

REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE CHIMIE

Laboratoire de Chimie Inorganique et Environnement (LCIE)



THÈSE

En vue de l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR EN ÈS SCIENCE

Spécialité : Chimie

Option : Chimie de l'Environnement

Thème

**ETUDE DE CONTAMINATION ET D'ACCUMULATION DE QUELQUES MÉTAUX
LOURDS DANS DES CÉRÉALES, DES LÉGUMES ET DES SOLS AGRICOLES
IRRIGUÉS PAR DES EAUX USÉES DE LA VILLE DE HAMMAM BOUGHRARA**

Présentée par : M^r Baba Ahmed Abderrazzak

Soutenue devant le jury composé de :

Présidente:	M ^{me} MOKHTARI Malika	Professeur à l'Université de Tlemcen
Examineurs:	M ^{me} DJAFRI Fatiha	Professeur à l'Université d'Es-Sénia-Oran
	M ^r OUHIB Rachid	Maître de Conférences A à l'Université de Sidi Bel-Abbés
	M ^{me} BOUKLI HACENE Lila	Professeur à l'Université de Tlemcen
	M ^{me} LOUHIBI Samira	Maître de Conférences A à l'université de Tlemcen
Encadreur:	M ^{me} BOUHADJERA-ABDI Keltoum	Maître de Conférences A à l'Université de Tlemcen

ANNEE UNIVERSITERE 2011-2012

Abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation ;

ES : extraction séquentielle ;

MO : matière organique ;

n.d. : non détecté (en dessous des limites de détection) ;

SAA : spectrométrie d'absorption atomique ;

UE : Union Européenne ;

ADEME : Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'énergie;

BCR : Bureau Communautaire des références ;

EDTA : Acide éthylène diamine Tétra acétique ;

DTPA : diethylenetriaminepentacetic acid

Eh : potentiel d'oxydo-réduction.

INRA : institut national de la recherche agronomique

ETM : éléments traces métalliques ;

CEC : capacité d'échange cationique

ISO: International Organization for Standardization ;

ppm: parties par million (mg/kg) ;

S1 : Sol de la parcelle du blé dur ;

S2 : Sol de la parcelle du poivron ;

S1 : Sol de la parcelle du maïs;

Ca : calcium

Cd : cadmium

Co: cobalt

Cr: chrome

Cu: cuivre

DTPA : diethylenetriaminepentacetic acid

Eh : potentiel d'oxydo-réduction.

INRA : institut national de la recherche agronomique

Mn : manganèse

MS : matière sèche

Ni : nickel

Pb: plomb

Sommaire

Remercîments.....	
Introduction Générale.....	1
Chapitre I: Synthèse Bibliographique.....	5
I- Le sol et ses constituants.....	6
I.1- Qu'est-ce qu'un sol.....	6
I.2- Composition physique du sol.....	6
I.2.1- Les constituants minéraux.....	6
I.2.2- La matière organique.....	8
I.2.3- l'eau dans le sol.....	8
I.3- Les principaux types de polluants du sol.....	9
I.4- Autres composés inorganiques.....	12
I.5- Toxicité des métaux lourds.....	12
I.6- La spéciation des métaux traces dans les solutions du sol.....	13
I.7- Phénomène de sorption des éléments métalliques dans les sols.....	13
I.8- Facteurs modifiant la mobilité des métaux lourds.....	15
I.9- Estimation de la mobilité des métaux lourds.....	17
II- Le transfert sol-plante des métaux lourds.....	19
II.1- Le transfert sol-plante.....	19
II.2- Définition de la phytodisponibilité des métaux lourds.....	19
II.3- Les facteurs contrôlant le prélèvement des métaux lourds.....	20
III- Particularités.....	25
III.1- Le cadmium.....	25
III.2- Le nickel.....	25
III.3- Le plomb.....	26
III.4- Le zinc.....	26
III.5- Le chrome.....	27
III.6- Le cuivre.....	27
III.7- Le cobalt.....	28
III.8- Le fer.....	28
III.9- Le manganèse.....	28
Chapitre II: Les sols étudiés-Matériels et Protocoles Expérimentaux.....	31
I- Les sols étudiés-Matériels et Protocoles Expérimentaux.....	32
I.1- Présentation de la zone d'étude.....	32
I.2- Matériels et protocoles expérimentaux.....	37
I.2.1- Prélèvement.....	38
I.2.2- Echantillon final.....	38
I.2.3- Quartage.....	38
I.2.4- Conditionnement des échantillons.....	39
I.2.5- Analyses physico-chimiques.....	39
I.2.6- Détermination de la teneur totale des ETM Extraction totale.....	49
I.2.7- Extractions séquentielles.....	51
I.2.8- Extractions chimiques sélectives.....	53

