

L'accumulation des métaux lourds au niveau des cultures : cas des cultures maraîchères du bassin de Sebou au Maroc

Ouafae BOUCHOUATA^{1,5*}, Hanae OUADARRI², Abdallah ABIDI³,
Asmae BENABBOU, Youssef EL GUAMRI⁶, Benaïssa ATTARASSI⁵ et Jaafar BRAHIM

¹Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Araar, Ryad, Rabat

²Centre National de la Recherche Scientifique et Technique, Angle Allal Fassi, Riad, Rabat

³Laboratoire de toxicologie et d'hydrobiologie. Institut National Hygiène, Agdal, Rabat

⁴Université Mohammed V – Agdal, Institut Scientifique, Département de Zoologie et Ecologie animale, Av. Ibn Batouta, B.P. 703 Agdal, Rabat

⁵Laboratoire de Microbiologie Appliquée. Laboratoire de Biologie et Santé, Faculté des Sciences, Kénitra

⁶Laboratoire Environnement & Energies Renouvelables, Equipe: Environnement, Patrimoine & Santé ; Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail, B.P. 133, 14000 Kénitra, Maroc

* Correspondance, courriel : ouafae_enviro@yahoo.fr

Résumé

Le Bassin de Sebou présente une importance socio-économique pour le Maroc. En effet, il est sujet de diverses utilisations ; eau potable, eau d'irrigation et eau industrielle. Toutefois, ce bassin subit des pressions multiples, notamment par la pollution métallique. Considérant le risque de bioaccumulation des métaux par les cultures, base de la chaîne alimentaire, cette étude a été conduite pour évaluer la charge métallique au niveau dudit Bassin. Elle a porté sur les trois supports; eau d'irrigation, sols agricoles et cultures maraîchères dont les graines (blé, maïs), fruits (courgette), feuilles (laitue) et racines (navet). C'est ainsi que ces échantillons ont été prélevés durant la période 2006-2010 et les sept éléments métalliques Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb et Zn ont été analysés par ICP.

Les résultats obtenus ont révélé des concentrations faibles à moyennes dépassant parfois les normes requises notamment pour le Cr et le Cd. L'origine possible de cette charge métallique peut être les rejets urbains et particulièrement industriels, notamment ceux des activités artisanales outre l'activité agricole intense et ses pratiques inappropriées.

Mots-clés : *bassin de Sebou, pollution métallique, métaux lourds, cultures maraîchères.*

Abstract

Bioaccumulation of heavy metals by crops in Sebou basin (Sebou River)

Sebou Basin presents a social and economical importance for Morocco. Sebou River is one of the biggest Moroccan rivers, its water is mainly used for water supply, irrigation, it also covers other needs and many industries use the river as a sewer for dumping untreated waste. Thus, this basin knows lots of pollution, especially metallic pollution.

Considering the risk of bioaccumulation of metals by crops, the basis of the food chain, this study was conducted to evaluate the metal charge in Sebou Basin. It concerns irrigation water, soil and crops including fruit (zucchini), leaves (lettuce), grains (wheat and maize), and roots (turnips). Thus samples were collected from July 2006 to July 2010. The analysis was performed by ICP and concerned seven metallic elements Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb and Zn.

The heavy metals contents measured revealed to be below the critical levels in general but showed some concentrations exceeding the required standards, especially for Cd and Cr which suggests metallic pollution. This metallic pollution might be due to the industrial activities, especially craft activities in addition to high farming and inappropriate agriculture practices.

Keywords : *Sebou water shad, metallic pollution, heavy metals, crops.*

1. Introduction

Le développement humain a toujours été à l'origine du progrès accompli, mais il n'en va pas sans impacts. Certes, L'homme a toujours été au contact des métaux de son environnement naturel, avant d'en faire la matière première de ses outils. Toutefois, au XX^{ème} siècle sont apparues des pollutions d'origine industrielle, domestique et agricole, liées à l'augmentation massive de la production des métaux [1]. A titre indicatif, l'industrie de tannage utilise 6 000 tonnes de peau de bovin annuellement dont 90 % à base de chrome dans le processus, provoquant la contamination de 11 millions m³/an d'eau. Dans les meilleurs cas de pratiques, cette eau contiendrait environ 0,22 Mt de sel de Chrome [2]. On estime par ailleurs l'apport des métaux aux sols dans le monde à 22 000 tonnes de cadmium, 939 000 tonne de cuivre, 783 000 tonnes de plomb, et 1 350 000 tonnes de zinc [3].

Le déversement direct des eaux usées dans le milieu récepteur a des conséquences graves sur la qualité de l'eau et les impacts se font ressentir au-delà de la zone de contamination [4]. En effet, la contamination de l'eau finit dans le sol et multiplie ainsi les risques potentiels d'intoxication au niveau de tous les maillons de la chaîne alimentaire notamment les cultures [5 - 6]. Elle impacte la santé des êtres humains et des animaux [7] et réduit la croissance des plantes [3, 8, 9].

La situation est d'autant plus critique pour le Maroc, pays dont les ressources en eaux de plus en plus rare sont soumises à la dégradation de leur qualité. Parmi les ressources en eau douce menacées, le Bassin de Sebou qui constitue une source d'alimentation en eau d'irrigation d'une zone agricole nationale de près de 162 755 Ha [10] et recèle 30 % de la ressource globale nationale [11]. En effet, il reçoit une charge d'éléments métalliques dépassant 40 t/an provenant essentiellement des industries artisanales estimées à pas moins de 2000 unités [12]. Par conséquent, toute la pollution drainée le long de cette rivière est transférée dans les sols à travers les eaux d'irrigation et par suite dans les cultures et ainsi à l'homme. Le danger réside dans le caractère de concentration et de bioaccumulation dans la chaîne alimentaire et la contribution à la toxicité chronique [13 - 14].

Par ailleurs, l'étude du coût de dégradation de la qualité de l'eau du bassin de Sebou révèle que la pollution occasionne une perte économique évaluée à environ 2 Mrds Dirham/an, et estime à près de 6000 personnes exposées à la pollution industrielles au sein des unités concernées [12] d'où l'importance de cette étude qui se propose d'évaluer les concentrations métalliques au niveau des eaux d'irrigation, des sols agricoles et des cultures.

2. Méthodes et matériel

2-1. Zone d'étude

Situé au Nord-Ouest du Maroc, le bassin versant de l'Oued Sebou dispose d'une façade atlantique très réduite, ce bassin draine les versants Sud de la chaîne montagneuse du Rif et ceux du Nord-Ouest de celle du moyen Atlas. Il est limité au Nord par les bassins versants du Loukkos et des Côtiers Méditerranéens ; à l'Est par le bassin de la Moulouya et au Sud par les bassins de Bouregreg et d'Oum Er Rbia.

Le bassin du Sebou comprend des centres urbains répartis sur 6 régions et 18 provinces, son réseau hydrographique est bien développé autour de l'oued Sebou et ses principaux affluents : Ouergha, Inaouène, Beht et Mikkès ce qui fait de la région un pôle de développement industriel et agricole important [12].

Pour notre étude, les sites de prélèvement ont été choisis compte tenu des orientations de l'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou, ils sont définis dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Coordonnées géographiques des sites étudiés

Sites	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Erreur (m)
(PP)	N 34 05 241	W 004 89 419	200	5
(DA)	N 34 19 453	W 004 92 804	141	5
(MN)	N 34 37 110	W 006 52 990	2	4

Pour la réalisation de ce travail et tenant compte des diverses activités recensées dans la zone (industries agro-alimentaire, pêcheries, eaux usées domestiques et agricoles), trois sites, réparties le long du bassin, ont été retenues et définies comme suit (**Figure 1**):

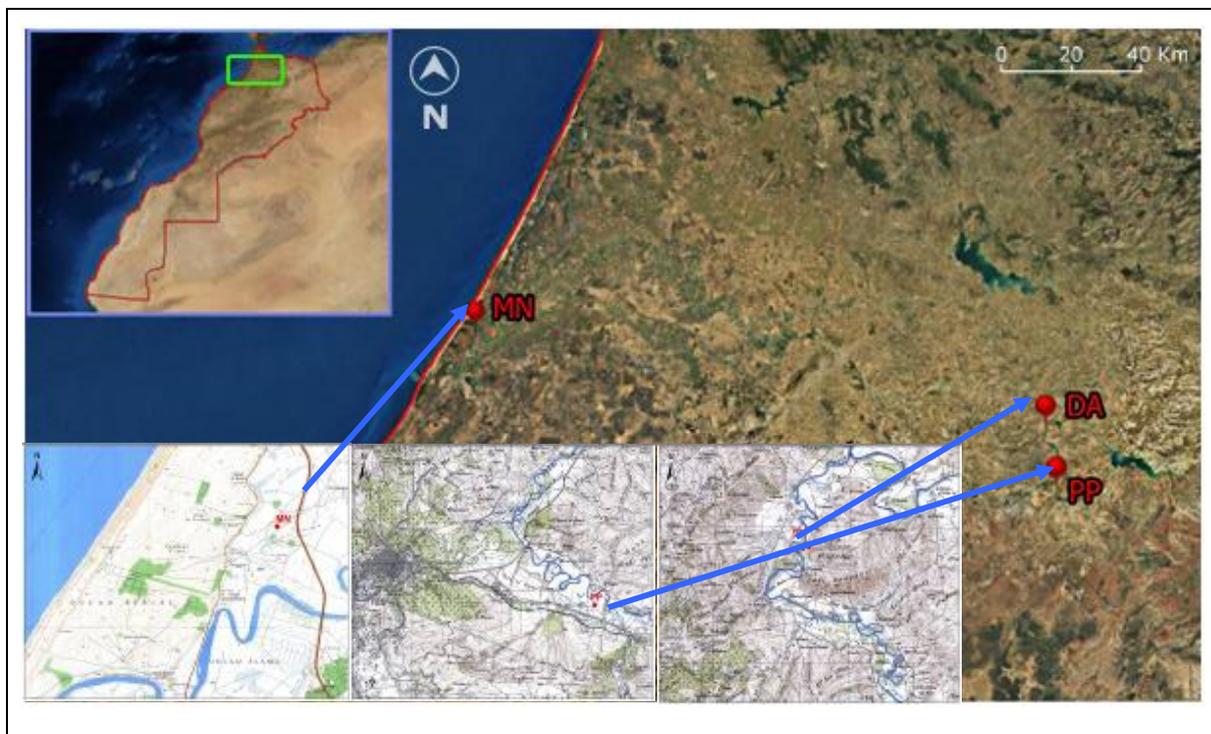


Figure 1 : Localisation des sites d'études sur le bassin de Sebou

- **Pont Portugais (PP)** : localisé en amont de la confluence de l'oued Fès avec le Sebou sur la Route Nationale numéro 6 à 12 Km de la ville empruntant la route vers Sidi Hrazem.
- **Dar Arsa (DA)** : représenté par les eaux du Sebou juste après les rejets de la ville de Fès à environ 40 Km, sur la route nationale numéro 12 vers tissa Taounate.
- **Mnasra (MN)** : situé au niveau du Gharb sous forme d'une bande longeant la méditerranée vers l'embouchure du Sebou au niveau de l'océan Atlantique.

