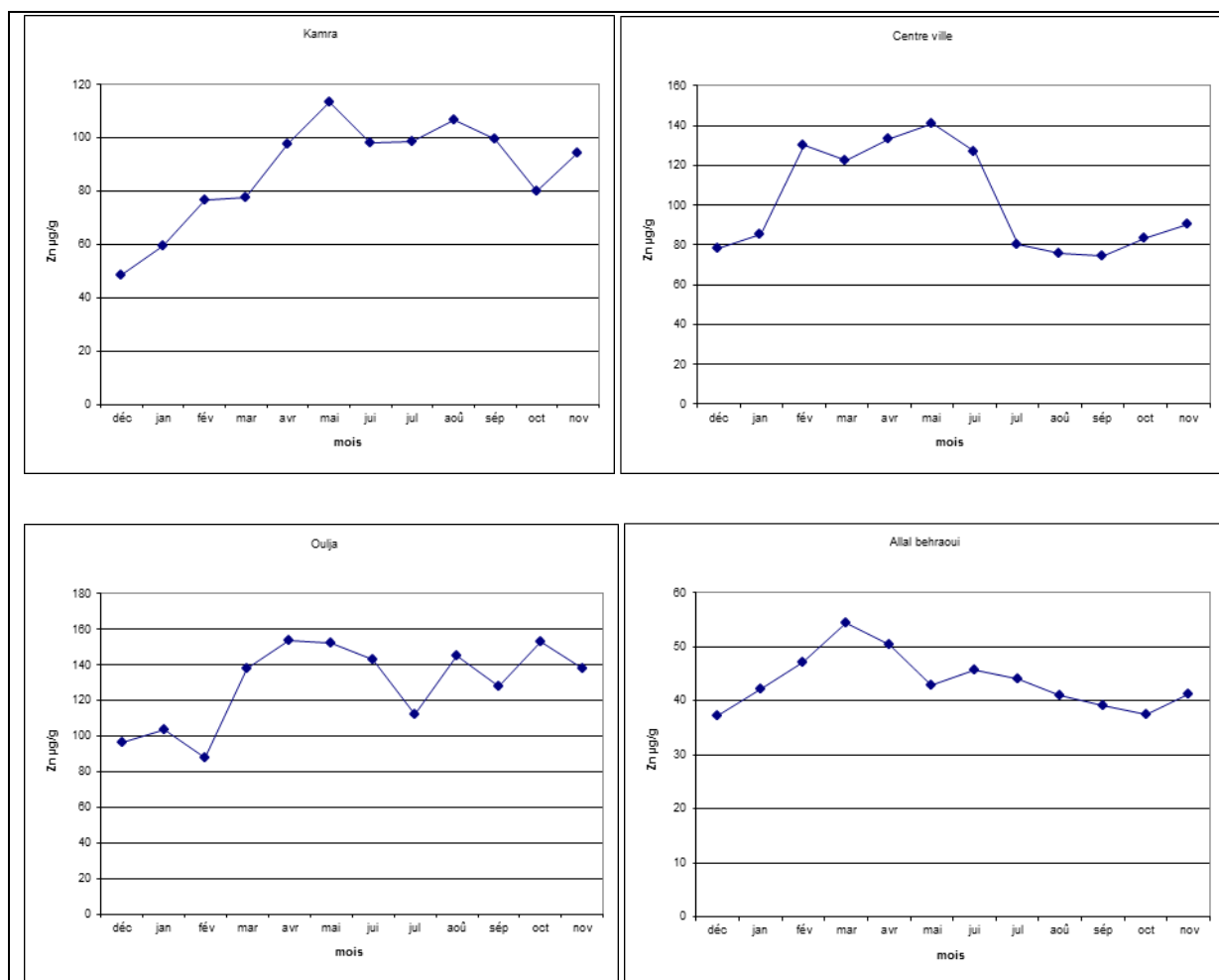


Figure 7 : Variation temporelle des teneurs moyenne en zinc dans les lichens de Rabat Salé ($\mu\text{g/g}$ en poids sec)

3-2. Typologie de la contamination métallique au niveau des lichens

3-2-1. Analyse du graphe de l'ACP dans les lichens

Les codes des relevés effectués sont notés dans le *Tableau 5*, la matrice de est représentée par un tableau de 48 lignes (stations) et 3 colonnes (= teneurs saisonnières des métaux plomb, cadmium et zinc)