II- Les plantes	55
II.1- Techniques de prélèvement des plantes étudiées	55
II.2- Préparation des échantillons des plantes étudiés	56
II.3- Minéralisation, mise en solution	57
III- Analyses des métaux lourds	58
Chapitre III: Résultats et Discussions	61
I- Le sol	62
I.1- Les caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés aux cours de différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010	62
I.2- Extraction des métaux lourds dans les sols S1, S2 et S3	84
I.2.1- Extraction par l'eau régale aux cours des saisons, de l'année 2006 jusqu'à 2010	84
I.2.2- Extraction séquentielle	94
I.3- Répartition des métaux lourds au sein des différentes fractions granulométriques	133
I.4- Extraction des métaux lourds avec les solutions salines (NH₄OAC, NaNO₃, CaCl₂ et NH₄NO₃, le complexe (EDTA) et l'acide (HCl)	139
II- Les plantes	168
II.1- Les racines	198
II.2- Les parties aériennes	201
Conclusion Générale	213
Référence	219
Annexe	227

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de Chimie Inorganique et Environnement (LCIE) de l'Université Abou Bekr BELKAID, sous la direction de Madame **Bouhajera Keltoum**, Maître de Conférences à l'université de Tlemcen à qui J'adresse mes vifs remerciements et toute ma gratitude pour son aide, son soutien, sa patience qu'elle m'a apporté en vue de concrétiser ce travail et je tiens à lui exprimer ma sincère reconnaissance pour les encouragements.

Il m'est agréable d'exprimer toute ma reconnaissance et mes remerciements à Madame **Mokhtari Malika** Professeur à l'université de Tlemcen pour l'intérêt qu'elle a porté à ce travail et pour nous avoir honoré de présider le jury de cette thèse.

Je tiens également à remercier Madame **Djafri Fatima** Professeur à l'université d'Oran et Monsieur **Ouhib Rachid** Maître de Conférences à l'université de Sidi-Belabess, qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail. Je souhaite leur exprimer ici toute ma gratitude.

Je suis très reconnaissant et j'exprime mes remerciements à Madame **Boukli Lahcene Lila** Professeur à l'université de Tlemcen et Madame **Louhibi Samira** Maître de Conférences à l'université de Tlemcen pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi aux personnels de l'usine d'Al Zinc pour m'avoir effectué les dosages en spectrophotomètre atomique à flamme, à Madame **Sahli F.**, responsable du laboratoire de génie civile pour nous avoir aidé à faire les analyses granulométriques, pour le dosage du calcaire totale et à mesurer le pH.

J'exprime aussi mes remerciements aux personnels du laboratoire de Sonatrac pour les analyses de la CEC.

Que mes remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Enfin, je remercie affectueusement ma femme, mes enfants et mes parents.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les métaux et les métalloïdes sont présents naturellement dans les sols. Le développement de l'activité industrielle (industries métallurgiques et chimiques) et de l'activité agricole (pesticides, engrais, ...) depuis le siècle dernier a entraîné des apports parfois intensifs de ces éléments qui deviennent des polluants pour l'environnement. Même à faibles concentrations, ils peuvent constituer un sérieux problème de santé publique du fait de leur toxicité et de leur caractère bio-accumulatif ^[1].

La contamination métallique des sols, suite aux retombées atmosphériques locales (industrielles et urbaines) et à des apports divers (boues de stations d'épuration, composts, engrais...) anciens ou actuels, explique notamment dans les horizons de surface, les teneurs actuelles en éléments traces métalliques (ETM) tels que cadmium (Cd), cuivre (Cu), zinc (Zn) et plomb (Pb) ^[2]. Cependant, malgré un effet d'accumulation évident, le transfert de métaux vers la profondeur est également noté, le plus souvent déduit à partir de comparaisons des teneurs totales en métaux dans les différents horizons d'un sol ^[3]. Parmi les éléments métalliques cités, certains sont des oligo-éléments comme le Zn et le Cu, mais deviennent toxiques à fortes concentrations ^[4]. D'autres comme le Pb ou le Cd sont toxiques dès l'état de trace. Leur accumulation et leur transfert constituent donc un risque pour la santé humaine via la contamination de la chaîne alimentaire, mais aussi pour le milieu naturel dans son ensemble ^[5].