2-2. Prélèvement des échantillons (eaux d'irrigation, sols agricoles et cultures)

Cinq campagnes de prélèvement ont été effectuées entre juillet 2006 et juillet 2010 et ont concernées trois supports ; eau d'irrigation, sol agricole et cultures au niveau des trois sites précités. Le choix des échantillons cultures a porté principalement sur les cultures disponibles et très consommées par la population.

L'eau d'irrigation est prélevée dans des bouteilles stériles préalablement rincées avec l'échantillon, elle est additionnée de 2,5 ml d'acide nitrique (65%). Pour 45 échantillons de sol, environ 500 g de ces échantillons est prélevé le long d'une diagonale en trois à quatre prises, mélangés et mis dans un sachet stérile puis conservé à 4°C. Enfin les échantillons cultures sont prélevés délicatement à la main, mis dans des sachets stériles et conservés à 4°C.

2-3. Minéralisation des sols agricoles et des cultures

Le sol et les cultures ont fait l'objet d'une préparation préalable avant la minéralisation ; 1g de l'échantillon est mis au four (Thermo) pendant 20h à 100°C pour éliminer l'humidité. Par la suite l'échantillon est broyé (Retch PM 200) et tamisé (maille inférieure à 100 µm).

150 mg de l'échantillon du sol est traité selon un processus du Centre National de la Recherche Scientifique et Technique (CNRST) par l'HNO₃, l'HF et l'HCL.

En ce qui concerne les cultures ; 2 mg du matériel végétal est séché et traité selon un procédé par l'acide nitrique le Fluorure d'hydrogène et le peroxyde d'hydrogène.

Les dosages des métaux dans les trois supports ont été effectués sur les minéralisés après dilution. Les éléments métalliques Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb et Zn ont été dosés par La spectrométrie d'émission à source plasma (ICP).

Avant chaque analyse, l'appareil est calibré par des solutions étalons certifiés pour tracer la courbe d'étalonnage (étalons Précis de 1000 ppm). Pour les cultures, on a utilisé des matériaux de référence MRC.

2-4. Analyse statistique

L'examen des teneurs des eaux, des sols et des cultures en métaux a été effectué par Analyse en Composantes Principales (ACP). Elle a concernée les sept variables Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb et Zn. Cette méthode a été réalisée avec du logiciel XL STAT [15].

3. Résultats

3-1. Typologie de la contamination métallique au niveau des trois supports étudiés

L'analyse multifactorielle (ACP) nous a permis de classer et de traiter les informations relatives aux éléments métalliques au niveau des trois supports, eaux, sols et cultures par l'établissement des corrélations entre l'ensemble des variables.

Analyse du graphe de l'ACP dans l'eau d'irrigation

Les résultats des différents échantillons analysés de l'eau d'irrigation des différents sites sont présentés dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : *Teneurs Moyennes (M) exprimées en µg/l et corrélations des variables avec les axes dans les eaux d'irrigation au niveau des sites PP, DA et MN.*

	PP			DA			MN			WHO (2006)	N.N.E.I
	F1	F2	M	F1	F2	M	F1	F2	M		
Cd	0,92*	-0,35	1,95	0,78*	0,35	3,22	0,99*	0,06	11,12	3	10
Cr	0,60	0,73*	11,90	0,95*	-0,18	47,74	0,99*	0,06	119,5	50	100
Cu	0,96*	0,24	15,75	0,99*	0,09	27,95	0,96*	0,12	14,15	1000	200
Fe	0,95*	0,29	298,6	0,76*	-0,61	485,57	-0,29	-0,6*	172,65	300	5000
Ni	-0,7*	0,44	4,07	0,86*	0,39	11,6	-0,24	0,93*	8,12	-	200
Pb	-0,01	0,99*	4,23	0,43	0,87*	5	0,97*	0,20	19,22	10	5000
Zn	-0,36	0,78*	10	0,84*	-0,52	35,02	-0,47	0,85*	14,7	3000	2000

Pour l'eau, la matrice de données est formée de 15 relevés; 5 campagnes étalées sur la période 2006-2010 et ayant concernées les trois sites étudiés.

Analyse du graphe de l'ACP de l'eau d'irrigation au niveau du PP

Les valeurs propres des deux axes factoriels F_1 et F_2 et leur contribution à l'inertie totale déterminent 81,29 % de l'information totale à raison d'une inertie de 53,51 % et 37,67 % respectivement pour lesdits axes (**Figure 2A**). Une première approche typologique des différentes variables selon leurs affinités et regroupements sur les deux premières composantes principales est aussi présentée au niveau de la même figure.

La décomposition de la variabilité montre que l'axe F_1 prend en compte les variables Fe, Cu et Cd du côté positif et le Ni du côté négatif. Alors que l'axe F_2 prend en compte le Pb, le Zn et le Cu. Sur le cercle de corrélation (**Figure 2B**) apparaît le même comportement avec une bonne corrélation Cu-Fe ($r^2=0,99$), Cu-Cd ($r^2=0,79$) et Pb-Zn ($r^2=0,78$).

La projection des coordonnées de ces variables sur les plans des deux premières composantes principales ($F_1 \times F_2$), illustrées par le cercle de corrélation fait apparaître les affinités des variables vis-à-vis de chacun des deux axes. A cette typologie de variables, correspond une typologie de relevés. Ainsi, la carte factorielle (**Figure 2C**) montre l'individualisation d'un seul groupe représenté par les relevés de toutes les campagnes excepté celle de 2009 témoignant d'une situation intermédiaire.

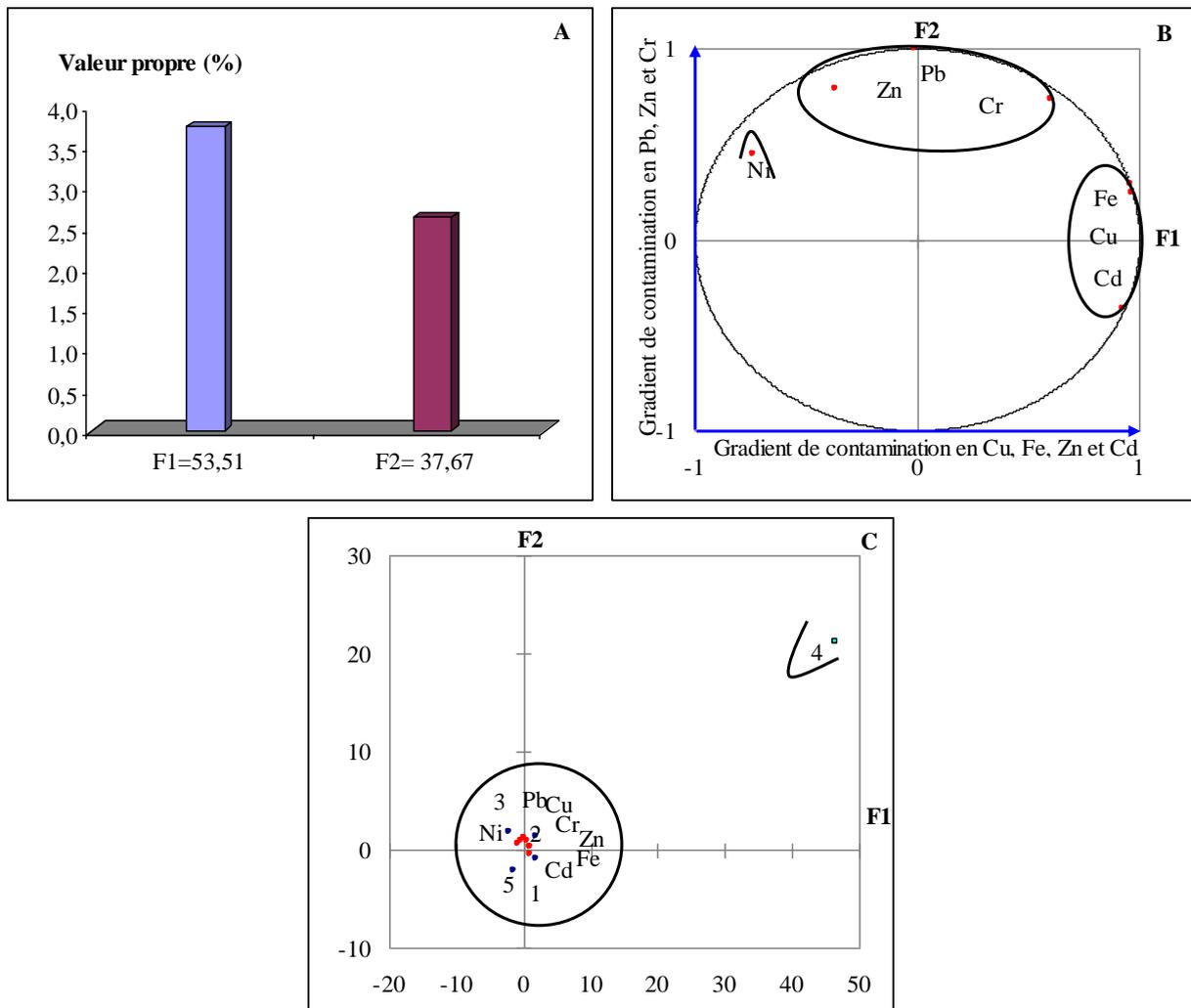


Figure 2 : Approche graphique selon le plan $F_1 \times F_2$ de l'ACP des métaux dans les eaux du PP

Analyse du graphe de l'ACP de l'eau d'irrigation au niveau de DA

Les valeurs propres des deux axes factoriels F_1 et F_2 et leur contribution à l'inertie totale sont représentées au niveau du **Tableau 2**. Celles-ci déterminent 92,58 % de l'information totale à raison d'une inertie de 67,89 % et 24,69 % respectivement pour F_1 et F_2 . Une approche typologique des différentes variables (F_1 et F_2) selon leurs affinités et regroupements sur les deux premières composantes principales est présentée au niveau de la **Figure 3A**.