Tableau 5 : Codes des prélèvements effectués durant l'année

	Station S1 Kamra	Station S2 Cenre ville	Station S3 Oulja	Station S4 Allal Bhrai
Décembre	S1-1	S2-1	S3-1	S4-1
Janvier	S1-2	S2-2	S3-2	S4-2
Février	S1-3	S2-3	S3-3	S4-3
Mars	S1-4	S2-4	S3-4	S4-4
Avril	S1-5	S2-5	S3-5	S4-5
Mai	S1-6	S2-6	S3-6	S4-6
Juin	S1-7	S2-7	S3-7	S4-7
Juillet	S1-8	S2-8	S3-8	S4-8
Août	S1-9	S2-9	S3-9	S4-9
Séptembre	S1-10	S2-10	S3-10	S4-10
Octobre	S1-11	S2-11	S3-11	S4-11
Novembre	S1-12	S2-12	S3-12	S4-12

3-2-2. Analyse du graphe de l'ACP des lichens

Les résultats montrent que le premier axe F1 extrait 89.6 % de l'inertie, le deuxième (F2) 8.1 % et le troisième axe 2.3 (F3) %, totalisant, donc, 100 % de l'inertie totale, soit la totalité de l'information expliquée sur la distribution des variables et des stations étudiées (**Tableau 6 et Figure 8**).

Tableau 6 : Taux d'inertie et valeurs propres des 3 premiers Axes

	F1	F2	F3
Valeurs propres	2,688	0,242	0,070
Contribution à l'inertie totale (en %)	89,598	8,056	2,345
Contributions cumulées (en %)	89,598	97,655	100,000

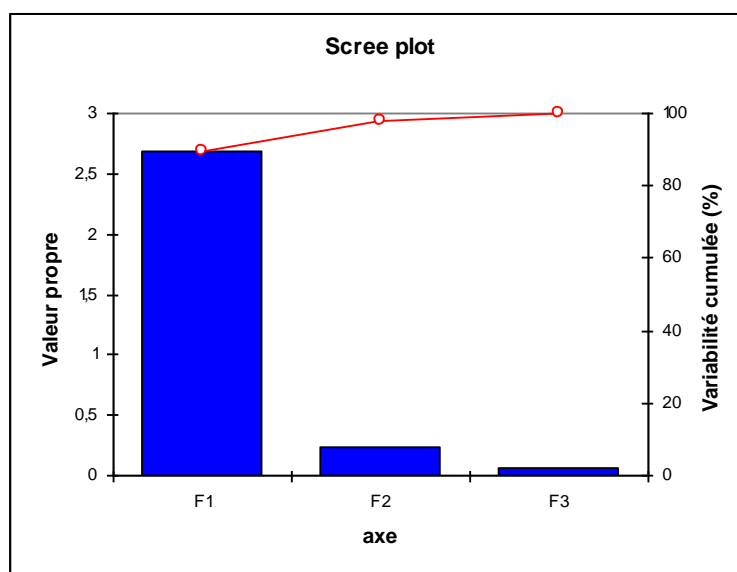


Figure 8 : Valeurs propres des trois axes et leur contribution cumulées à l'inertie totale

Les deux premières composantes principales reconstruisent 97.7 % de la variance totale, nous allons analyser le cercle de corrélations du plan de projection des variables F1xF2. Les contributions des différentes variables dans la constitution des trois premières composantes sont illustrées dans le **Tableau 7**.

Tableau 7 : Codes de l'ACP et corrélations des variables avec les axes

Variables	Codes	Axe F1	Axe F2
Plomb	Pb	0,929	0,356
Cadmium	Cd	0,977	-0,016
Zinc	Zn	0,933	-0,338

Le plan de projection F1xF2 (**Figure 9**) montre que les trois variables sont bien représentées sur le cercle de corrélation. L'axe factoriel F1 se trouve bien corrélé avec les trois variables plomb, cadmium et zinc (tous situés du côté positif de la composante) alors l'axe factoriel F2 est corrélé avec le plomb (situé du côté positif de la composante) et le zinc (situé dans le pôle négatif de la composante).