La prévention de ce risque passe ainsi par une meilleure compréhension du milieu naturel (sol, eau) et du devenir de ces polluants dans ce milieu. Aujourd'hui, de nombreuses études environnementales ayant pour but d'évaluer les risques cherchent donc à déterminer la dynamique à plus ou moins long terme des contaminants métalliques de la surface vers la nappe (mobilité) ou vers l'homme, la faune du sol, les microorganismes et les plantes (biodisponibilité).

Si la connaissance des teneurs totales en métaux contenus dans un sol constitue une étape indispensable à l'évaluation de l'importance de la contamination (danger), ce sont davantage les formes chimiques sous lesquelles se trouvent les métaux (spéciation) ainsi que les conditions physico-chimiques du milieu qui permettent d'appréhender le risque de ces polluants pour l'environnement et pour l'homme.

Ainsi l'étude du devenir (incorporation, altération des scories et/ou biodégradation et redistribution) des métaux dans les sols nécessite de prendre en compte non seulement la

nature des sols, mais aussi leur fonctionnement (couverture végétale, activité biologique, circulation de l'eau et microstructures du sol) directement lié à l'usage du sol par l'homme.

En effet l'usage, les pratiques agricoles, et/ou les pratiques polluantes déterminent les conditions physico-chimiques du milieu, la nature et la stabilité des associations constituants-métaux en modifiant le fonctionnement du sol.

Ainsi on se propose dans ce présent travail d'évaluer d'une part la contamination ou le risque d'une contamination métallique par les éléments traces métalliques (ETM) (Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Mn et Fe) dans les sols agricoles irrigués par les eaux usées, les eaux du barrage de Hammam Bouhrara et les eaux de Oued Tafna et dans les plantes alimentaires (le maïs, le blé dur et le poivron) des années 2006 à 2010, à proximité des axes urbains, routiers et d'oued Tafna, de la ville de Hammam Bouhrara en se référant aux valeurs de références, De mieux comprendre la sensibilité des sols aux dépôts des polluants métalliques. Dire si ces sols joueront-ils un rôle d'immobilisation des métaux lourds ou transféreront-ils ces métaux vers les végétaux et les animaux (biodisponibilité) donc vers l'homme. Et d'autre part de mettre en évidence le rôle de la végétation dans l'interception, la distribution et l'accumulation des métaux lourds et enfin, infirmer ou confirmer l'impact négatif de l'irrigation des sols de la région par de telles eaux usées.

Une autre raison qui a motivé le choix de cette étude et qu'en Algérie, seuls les environnements industriels (aquatiques et atmosphériques), ont été jusqu'ici considérés. En revanche le comportement des métaux dans les sols, ont été très peu étudiés.

Le but de cette thèse est donc de déterminer l'impact des métaux lourds depuis les sols agricoles vers les racines, puis les parties aériennes du blé dur, du poivron et du maïs par une approche pluridisciplinaire telles que:

- Les paramètres physiques par l'analyse granulométrique du sol du blé dur (dans les saisons d'hiver, de printemps et d'été), des sols du poivron et du maïs (dans les saisons d'automne, de printemps et d'été) durant les années 2006 - 2010.
- Les conditions physico-chimiques du sol du blé dur (dans les saisons d'hiver, de printemps et d'été), des sols du poivron et du maïs (dans les saisons d'automne, de printemps et d'été), notamment le pH, l'humidité résiduelle, la CEC, les matières organiques, le calcaire total et le carbone total durant les années 2006 – 2010.
- Déterminer les teneurs totales des métaux lourds (Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Mn et Fe) présents dans le sol du blé dur (dans les saisons d'hiver, de printemps et d'été), dans les sols du poivron et du maïs (dans les saisons d'automne, de printemps et d'été) et dans les végétaux alimentaires (blé dur, poivron et maïs) par l'extraction simple en utilisant divers

réactifs comme l'eau régale, les solutions salines (NH_4OAC , NaNO_3 , CaCl_2 et NH_4NO_3), le complexe (ETDA) et l'acide (HCl) durant les années 2006 – 2010.

- Déterminer les teneurs des métaux lourds (Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Mn et Fe) présents dans le sol du blé dur (dans les saisons d'hiver, de printemps et d'été), dans les sols du poivron et du maïs (dans les saisons d'automne, de printemps et d'été) durant les années 2006 – 2010 par l'extraction séquentielle sélective selon la méthode de Tessier qui permet de déterminer la répartition des métaux lourds sur les fractions (argiles, oxydes métalliques, carbonates, etc) et d'identifier les phases du sol qui interviennent dans la solubilisation et la rétention des polluants métalliques.