La décomposition de la variabilité montre que l'axe F_1 prend en compte les variables Cd, Ni, Cu, Cr, Zn et Fe et définit un gradient de contamination croissant de gauche à droite. Alors que l'axe F_2 prend en compte le Pb du côté positif (**Figure 3B**). Sur le même cercle de corrélation apparaît clairement le même comportement avec une très bonne corrélation Cr-Cu ($r^2=0,94$) et Fe-Zn ($r^2=0,99$), suivi d'une bonne corrélation Cr-Fe, Cu-Cd et Cd-Cr avec respectivement $r^2=0,81$, $0,81$ et $0,9$.

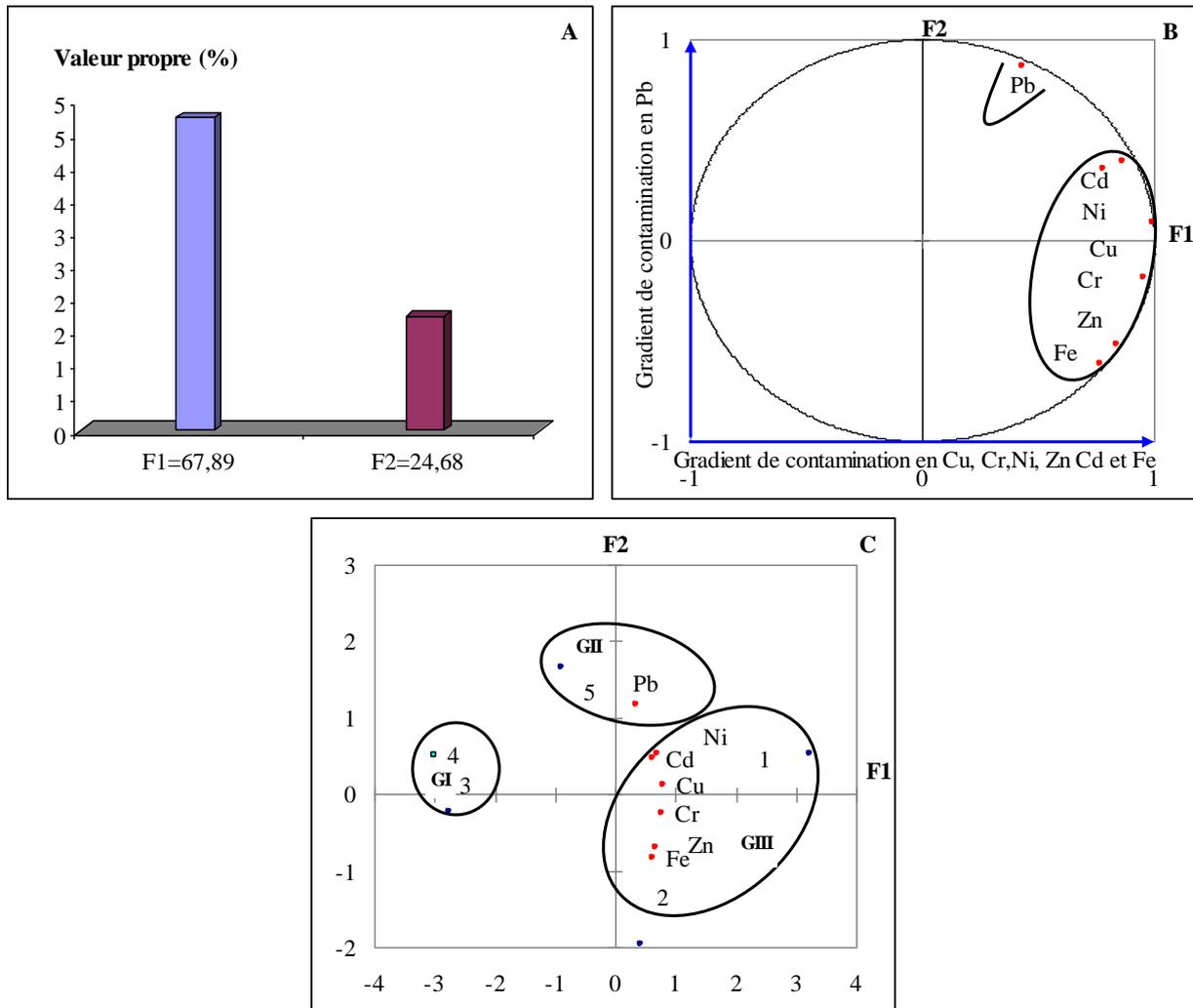


Figure 3 : Approche graphique selon le plan F1×F2 de l'ACP des métaux lourds des Eaux

A cette typologie de variables, correspond une typologie de relevés et l'analyse de la carte factorielle (**Figure 3C**) montre l'individualisation des trois groupes suivants : le groupe I représenté par les campagnes 3 et 4 relatives aux années 2008 et 2009 dont les eaux ne présentent pas de richesse particulière, le groupe II représenté par les relevés de la campagne 5 relative à l'année 2010, dont les eaux se caractérisent par une richesse en Pb et le groupe III représenté par les relevés des campagnes 1 et 2 relatives aux années 2006 et 2007 montrant une concentration prononcée en Cd, Cr, Cu, Fe, Ni et Zn.

Analyse du graphe de l'ACP de l'eau d'irrigation au niveau de MN

Les valeurs propres des deux axes factoriels F1 et F2 et leur contribution à l'inertie totale sont représentées dans le **Tableau 2**. Celles-ci déterminent 90,42 % de l'information totale à raison d'une inertie de 60,65 % et 29,76 % (**Figure 4A**) respectivement pour lesdits axes.

La décomposition de la variabilité montre que l'axe F₁ prend en compte Cd, Cr, Cu et Pb alors que l'axe F₂ prend en compte Ni et Zn du côté positif et Fe du côté négatif (**Figure 4B**). Sur le cercle de corrélation apparaît clairement le même comportement avec une très bonne corrélation Cd-Cr ($r^2=0,999$), Cd-Cu ($r^2=0,98$), Pb-Cr ($r^2=0,98$), Pb-Cd ($r^2=0,98$) et Ni-Zn.

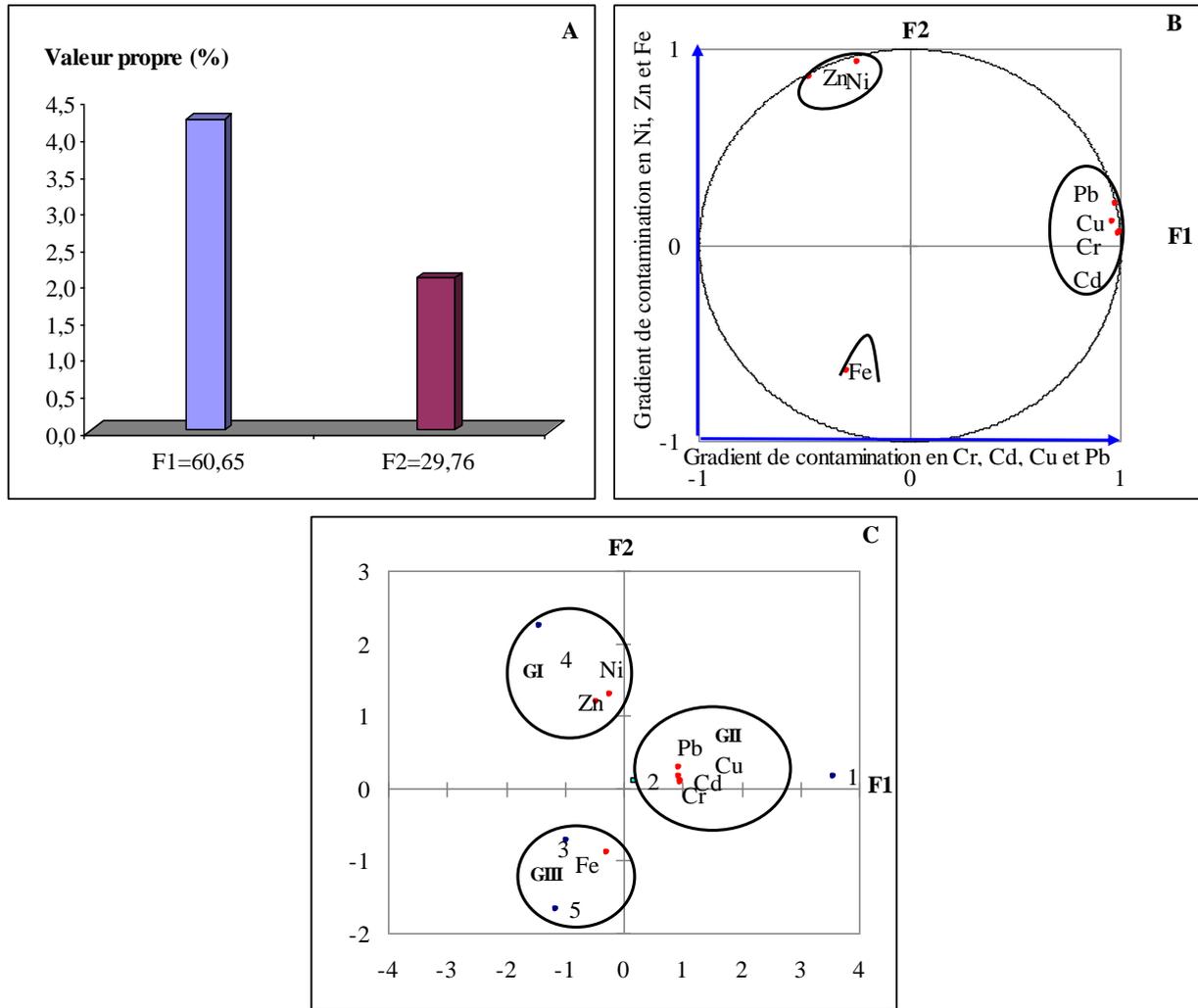


Figure 4 : Approche graphique selon le plan $F1 \times F2$ de l'ACP des métaux lourds des eaux MN.