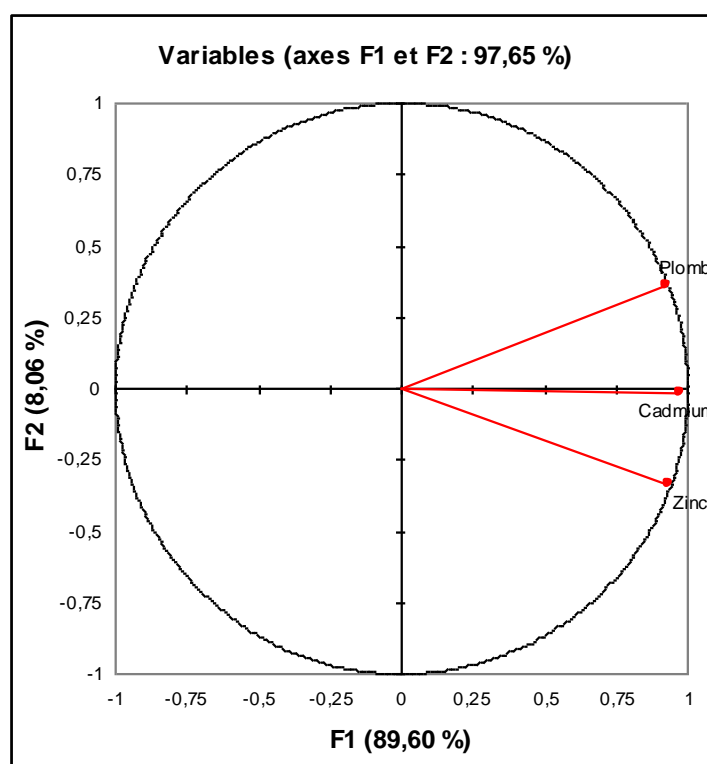


Figure 9 : Cercle de corrélation des variables

3-2-3. Approche graphique selon le plan F1×F2 de l'ACP des métaux les lichens

A cette typologie de variables, correspond une typologie de relevés qui permettra de repérer plus clairement les tendances susceptibles de dominer la situation. L'analyse de la carte factorielle (**Figure 10**) montre l'individualisation de quatre groupes de prélèvements selon leurs degrés de contamination.