Cette thèse s'organise ainsi en trois chapitres, décrits comme suit:

- Le premier chapitre présente une revue bibliographique, posant quelques définition et notions usuelles et scientifiques d'un sol, de ses constituants, des métaux lourds et de leurs interactions avec les sols, du transfert sol-plante et des différents facteurs contrôlant le prélèvement des métaux lourds par les plantes.

- Le second chapitre, décrit d'une part la démarche scientifique entreprise et le matériel utilisé pour la détermination des teneurs en métaux lourds dans le sol et dans la végétation et d'autre part présente le site d'étude choisi pour répondre au mieux aux objectifs fixés.

- Les résultats et les discussions seront consignés dans le chapitre III.

- Enfin, une conclusion et la présentation des diverses perspectives concluront ce travail.

Synthèse Bibliographique

I- Le sol et ses constituants

I.1- Qu'est-ce qu'un sol ?

Le sol provient en général de l'altération de la roche mère sous-jacente, appelée sous-sol. La pédologie décrit les différents types de sols ainsi formés, en distinguant la couche arable et le sol sous-adjacent. L'agriculture travaille la couche arable, plus riche en matières organiques. L'horizon sous-jacent, entre la couche arable et la roche mère, contribue aussi à la nutrition de la plante en éléments minéraux et en eau (fig 1).

L'agronomie s'intéresse à ces deux horizons à travers le profil cultural [6].

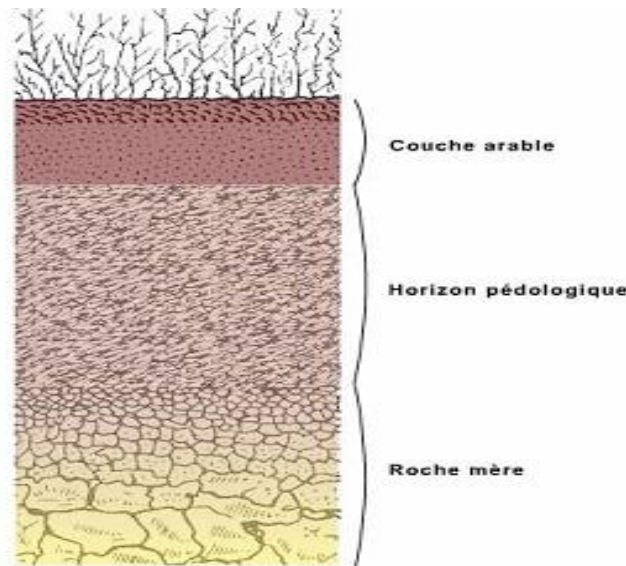


Figure 1: Structure d'un sol

I.2- Composition physique du sol

Le sol comprend quatre éléments principaux: l'air, l'eau, les constituants minéraux et la matière organique.

I.2.1- Les constituants minéraux

I.2.1.1- Les minéraux primaires

Les minéraux primaires des sols tels que quartz, feldspaths, micas..., sont hérités de la roche mère, grâce aux processus de désagrégation mécanique [7].

Les argiles sont décrites en termes pédologiques et granulométriques comme les particules du sol dont le diamètre est inférieur à 2 μm . Ce sont des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés, microcristallins, à structure en feuillets (phyllithes), provenant de l'altération géochimique et biochimique progressive des minéraux primaires du sol dépourvus de divers éléments tels que le fer, le magnésium et le calcium [7].

I.2.1.2- Les minéraux secondaires

a- Les argiles

Les argiles présentent surtout deux caractéristiques essentielles qui en font des minéraux diversement réactifs:

D'une part, les argiles ont une structure formée d'une superposition de feuillets (silicates d'aluminium plus ou moins hydratés, microcristallins) qui leur confère une surface spécifique interne très variée ^[7].

D'autre part, les argiles se caractérisent par une surface électrique non neutre, qui détermine leurs capacités d'échanges ioniques. Ces minéraux portent en fait deux types de charges.

La première, de signe négatif, elle est liée aux substitutions Al^{3+} - Si^{4+} ou Mg^{2+} , Fe^{2+} - Al^{3+} dans les feuillets de l'argile. La seconde, liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux, est une charge de surface variable en fonction du pH du milieu ^[8].

b- Les oxydes et hydroxydes

Les (hydr) oxydes de fer et d'aluminium, sous forme amorphe ou cristalline, sont des constituants communs dans les sols naturels. Les (hydr) oxydes de fer sont les plus abondants (Fe_2O_3 :hématite et maghémite; $FeOOH$: goethite).