A cette typologie de variables, correspond une typologie de relevés. L'analyse de la carte factorielle (**Figure 4C**) montre l'individualisation des trois groupes de prélèvement suivants : le groupe I représenté par les relevés de la 4^{ème} campagne relative à l'année 2009 et dont les eaux se caractérisent par une richesse en Ni et Zn, le groupe II représenté par les relevés des campagnes 3 et 5 relatives aux années 2008 et 2010, dont les eaux se caractérisent par une richesse en Fe et le groupe III représenté par les relevés de la campagne 2 relative à l'année 2007, dont les eaux se caractérisent par une contamination prononcée en Cd, Cr, Cu et Pb.

Typologie de la contamination métallique des sols

Les résultats des différents échantillons analysés des sols dans les différents sites sont présentés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Teneurs Moyennes (M) exprimées en $\mu\text{g/g}$ du poids sec et corrélations des variables avec les axes dans les sols agricoles au niveau des sites PP, DA et MN.

	PP			DA			MN			INRA (2000)
	F1	F2	M	F1	F2	M	F1	F2	M	
Cd	-0,24	-0,23	0,31	0,55*	-0,1	0,45	0,10	0,90*	0,44	0,41
Cr	0,88*	-0,18	22,57	0,55	0,59	29,87	0,85*	-0,10	26,12	58,2
Cu	0,41	0,74*	56,6	-0,5	0,21	34,70	0,71*	-0,35	38,56	19,1
Fe	0,28	0,82*	7895,9	0,27	0,70	11966,3	0,74*	-0,05	12964,6	-
Ni	0,88*	-0,30	14,56	0,82	0,23	26,89	0,93*	0,22	14,62	30,4
Pb	0,73*	-0,20	8,50	-0,3	0,83	10,41	0,81*	0,44	7,81	41,3
Zn	-0,6*	0,03	78,91	-0,7	0,49	48,26	0,86*	-0,32	25,36	103

L'analyse est réalisée sur la matrice de données formée de 45 relevés ; 5 campagnes ont été effectuées entre 2006 et 2010 au niveau des trois sites à raison de trois prélèvements par site et par campagne.

Analyse du graphe de l'ACP du Sol au niveau du PP

Les valeurs propres des deux axes factoriels F₁ et F₂ et leur contribution à l'inertie totale sont reportées dans la **Figure 5A**.

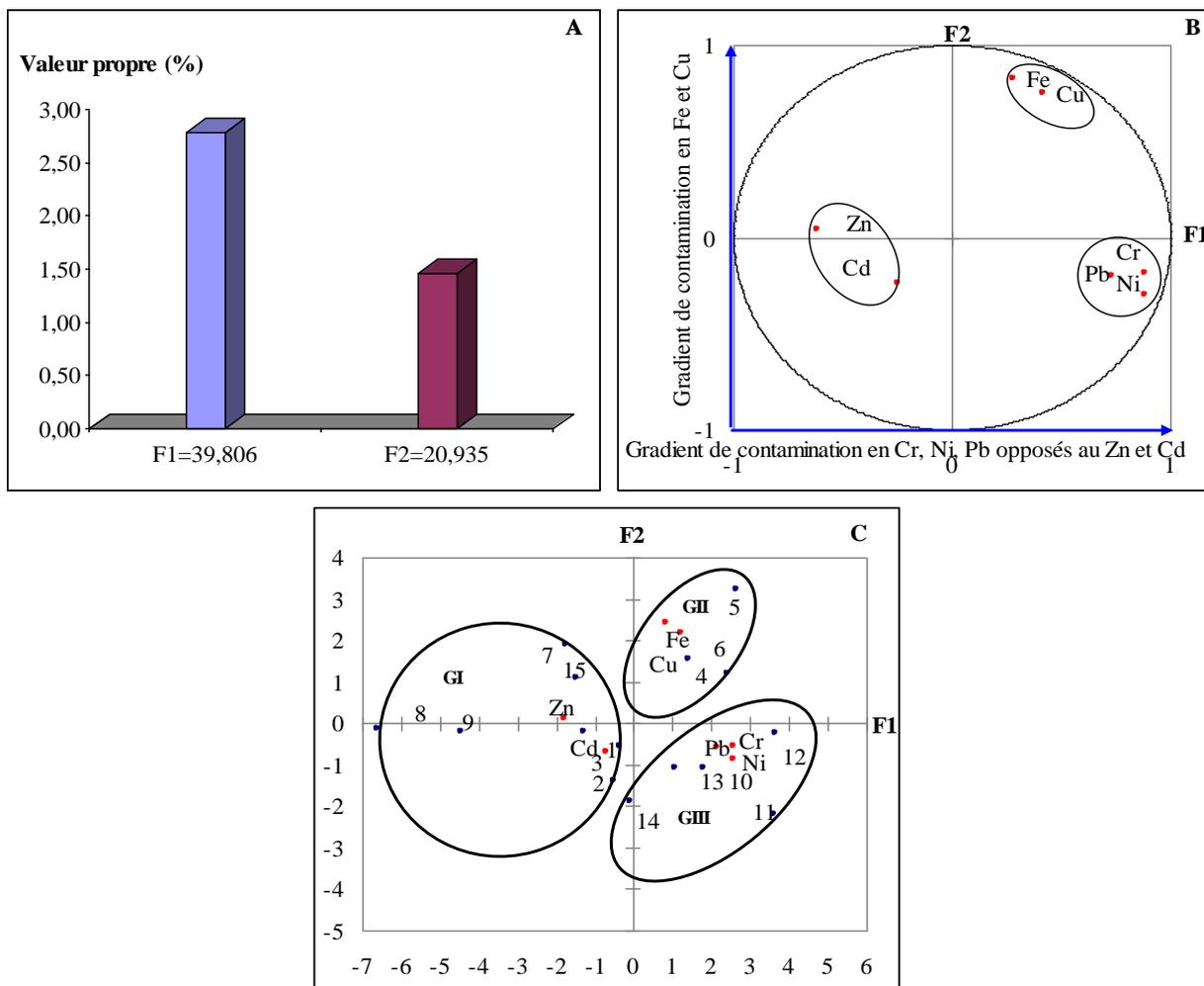


Figure 5 : Approche graphique (F1×F2) de l'ACP des métaux lourds dans les sols du PP.

L'axe F_1 prend en compte les variables Cr, Ni, et Pb du côté positif et le Zn du côté négatif et définit un gradient de contamination croissant de gauche à droite. Alors que l'axe F_2 prend en compte le Fe et le Cu. Sur le même cercle de corrélation (**Figure 5B**) apparaît clairement le même comportement avec une bonne corrélation entre Cr-Ni ($r^2=0,92$), des corrélations moyennes Cr-Pb ($r^2=0,52$), Pb-Ni et Fe-Cu ($r^2=0,53$). L'analyse de la carte factorielle (**Figure 5C**) montre l'individualisation de 3 groupes; le groupe I dont les sols se caractérisent par une richesse en Cd et Zn (relevés de 2006 et 2008), le groupe II dont les sols se caractérisent par une richesse en Cu et Fe (relevés de 2007) et le groupe III montrant une richesse en Cr, Pb et Ni (relevés 2009 et 2010).

Analyse du graphe de l'ACP au niveau du Sol au niveau de DA

Les valeurs propres des deux axes factoriels F_1 et F_2 et leur contribution à l'inertie totale sont représentées dans le **Tableau 3** et la **Figure 6A**. L'axe F_1 prend en compte les variables Ni du côté positif et le Zn, Cu et Cd du côté négatif et définit un gradient de contamination croissant de gauche à droite. Alors que l'axe F_2 prend en compte le Pb, Fe et Cr du côté positif (**Figure 6B**). La matrice de corrélation n'indique aucune corrélation significative entre les variables, toutefois on assiste à une corrélation moyenne entre le Zn-Pb ($r^2=0,66$). La projection des coordonnées de ces variables sur les plans des deux premières composantes principales ($F_1 \times F_2$), illustrée par le cercle de corrélation fait apparaître les affinités des variables vis-à-vis de chacun des axes.

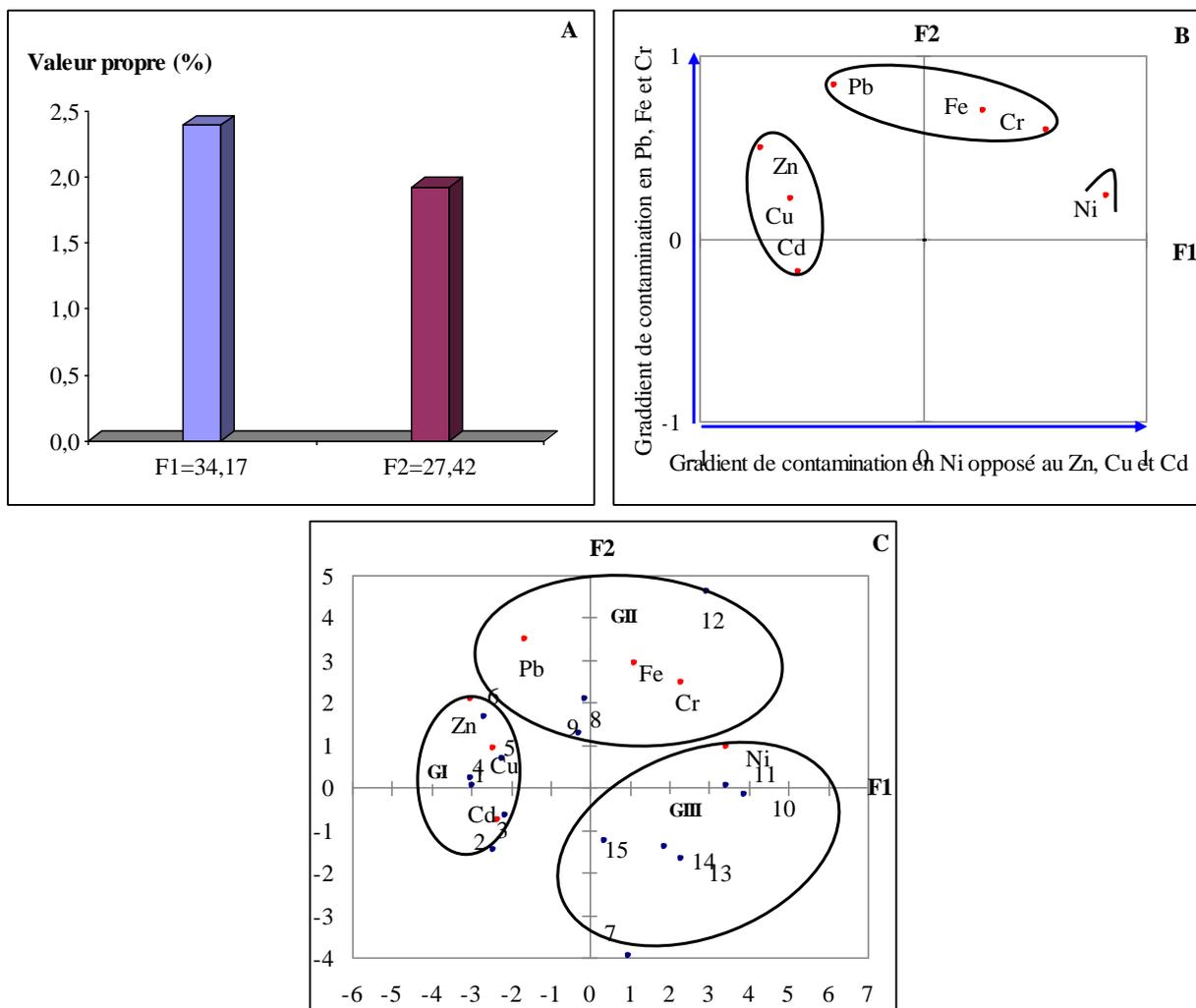


Figure 6 : Approche graphique ($F_1 \times F_2$) de l'ACP des métaux lourds dans les sols de DA.