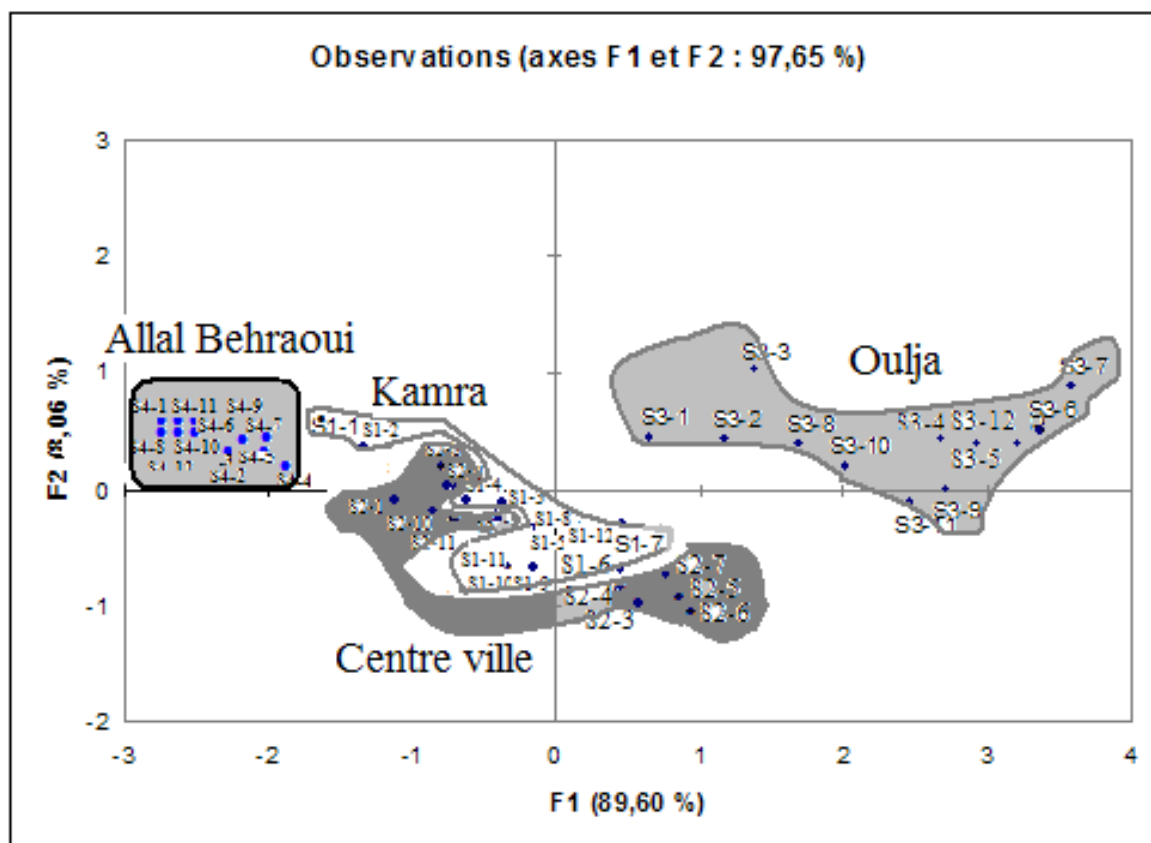


Figure 10 : Distribution des relevés des lichens dans le plan F1xF2

Le premier groupe est le plus contaminé en plomb, cadmium et en zinc. Il est formé essentiellement par les relevés effectués au niveau de la station de Oulja, montrant par-là que les poteries de Oulja représentent la source de contamination la plus importante dans la région en ces éléments traces. Le deuxième groupe et le troisième groupe sont des groupes de contamination moyenne et qui sont formé par les relevés effectués au niveau de la station de Kamra et celle du Centre ville. Le quatrième groupe est un groupe très faiblement contaminé en éléments traces, formé par tous les relevés de la station rurale de Allal Behraoui, confirmant ainsi ce qui a été dit précédemment que les teneurs en plomb, cadmium et zinc au niveau des zones urbaines sont plus élevées que celles des zones rurales.

4. Conclusion

L'analyse des éléments traces métalliques, plomb, cadmium et zinc, réalisée à travers le suivi spatio-temporel de l'atmosphère de la région de Rabat-Salé-Zemmour-Zaër, montre que la variation saisonnière atmosphérique pour ces trois métaux au niveau de tous les sites est très marquée avec des teneurs plus élevées en hiver et des teneurs plus basses en été. En comparaison avec les recommandations de l'organisation mondiale de la santé (OMS), en matière de qualité de l'air pour la protection de la population générale qui fixe comme valeur moyenne annuelle souhaitable $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en plomb atmosphérique à ne pas dépasser, les concentrations moyennes annuelles au niveau du Centre ville et au niveau du complexe artisanal de Oulja Salé dépassent légèrement cette valeur, et en comparaison avec l'étude que nous avons faite en 1996, cette valeur a diminué de 1/3 pour quelques sites, néanmoins cette valeur reste toujours plus élevée que celles trouvées au niveau des pays européens qui nous voient.

Les teneurs en éléments traces métalliques trouvées dans les lichens sont beaucoup plus élevées dans la zone urbaine que rurale, mais il faut signaler que ces teneurs sont plus élevées dans les lichens cela montre bien l'efficacité des lichens d'absorber des polluants métalliques pour être utilisés comme bio indicateur de la pollution atmosphérique. Cette étude nous a montré que le trafic routier et les poteries constituent une source importante de pollution métallique par le plomb, cadmium et zinc de l'environnement de Rabat-Salé-Zemmour-Zaër. ils sont issus des gaz d'échappement, de l'usure des garnitures de freins, des pneumatiques et des rejets des poteries de Oulja qui utilisent des poudres contenant des concentrations très élevées en plomb, cadmium et zinc. Ces polluants peuvent être véhiculés par le vent, et contaminer notablement l'atmosphère de la région.