L'analyse de la carte factorielle (**Figure 6C**) montre l'individualisation de 3 groupes: le groupe I dont les sols se caractérisent par une richesse en Cd, Cu, et Zn (2006 et 2007), le groupe II dont les sols montrent une richesse en Cr, Pb et Fe (2008) et le groupe III (2009 et 2010) caractérisés par une richesse en Ni.

Analyse du graphe de l'ACP du Sol au niveau de MN

Les valeurs propres des deux axes F_1 et F_2 , leur contribution à l'inertie totale, leurs coordonnées selon les mêmes axes sont représentées dans le **Tableau 3**. L'axe F_1 prend en compte les variables Ni, Zn, Cr, Pb, Fe et Cu du côté positif et définit un gradient croissant de gauche à droite. Alors que l'axe F_2 prend en compte le Cd (**Figure 7A**).

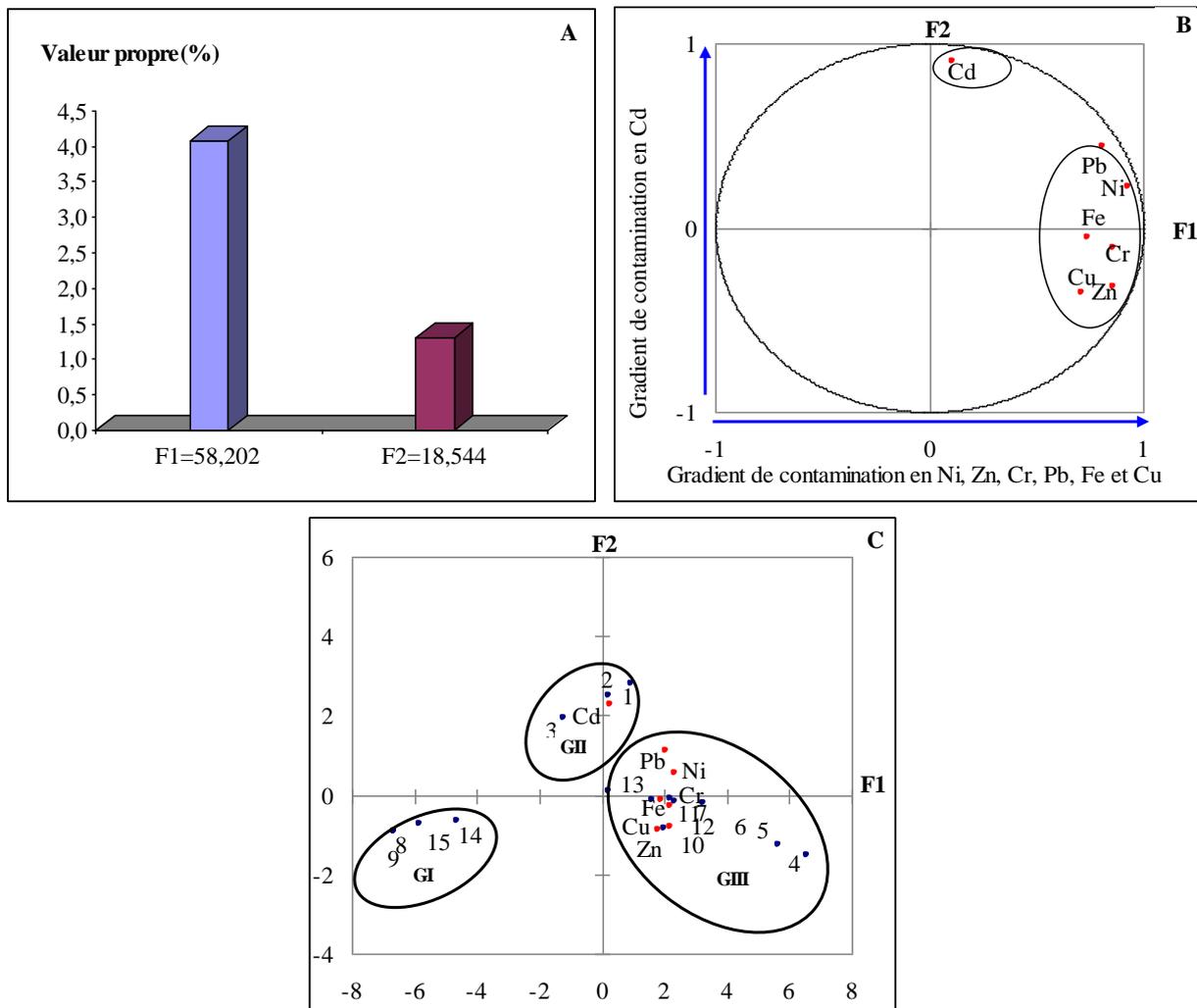


Figure 7 : Approche graphique ($F_1 \times F_2$) de l'ACP des métaux lourds dans les sols MN.

Sur le cercle de corrélation (**Figure 7B**) apparaît clairement le même comportement avec une bonne Cu-Zn ($r^2=0,92$), Cr-Ni ($r^2=0,84$), Ni-Pb ($r^2=0,81$), assez bonne pour le Ni-Zn ($r^2=0,72$) à faible entre Cr-Pb ($r^2=0,67$) et Cr-Zn ($r^2=0,66$).

L'analyse de la carte factorielle (**Figure 7C**) montre l'individualisation de 3 groupes ; le groupe I est représenté (2008 et 2010) par des sols ne révélant pas de richesse particulière, le groupe II (2006) dont les

sols se caractérisent par une richesse en Cd et le groupe III, opposé au groupe I, représenté par des relevés (2007 et 2009) caractérisés par une richesse poly métallique importante en Cr, Fe, Pb, Ni, Cu et Zn.

Typologie de la contamination métallique des cultures

Les résultats des différents échantillons analysés des cultures dans les différents sites sont présentés dans le **Tableau 4**. L'ACP est effectuée sur une matrice de données constituée de 57 prélèvements ; soit 5 campagnes pour les trois sites avec 20 prélèvements pour PP, 18 pour DA et 19 pour MN.

Tableau 4 : Corrélations des variables avec les axes dans les cultures au niveau des sites PP, DA et MN.

	PP		DA		MN	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Cd	0,35	-0,44*	0,16	0,61*	0,81*	-0,10
Cr	0,04	-0,49*	0,63*	0,40	-0,27	0,89*
Cu	0,58	0,76*	0,70*	-0,55	0,92	0,04
Fe	0,72*	-0,18	0,86*	0,07	-0,46	0,17
Ni	0,78*	-0,27	0,37	0,05	0,16	0,84*
Pb	0,64*	-0,57	0,47	0,75*	0,57*	0,36
Zn	0,76*	0,59	0,82*	-0,49	0,87*	0,03

Analyse du graphe de l'ACP des cultures du PP

Une première approche typologique des différentes variables selon leurs affinités et leur regroupement sur les deux premières composantes principales à partir de leur contribution, est représentée sur la **Figure 8A**.

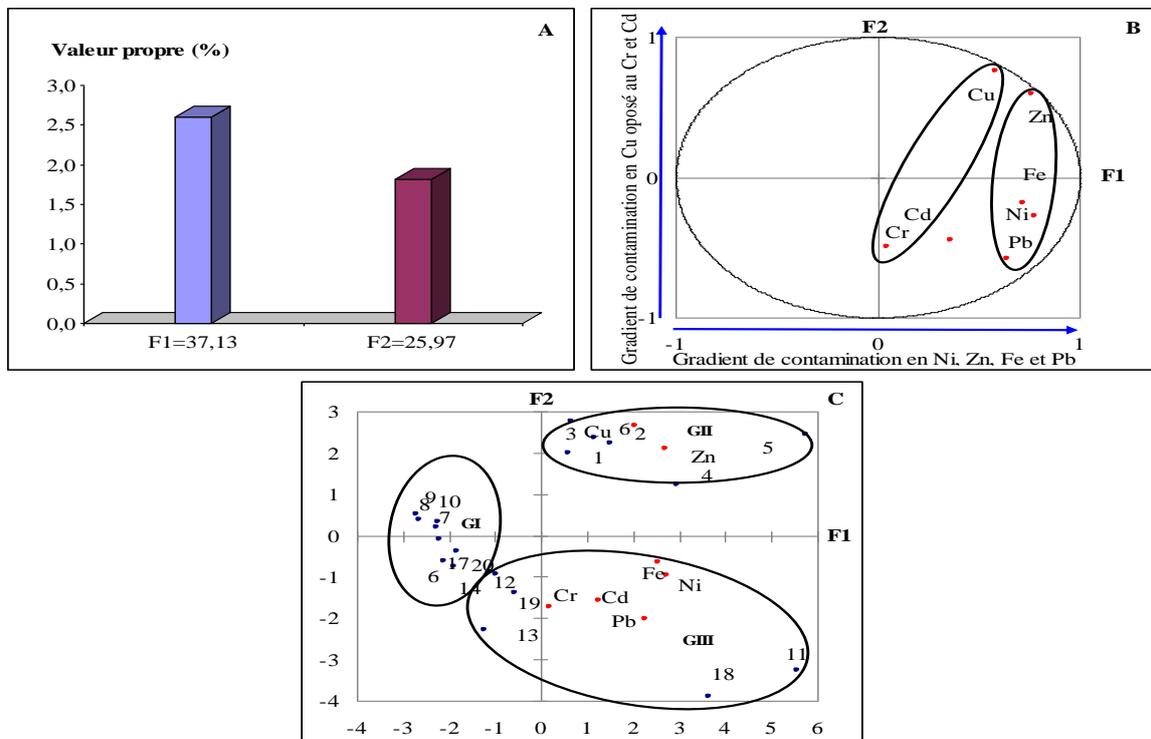


Figure 8 : Approche graphique (F1 x F2) de l'ACP des métaux lourds dans les cultures du PP.

L'axe F_1 prend en compte Ni, Zn, Fe et Pb et définit un gradient de contamination croissant de gauche à droite. Alors que l'axe F_2 prend en compte le Cd, Cr et Cu. Sur le cercle de corrélation (**Figure 8B**), on note une bonne corrélation Cu-Zn ($r^2=0,88$) et Pb-Fe ($r^2=0,80$). Alors que le Ni présente une corrélation moyenne avec le Cd et le Zn avec respectivement ($r^2=0,61$ et $r^2=0,51$).

La projection des coordonnées de ces variables sur les plans des deux premières composantes principales ($F_1 \times F_2$), illustrée sur le cercle de corrélation fait apparaître les affinités des variables vis-à-vis de chacun des axes. L'analyse de la carte factorielle représentée par la **Figure 8C** montre l'individualisation de trois groupes: le groupe I représenté par les relevés des années 2008 et 2010 montrant une faible richesse en éléments métalliques étudiées, le groupe II représenté principalement par les relevés des années 2006 et 2007 caractérisé par une richesse en Cu et Zn et le groupe III représenté principalement par les relevés de l'année 2009 montrant une richesse poly métallique, notamment en Pb, Fe, Ni et Cd.

Analyse du graphe de l'ACP des cultures de DA

L'axe F_1 prend en compte les variables Fe, Cr du côté positif et Cu-Zn du côté négatif. Alors que l'axe F_2 prend en compte le Pb et le Cd du côté positif (**Figure 9A**). Sur le cercle de corrélation (**Figure 9B**) apparaît clairement le même comportement avec une bonne corrélation Cu-Zn ($r^2=0,954$), assez bonne pour Cr-Fe ($r^2=0,769$) et moyenne respectivement pour Pb-Cd ($r^2=0,595$) et Fe-Zn ($r^2=0,542$). La projection des coordonnées de ces variables sur ($F_1 \times F_2$), illustrée sur le cercle de corrélation fait apparaître les affinités des variables vis-à-vis de chacun des axes.

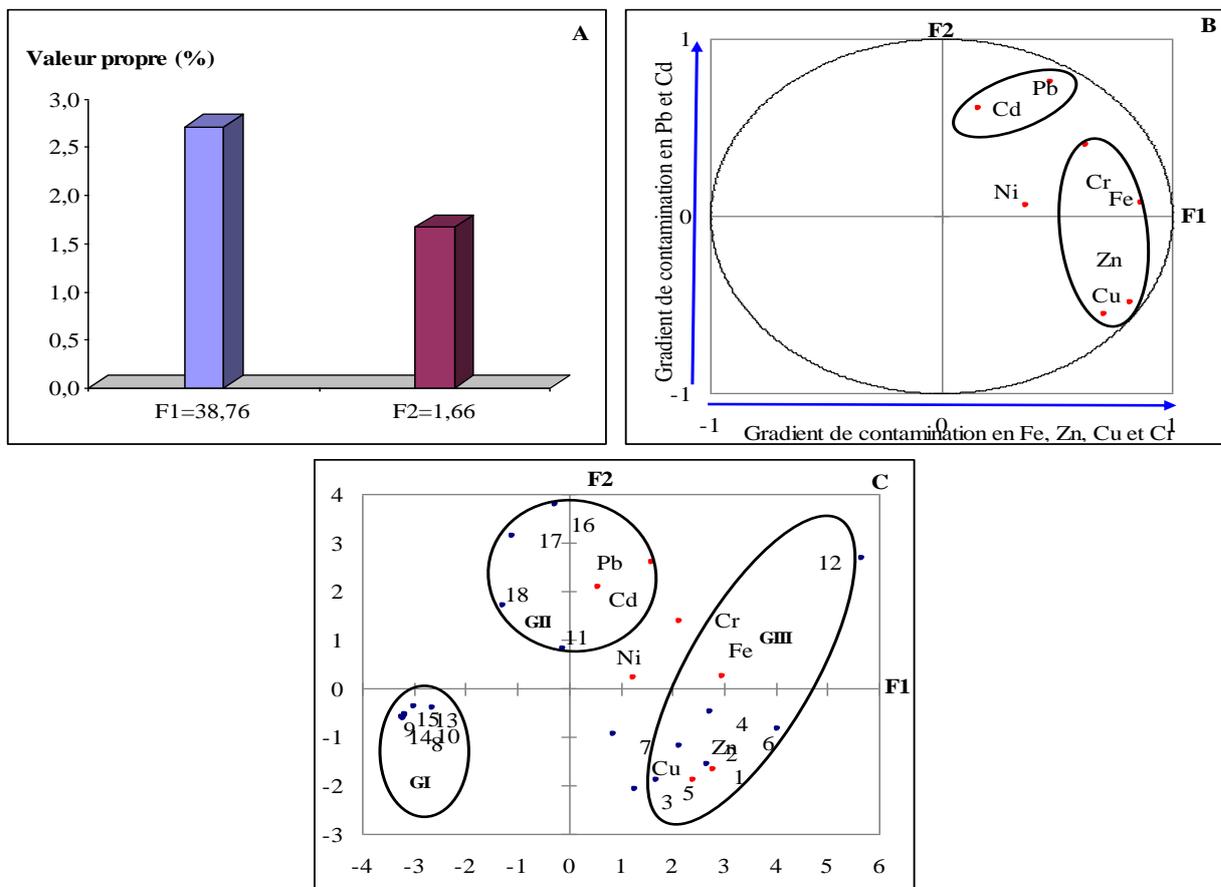


Figure 9 : Approche graphique ($F_1 \times F_2$) de l'ACP des métaux lourds dans les cultures de DA.

Analyse du graphe de l'ACP des cultures de MN

Les valeurs propres des deux axes factoriels F_1 et F_2 et leur contribution à l'inertie totale sont représentées dans le **Tableau 5**. La décomposition de la variabilité montre que l'axe F_1 prend en compte les variables Cu, Zn, Cd et Pb et définit un gradient de contamination croissant de gauche à droite. Alors que l'axe F_2 prend en compte le Cr et Ni. Nous notons aussi le comportement différent du Fe (**Figure 10A**). Sur le cercle de corrélation (**Figure 10B**) apparaît le même comportement avec une bonne corrélation Cu-Zn ($r^2=0,94$) et des corrélations moyennes pour Cu-Cd ($r^2=0,60$), Cr-Ni ($r^2=0,60$) et Zn-Cd ($r^2=0,55$).

Tableau 5 : Teneurs moyennes en métaux (Cd, Cr, Cu, Fe, Ni Pb et Zn) exprimés en $\mu\text{g/g}$ du poids sec des différentes cultures au niveau des trois sites d'étude

		Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn
PP	Blé (BL)	0,01	1,69	5,65	195,48	5,8	1,83	19,54
	Maïs (MS)	0,02	0,50	0,76	11,37	1,15	0,42	6,65
	Courgette (CG)	0,03	0,07	1,50	17,70	1,70	0,08	2,88
	Laitue (LT)	0,001	1,86	0,57	24,70	1,31	0,21	1,31
	Navet (NV)	0,01	0,90	1,70	5,14	0,96	0,30	1,40
DA	Blé (BL)	0,03	10,60	7,34	136,41	9,74	2,10	31,34
	Maïs (MS)	0,01	0,97	4,31	36,70	22,44	0,14	25,77
	Courgette (CG)	0,05	0,11	0,61	3,52	0,58	0,52	1,57
	Laitue (LT)	0,001	0,54	0,73	4,95	1,70	0,24	21,50
	Navet (NV)	0,09	1,92	37,06	138,77	8,75	1,36	54,30
MN	Blé (BL)	0,08	2,25	6,82	34,05	9,61	0,79	8,55
	Maïs (MS)	0,02	2,65	3,89	40,17	12,39	0,57	12,14
	Courgette (CG)	0,002	0,75	0,57	5,99	0,61	0,08	1,21
	Laitue (LT)	0,03	3,84	32,63	69,97	21,64	0,63	38,97
	Navet (NV)	0,07	1,32	35,80	149,82	1,34	0,64	37,71
Tremel Schaub et Feix, 2005	Blé (BL)	0,07	0,08	4,98	-	0,06	0,05	13,77
	Maïs (MS)	0,03	0,36	3,5	-	1,33	0,89	35,00
	Courgette (CG)	0,15	0,50	9	-	2,30	0,35	24,00
	Laitue (LT)	0,56	1,40	7,59	-	1,15	3,41	22,00
	Navet (NV)	0,06	0,05	7	-	0,1	-	23,00
Kabata et Pendias (1992)	T.Normale	0,035	0,03	15,75	-	2,55	7,5	88,5
	T.Toxique	5-30	5-30	50	-	10-100	30-300	100-400
Markert 1994	T. normale	0,05	1,5	10	150	1,5	1	50

La projection des coordonnées de ces variables sur ($F_1 \times F_2$) fait apparaître les affinités des variables vis-à-vis de chacun des axes. L'analyse de la carte factorielle (**Figure 10C**) montre l'individualisation des trois groupes suivants: le groupe I représenté par des relevés des années 2008, 2009 et 2010 riche en Fe, le groupe II représenté par des relevés des années 2007 et 2009 est caractérisé par une richesse en Cr et Ni et le groupe III formé par des relevés des années 2006 et 2007 riches en Cu, Zn et Pb du côté positif de l'axe F_1 et Cd du côté négatif dudit axe.