Références

- [1] - A. Elabidi, L. Idrissi, H. Taleb, A. Azizi, O. Mameli et P. Melis, "The impact of lead pollution on the environment of Rabat-Salé (Morocco)", *Annali di Chimica*, 90 (2000) 695–702.
- [2] - R. Bargagli, "Lichen as biomonitors of airborne trace elements. In: R. Bargagli, (eds.) Trace elements in Terrestrial Plants-an Echo physiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery. Springer-Verlag Berlin Heidelberg", New York, (1998) pp. 179–206.
- [3] - G. Sarret, A. , D. Cuny, C. Van Haluwyn, S. Deruelle, J.-L. Hazemann, Y. Soldo, L. eybert-B erard and J.J. Menthonnex, "Mechanisms of lichen resistance to metallic pollution", *Environ. SCI Technol*, 32 (1998) 3325–3330.
- [4] - J. Garty, "Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: theory and application". *Crit Rev. Plant Sci*; 20 (2001) 309–71.
- [5] - V. Pandey, D.K. Upreti, R. pathak and A. Pal, "Heavy metal accumulation in lichens from the Hetauda industrial area Narayani Zone Makwanpur district, Nepal", *Environmental Monitoring and Assessment*, 73 (2002) 221–228.
- [6] - Z. Jeran, R. Jacimovic, F. Bati, and R. Mavsar, "Lichens as integrationg air pollution monitors" *Environ. Pollut.*, 120 (2002) 107-113
- [7] - M. Yun, H. P. Longerich and M. A. Wadleigh, "the determination of 18 trace elements in lichens for atmospheric monitoring using inductively coupled plasma—mass spectrometry. *Can. J. Anal. Sci. Spectros.* 48 (2003) 171–180.
- [8] - S. Nayaka, D.K. Upreti, M. Gadgil, V. Pandey, "Distribution pattern and heavy metal accumulation in lichens of Bangalore city with special reference to Lalbagh garden", *Curr. Sci.* 84 (2003) 674–680.
- [9] - S. S. Stamenkovic, T. L.J. Mitrović, V. J. Cvetković, N. S. Krsti, R. M. Baosic, M. S. Markovic, N. D. Nikolic, V. Markovic, M. Ljand, V. Cvijan, "Biological indication of heavy metal pollution in the areas of donje vlase and cerje (southeastern serbia) using epiphytic lichens", *Arch. Biol. Sci., Belgrade*, 65:(1) (2013) 151–159.
- [10] - J. E. Sloof, "Lichens as quantitative biomonitors for atmospheric trace-element deposition, using transplants", *Atmos. Environ.*, 29 (1995) 11–20.
- [11] - T. H. Nash, "Lichen Biology", *Cambridge University Press, New York*, (1996).
- [12] - D. Auger, "Méthode de dosage du plomb, cadmium, cuivre et zinc dans les milieux biologiques". *Direction de l'environnement et de recherches océaniques*, DERO-89-07-MR. (1989).
- [13] - DORM-2 Dogfish Muscle and Liver. Certified Reference Materials for Trace Metals. Conseil national de recherches Canada.
- [14] - IAEA 1997. World-Wide Intercomparison exercise for the determination of trace elements and in Fucus. Sample IAEA-140). UNEP-IOC. Report N° .64.