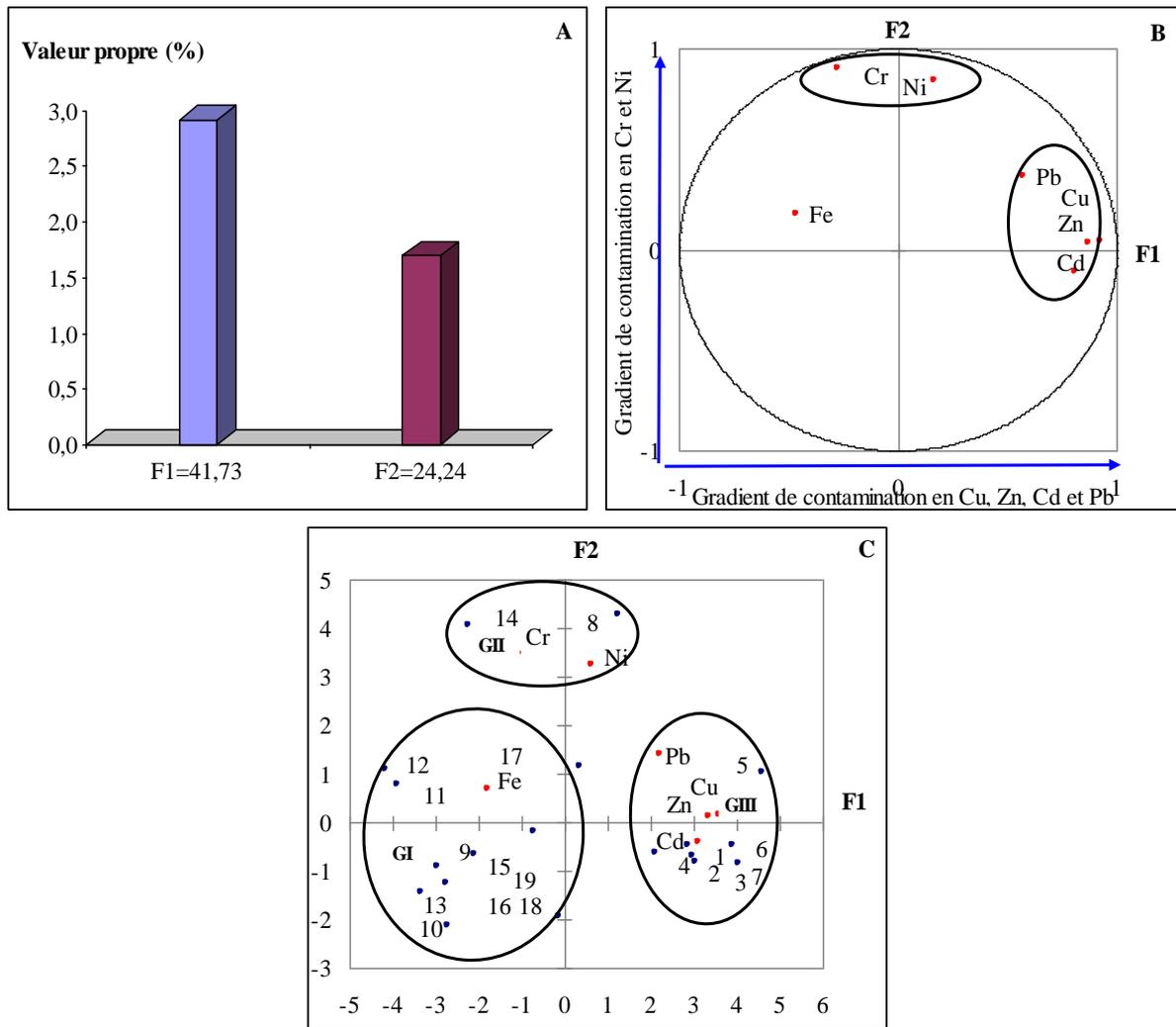


Figure 10. Approche graphique (F1×F2) de l'ACP des métaux lourds dans les cultures MN.

4. Discussion

Une analyse globale des résultats obtenus au niveau des eaux d'irrigation permet de constater la contamination, notamment en Cr et Cd de ce support au niveau de DA et MN, une contamination qui trouve son origine dans les rejets urbains. Comme pour les eaux, c'est surtout au niveau de DA et MN que l'on note la contamination des sols agricoles particulièrement en Cd et Cu éléments qui peuvent être à l'origine trouver des activités aussi bien agricoles qu'industrielles. Les impacts combinés d'une pollution agricole et métallique sont également possibles. Par ailleurs, ces résultats confirment, pour les sites DA situé à environ 40 Km de la sortie de la ville de Fès, et MN vers l'embouchure du Sebou sur la méditerranée, les résultats des études antérieures notant une pollution métallique [6, 13,16-19].

L'analyse des teneurs métalliques par types de cultures et par métal permet de constater que pour le Cd, la teneur moyenne maximale a été enregistrée par le navet de DA avec 0,09 µg/g dépassant la teneur indicative fixée à 0,06 µg/g [4]. Cette concentration dépasse la teneur normale des cultures fixée à 0,03 µg/g. La même remarque concerne le blé et le navet de MN avec des teneurs respectives de 0,08 et 0,07 µg/g. Toutefois, la teneur tolérable fixée à 3 µg/g est respectée [20]. Pour le Cr, la teneur moyenne du blé est de 10,6 ; 2,25 et 1,69 µg/g respectivement au niveau de DA, MN et PP dépassant la teneur normale fixée

à 0,08 µg/g ainsi que la teneur tolérable 2 µg/g, particulièrement au niveau de DA et MN [20]. Le maïs présente aussi une concentration moyenne atteignant la teneur toxique, notamment au niveau de MN avec 2,3 µg/g [20]. Le même constat concerne la laitue dont la concentration maximale a été enregistrée au niveau de MN avec une concentration moyenne de 3,84 µg/g. Enfin le navet avec respectivement 1,92 ; 1,32 et 0,9 µg/g au niveau de DA, MN et PP dépassant aussi bien la teneur normale fixée par Kabata et Pendias [20] à 0,03 µg/g ainsi que 0,05 µg/g indiquée par Tremel-Schaub et Feix [4]. Pour ce qui est du Cu, il présente des teneurs dépassant de loin la fourchette normale fixée à 3,5 µg/g [21] sans toutefois atteindre la teneur toxique qui est de 50 µg/g [4]. Le navet est la culture qui a présenté la teneur maximale avec respectivement 37,06 µg/g à DA et 35,8 µg/g à MN, ce résultat rejoint celui de Khammar [13] qui a montré le pouvoir accumulateur de cette culture.

S'agissant du Fe, les concentrations sont globalement au-dessous de la teneur normale fixée à 150 µg/g sauf pour le Blé de PP dont la concentration a atteint 195,48 µg/g [22]. On note aussi que le blé et le navet sont les cultures qui ont accumulé cet élément avec des teneurs de 136,41 µg/g pour le blé de DA et respectivement 149,82 et 138,77 µg/g pour le navet de MN et DA. Outre les apports anthropiques, le fer peut être d'origine endogène ce qui est en accord avec l'hypothèse de la qualité des sols ferrugineux de la zone MN [23]. Facilement prélevé par les plantes, le Ni a enregistré des concentrations parfois importantes sans toutefois dépasser la teneur tolérable fixée à 50 µg/g [20]. En effet, on note des concentrations moyennes de l'ordre de 5,6 µg/g au niveau du PP, de 9,74 µg/g pour DA et 9,61 µg/g pour MN et ce pour le blé dépassant aussi bien la teneur normale fixée par Markert [22] à 1,5 µg/g (1994) et Kabata & Pendias à 2,55 µg/g [20]. Le même constat concerne le maïs de DA dont la teneur moyenne 22,44 µg/g dépasse de dix fois la teneur normale, la même culture a enregistré une concentration de 12,39 µg/g au niveau de MN, alors qu'au niveau du PP on note une concentration faible. En ce qui concerne le navet, c'est surtout au niveau de DA (8,75 µg/g) que cette culture a présenté une concentration importante comparée à la teneur indicative relative à cette culture et qui est de 0,1 µg/g [4]. Enfin, avec une concentration de 21,64 µg/g, la laitue de MN a présenté l'une des concentrations les plus élevées en cet élément.

Concernant le Pb, les concentrations des cultures sont généralement normales ne dépassant guère la teneur tolérable fixée à 10 µg/g [20]. Toutefois, la teneur admissible pour les plantes comestibles considérée par la FAO et l'OMS (0,3µg/g) se trouve largement dépassée par la plus part des cultures [24]. Si on compare les concentrations spécifiques par cultures, on note que le blé a enregistré la teneur maximale en cet élément avec 2,10 µg/g et respectivement 1,83 µg/g au niveau du PP et 0,79 µg/g au niveau de MN. Le navet a également enregistré des teneurs importantes, notamment au niveau de DA 1,36 µg/g contre 0,64 µg/g au niveau de MN. Enfin le maïs a enregistré des teneurs moyennes autour de 0,5 µg/g au niveau des trois sites.

Pour ce qui est du Zn, élément fortement phytodisponible, on remarque que les teneurs des cultures n'ont pas atteint la teneur toxique (100-400µg/g) indiquée par Kabata et Pendias [20]. Toutefois, et considérant la teneur normale 50 µg/g [22] et 23 µg/g indiquée par Tremel-Schaub et Feix [4]. On déduit que le navet présente une concentration excessive en Zn (54,3 µg/g au niveau de DA et 37,71 µg/g au niveau de MN). Le blé de DA présente également une concentration triple par rapport à la teneur normale 13,77 µg/g en cette culture [4]. La même remarque concerne la laitue, particulièrement au niveau de MN avec une concentration de 38,97 µg/g comparée à la teneur normale 22 µg/g [4]. Si on compare la concentration des cultures pour les 7 éléments, on remarque que de manière globale, l'ordre d'enrichissement est respecté au niveau des trois sites et par la majorité des cultures et se présente comme suit : Fe>Zn>Cu>Cr>Ni>Pb>Cd. On note par ailleurs que certaines graminées (maïs et blé) sont accumulateurs des éléments métalliques. Cette étude révèle aussi le pouvoir accumulateur du navet, résultat démontré par des études antérieures [6,13].