- [15] - IAEA 2004. World-Wide Intercomparison exercise for the determination of trace elements. Sample IAEA-433). UNEP-IOC. Report N° 75.
- [16] - S. Foucart, Analyse factorielle. Programme sur ordinateur. Masson, Paris, France, (1982).
- [17] - D. Cuny, L. Davranche, P. Thomas, C. Van Haluwyn, M. Kempa, M. Dossin & J.P. Silvie, "Cartographie de la contamination métallique dans les thalles de lichens *Xanthoria parietina*, sur la pollution dunkerquois". Rapport de l'APPA Nord-Pas de Calais 11 pages (2002).
- [18] - D. Cuny, S. Quarre, I. Devred, B. Jeanne, A. Reynaert et M.A. Rzepka-Cuny, "Evolution spatiale et temporelle des concentrations en éléments traces métalliques de thalles de *xanthoria parietina* récoltes sur la zone industrialo-portuaire de dunkerque"(2009), *Air pur*, N° 77.
- [19] - L. A. Di Lella, L. Frati, S. Loppi, G. Protano and F. Riccobono, "Environmental distribution of uranium and other trace elements at selected Kosovo sites", *Chemosphere*. 6 (2004) 861–865.
- [20] - S. M. Allen-Gil, J. Ford, B. K. Lasorasa, M. Monetti, T. Vlasova & D. H. Landers, "Heavy metal contamination in the Taimyr Peninsula Siberian Arctic.", *Sci. Total Environ*, 201 (2003) 119–138.
- [21] - R. Bargagli & I. Mikhailova, "Accumulation of inorganic contaminants. In: Nimis, P.L., Scheidegger, C., Wolseley, P. (Eds.). Monitoring with Lichens - Monitoring Lichens", *Kluwer/NATO Science Series, Dordrecht*, pp. 65-84. (2002).
- [22] - J. Chiarenzelli, L. Aspler, C. Dunn, B. Cousins, D. Ozarko & K. Powis, "Multi-element and rare-earth element composition of lichens, mosses, and vascular plants from the Central Barrenlands, Nunavut, Canada", *Appl. Geochem*. 16 (2001) 245–270.
- [23] - F. Riget, G. Asmund, and P. Aastrup, "The use of lichen (*Cetraria nivalis*) and moss (*Racomitrium lanuginosum*) as monitors for atmospheric deposition in Greenland", *Sci. Total Environ*. 245 (2000) 137–148.
- [24] - P. L. Nimis, G. Lazzarin, A. Lazzarin and N. Skert, "Biomonitoring of trace elements with lichens in Veneto N.E. Italy", *Sci. Total Environ.*, 255 (2000) 97–111.
- [25] - O.H. Ng, B.C. Tan and J.P. Obbard, "Lichens as bioindicators of atmospheric heavy metal pollution in Singapore", *Environ. Monit. Assess*, 123 (2005) 63-74.
- [26] - L. Bergamaschi, E. Rizzioa, G. Giaveria, S. Loppib and M. Gallorinia, "Comparison between the accumulation capacity of four lichen species transplanted to a urban site", *Environmental Pollution*, 148 (2007) 468–476.
- [27] - R. Scerbo, T. Ristori, L. Possenti, L. Lampugnani, R. Barale and C. Barchigiani, "Lichen (*Xanthoria parietina*) biomonitoring of trace element contamination and air quality assessment in Pisa Province (Tuscany, Italy)". *Sci. Total Environ.*, 286 (2002) 27–40.
- [28] - M. El Morhit, M. Fekhaoui, A. El Abidi, A. Yahyaoui et A. Hamdani, "Impact des activités humaines sur la dégradation de la qualité des sédiments de l'estuaire de Loukkos (Maroc)", *D.S.T*, 61 (2011) 8–17.
- [29] - F.Z. Ouali Alami, A. El Abidi, M. Fekhaoui et A. Serghini, "Évaluation de la Contamination par le Cadmium, le Zinc et le Plomb du sol de la région de Rabat-Salé-Zemmour-Zaër(Maroc)". *ScienceLib Editions Mersenne*, 5 (2013) 2111-4706.
- [30] - F. Kaldi, H. Djebbar, R. Rouabhi and M. R. Djebbar, "Cellular Response of a Pollution Bioindicator Model (*Ramalina farinacea*) Following Treatment with Fertilizer (NPKs)". *American-Eurasian Journal of Toxicological Sciences*, 1 (2) (2009) 69-73.
- [31] - D.H. Brown, "The location of mineral elements in lichens: implications for metabolism", *Bibl. Lichenol*; 25 (1987) 361–75.

- [32] - K. Boonpragob & T.H. Nash, "Seasonal variation of elemental status in the lichen *Ramalina menziesii* Tayl. from two sites in southern California : evidence for dry deposition accumulation", *Environmental and Experimental Botany*, 30 (1990) 415–428.
- [33] - D.H. Brown & R.M. Brown, "Mineral cycling and lichens: the physiological basis. *Lichenologist*", 23 (1991) 293-307.
- [34] - T.H. Nash et C. Gries, "The use of lichens in atmospheric deposition studies with an emphasis on the Arctic", *Science of the Total Environment*. 160 (1995) 729-736.
- [35] - J.M.H. Knops, T.H. Nash, V.L. Boucher and W.L. Schlesinger, "Mineral cycling and epiphytic lichens: implications at the ecosystem level", *Lichenologist*. 23 (1991) 309-321.
- [36] - L. Morselli, P. Olivieri, B. Brusori et F. Passarini, "Soluble and insoluble fractions of heavy metals in wet and dry atmospheric depositions in Bologna, Italy", *Environmental Pollution*. 124 (2003) 457-469.