5. Conclusion

A la lumière des résultats obtenus au niveau des trois supports étudiés; eau d'irrigation, sols agricoles et cultures maraîchères, on confirme que la zone d'étude est sujette de pollution. En effet, les eaux d'irrigation particulièrement au niveau de DA et MN pourraient être contaminées en Cr et Cd. C'est également le cas pour les sols des mêmes zones notamment pour le Cd. Enfin les teneurs des cultures, particulièrement pour le Cr, Cd et d'un degré moindre d'un degré moindre pour le Ni et Pb témoignant aussi d'une pollution. Une analyse globale des eaux d'irrigation au niveau de notre étude de l'oued Sebou (DA et MN) montre que les teneurs obtenues sont relativement importantes comparées à celles fixées par les Normes Nationales des Eaux d'Irrigation [25]. Notamment pour le Cr, Pb et Cd. Ces concentrations et plus particulièrement en Cd et Cr au niveau de ces 2 sites présentent une forte corrélation dont le coefficient est de 0,99 ; ce qui laisse supposer les même sources de contamination et avec comme origine possible les rejets des eaux usées industrielles. Le Cr peut être aussi d'origine agricole vu sa présence à l'état d'impureté dans les engrais et compte tenu des activités agricoles intenses particulièrement au niveau de MN [26 - 27]. Les deux sites DA et MN présentent une richesse poly métallique. Toutefois, comparées aux teneurs indiqués par l'Institut National de la Recherche Agronomique français [28], on peut conclure que les sols agricoles sujets de notre étude peuvent être contaminés, en Cu et Cd, une pollution qui peut être d'origine agricole en ce qui concerne le Cu [29 - 30] et industrielle pour le Cd [13].

Une comparaison des teneurs des cultures étudiées avec celle des auteurs [4, 21, 23] est présentée par le **Tableau V**. La comparaison des teneurs enregistrées des métaux par ces cultures étudiées montre que les concentrations en oligo-éléments Fe, Cu et Zn sont plus élevées par rapport à celles des éléments toxiques Cr, Pb, Ni et Cd (tableau V), résultat attesté par l'ordre d'enrichissement des cultures étudiées par les différents éléments ainsi que par les cultures de référence. On note aussi la forte corrélation Cu et Zn et ce au niveau des trois sites avec respectivement (0,88; 0,95 et 0,94) au niveau du PP, DA et MN. Par ailleurs, les cultures (BL, MS et NV) de notre étude présentent des teneurs importantes en éléments métalliques, comparées à celles fixées par Tremel-Schaub et Feix [4], notamment en Cr, Ni et Pb avec les teneurs respectivement de 10,60; 22,44 et 2,10 µg/g de matière sèche enregistrée principalement au niveau de DA. Par ailleurs, les faibles teneurs de la zone PP et au niveau des trois supports permet de conclure que l'origine de la pollution peut être les rejets des eaux usées urbaines riche en métaux issues des activités artisanales et parfois agricoles de la ville de Fès et régions pour DA ainsi que des villes traversées vers l'embouchure au niveau de Kenitra en ce qui concerne MN. Dans le même ordre d'idée, les corrélations obtenues entre ces trois matrices permettent de conclure que les eaux d'irrigation entre autres, peuvent constituer une source d'entrée de ces métaux.

On peut donc conclure que la qualité des eaux, sols et les cultures est affectée par la pollution (naturelle et anthropique) ce qui peut porter atteinte aux rendements agricoles et à la qualité des récoltes et par suite à la santé public. On note aussi que les cultures présentent des affinités différentes vis-à-vis d'un élément métallique, affinité pour laquelle il convient de considérer les effets singuliers et les interactions entre les différents facteurs influençant la biodisponibilité des éléments métalliques dont la physiologie de la culture elle-même. A ce titre on souligne aussi que les graminées et le navet peuvent être des indicateurs de la pollution métallique vu leur pouvoir de concentration démontré. Le suivi minutieux de l'évolution de cette pollution et la recherche de solutions de préservation à la source s'avère d'une grande nécessité pour protéger cet écosystème et permet de s'inscrire dans l'esprit de la charte de l'environnement et du développement durable du Maroc qui offre des opportunités d'appui à un développement durable et responsable.

Références

- [1] - Boivin G. & Cournot G. 2001. Manifestations osseuses et articulaires des intoxications métalliques et métalloïdes. *Encycl Med Chir (Editions Scientifiques et Médicales Elsevier SAS. Appareil locomoteur, 14-025-R-10, 8 p.*
- [2] - Morera J.M., Bacardit A., Ollé L., Bartolí E. & Borràs M.D. 2007. Minimization of the environmental impact of chrome tanning: A new process with high chrome exhaustion. *Chemosphere, 69, 1728–1733.*
- [3] - Singh O.V., Labana S., Pandey G., Budhiraja R. & Jain R.K. 2003. Phytoremediation : an overview of metallic ion decontamination from soil. *Appl. Microbiol. Biotechnol., 61, 405–412*
- [4] - Tremel-Schaub A. & Feix I. 2005. Contamination des sols, transfert des sols vers les plantes. Livre, édition 2, 413 p
- [5] - Annabi A.B., Nehdi A., Hajjaji N., Gharbi N. & El-Fazâa S. 2007. Incidence de la toxicité du plomb sur l'activité des enzymes antioxydantes et du taux plasmatique de la bilirubine chez le rat adulte. *C.R.Biologies, 330, 581–588.*
- [6] - Bouchouata O., Jaafar B., Bounakhla M., Doukkali A. & Attarassi B. 2011. Etude de la contamination par les métaux lourds des eaux d'irrigation et les cultures maraîchères dans la zone M'nasra (Gharb, Maroc). *ScienceLib editions Mersenne, 3, 1–11.*
- [7] - Wang Q.R., Cui Y.S., Liu X.M., Dong Y.T. & Christie P. 2003. Soil contamination and plant uptake of heavy metals at polluted sites in China. *J. Environ. Sci. Health Part A Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng, 38, 823–838.*
- [8] - Shah K. & Nongkynrih J.M. 2007. Metal hyperaccumulation and bioremediation. *Biologia Plantarum 51, 618–634.*
- [9] - Salt D.E., Smith R.D. & Raskin I. 1998. Phytoremediation. *Plant Physiol. Plant Mol. Biol., 49, 643–668.*
- [10] - Ouakrim M. 2010. Charte de l'Environnement, Journée de concertation régionale. Rapport du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (Fiches région Gharb Cherarda Bni Hssen), 7–9p.
- [11] - A.B.H.S. 2006. (Agence du Bassin Hydraulique du Sebou). Système de redevance du Bassin Hydraulique du Sebou. Bulletin n° 16. 21 pp
- [12] - A.B.H.S. 2010. Etude du coût de dégradation du Sebou. Etude menée par le Département de l'Environnement et l'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou en collaboration avec l'AFD et le WWF. 48 pp
- [13] - Khamar M. 2002. Etude de la charge en métaux lourds dans les eaux, les sédiments, les sols et les productions agricoles irrigués par les eaux usées de la ville de Fès. Thèse de Doctorat. Université Moulay Abdallah. Faculté des Sciences de Fès. 243 p.
- [14] - Ahmad M.K., Islam S., Rahman S., Haque M.R. & Islam M.M. 2010. Heavy Metals in Water, Sediment and Some Fishes of Buriganga River, Bangladesh. *Int. J. Environ. Res., 4 (2), 321–332.*
- [15] - Foucart S. 1982. Analyse factorielle. Programme sur ordinateur. Masson, Paris, France.
- [16] - Azzaoui S., El Hanbali M. Leblanc M. 2002. Copper, Lead, Iron and Manganese in the Sebou, drainage basin ; Sources and Impact on Surface Water quality. *Water Qual, Res.J.Canada, 27 (4), 773–784.*
- [17] - Koukal B., Dominik J., Vignati D., Arpagaus P., Santiago S., Ouddane B. & Bennabidate L. 2004. Assessment of water quality and toxicity of polluted rivers Fez and Sebou in the region of Fes (Morocco). *Environ Pollut., 131, 163–172.*
- [18] - Amri N., Benslimane M., Zaoui H., Hamedoun M. & Outiti B. 2007. Evaluations of the heavy metals accumulate in samples of the sediments, soils and plants by lcpoes with the average Sebou. *M.J. Condensed Matter, Vol. 8 (1), 43–52.*

- [19] - Derwich E., Beziane Z., Benaabidate L. & Belghithyti D. 2008. Evaluation de la qualité des eaux de surface des oueds Fès et Sebou utilisées en agriculture maraîchère au Maroc. *Larhyss Journal*, 7, 59–77.
- [20] - Kabata P.A. & Pendias H. 1992. Trace elements in soils and plants, 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 315.
- [21] - Coïc Y. & Coppenet M. 1989. Les oligo-éléments en agricultures et élevages. Incidence sur la nutrition humaine. INRA. Paris, 109 PP.
- [22] - Markert B., 1994. Plants as biomonitors – potential advantages and problems. In : Adriano D.C., Chen Z.C., Yang .S.S. (eds). *Biochemistry of trace elements; Science and Technology Letters; North wood 11, New York, 601-613.*
- [23] - O.R.M.V.A.G. 1994. Etude pédologique au 1/20 000 de la troisième tranche d'irrigation sur la superficie de 100 000 Ha Zone Mnasra Z₁ Z₂. Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb.
- [24] - Rooney C.P., McLaren R.G. & Cresswell R.J. 1999. Distribution and phytoavailability of lead in soil contaminated with lead shot. *Water, Air, and Soil*, 116, 535–584.
- [25] - M.E. & M.A.T.U.E. (Ministère de l'Équipement et du Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement) 2002. Bulletin Officiel n° 1276–01 du 10 Chaabane 1423 (17 octobre 2002) relatif à la fixation des normes nationales de qualité des eaux destinées à l'irrigation.
- [26] - El Haite H. 1991. Éléments de réponse pour une meilleure maîtrise des pollutions et gestion des eaux usées à Fès. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Moulay Ismail, Meknès, Maroc. 158p.
- [27] - Taylor M.C., Reeder S.w. and Demayd A. (1979). Guidelines for surface water quality. Vol. 1. Inorganic chemical substances. Chronim. Inland Water Directorate, *Water Quality Branch, Ottawa, 9p.*
- [28] - INRA. 2000. Teneurs totales en métaux lourds dans les sols français du programme ASPITET. Le courrier de l'environnement de l'INRA, N° 39 (1). www.inra.fr
- [29] - Gomez A., Solda P., Lambrot C., Wilbert J. & Juste C. 1992. Bilan des éléments-traces métalliques transférés dans un sol sableux après 16 années d'apports continus et connus de boues de station d'épuration et de fumier de ferme en monoculture irriguée de maïs. *Conv. Min. Env./INRA n° 89-256, 57p.*
- [30] - Mengel K. and Kirkby E.A. (1987). Principles of plant nutrition. 4th edition. 686 p.