Les (hydr) oxydes d'aluminium sont relativement moins fréquents. Enfin les (hydr) oxydes de manganèse, sont généralement minoritaires dans les sols naturels ^[9].

c- Les carbonates, phosphates, sulfates, sulfures et les chlorures

La forme prédominante des carbonates ($R^{2+}CO_3^{2-}$; R= Ca, Mg, Fe mais aussi beaucoup de métaux divalents présents dans les sols pollués tels que Pb, Zn, Cu, etc.) dans la plupart des sols est la calcite ($CaCO_3$). Assez soluble, cette espèce a une influence majeure sur le pH des sols et par conséquent sur les phénomènes de sorption de métaux. En outre, les réactions de dissolution / précipitation des carbonates favorisent le piégeage des ions métalliques au sein des cristaux formés ^[10].

Les phosphates (groupement PO_4^{3-}) sont des minéraux peu abondants dans les sols, mais susceptibles, comme les carbonates, de substitution du calcium par des éléments métalliques divalents (Pb, Zn, Cu), en particulier dans des sols à tendance basique ^[11].

Les sulfates (généralement de la forme $R^{2+}SO_4$) et les arseniates (minéraux d'arsenic As^{+5} comprenant le groupement AsO_4^{-3}), les sulfures($R^{+2}S^{-2}$), les arseniures (minéraux d' As^{+3}) et les chlorures (principalement $R^{+2}Cl_2$) sont des espèces présentes en quantité négligeable dans la plupart des sols, mais qui peuvent être abondantes en contexte industriel ou minier ^[11].

I.2.2- La matière organique

Elle se compose de deux fractions:

- La fraction vivante (micro-organisme, faune épilithique, rhizosphère des végétaux supérieurs, animaux fouisseurs). Son influence sur la fixation des éléments trace est importante, elle modifie le potentiel redox ou le pH^[11].
- La fraction morte (débris végétaux et animaux plus ou moins décomposés en humus, carbone rapporté)^[11].

La matière organique est donc un facteur clef des échanges ioniques et des cycles géochimiques des éléments métalliques.

I.2.3- L'eau dans le sol

La réserve en eau assure la quasi-totalité des besoins en eau de la plante. L'eau dissout les éléments nutritifs pour constituer la solution du sol qui est absorbée par les racines. Plus la texture d'un sol est fine, plus sa réserve en eau est élevée. La part de l'eau qui s'infiltre dans le sol est d'autant plus importante que la surface offre plus d'obstacles au ruissellement et que la structure du sol est plus grossière. L'eau d'infiltration se charge sur son passage en oxygène, gaz carbonique et sels minéraux^[12].

Une partie de l'eau du sol est prélevée par la plante pour son alimentation mais aussi pour composer les pertes par évapotranspiration au niveau des feuilles.

Une autre partie de l'eau du sol peut être perdue par transpiration par les feuilles ou par évaporation à la surface du sol, qui peut être réduite par paillage ou brise-vent.

I.3- Définitions d'un sol pollué ou contaminé

D'après Juste cité dans (*Baize*)^[13], «contamination» doit être employée pour les sols lorsqu'il y a des apports anthropiques importants mais sans effet apparent pour l'environnement. Par contre, il préconise le terme «pollution» lorsque des apports liés à des activités humaines ont des effets négatifs visibles sur l'environnement.

A la notion de contamination on peut associer deux idées:

un accroissement des teneurs suite aux activités humaines, locales ou générales et un accroissement du risque de nuire aux fonctions des sols naturels.

Pour le polluant est défini comme un élément dangereux susceptible de présenter un risque pour les milieux et les organismes vivants^[14].

Toutefois les termes «polluant» et «contaminant» sont la plupart du temps synonymes.

I.4- Les principaux types de polluants du sol:

I.4.1- Les composés organiques

Ces composés sont issus de pratique récente liée à l'ère industrielle, qui sont:

- les hydrocarbures ou huiles minérales,
- les produits organiques industriels tels que le trichloréthylène,
- les pesticides: les phénomènes de ruissellement et d'infiltration de ces substances

Participent ainsi à la pollution des cours d'eau, eaux souterraines et zones littorales,

- les substances militaires.

I.4.2- Les composés inorganiques

Cette famille est principalement composée par les métaux lourds, également appelés « éléments traces ». Tous ces composés se retrouvent à l'état naturel dans l'environnement. Leur dangerosité s'exprime dans une inhalation ou ingestion directe des poussières.

I.4.2.1- Définition des métaux lourds

Dans la croûte terrestre, douze éléments l'oxygène(O), le silicium(Si), l'aluminium(Al), le fer (Fe), le calcium (Ca), le sodium (Na), le potassium (K), le magnésium (Mg), le titane (Ti), l'hydrogène (H), le phosphore (P), le manganèse (Mn), constituent plus de 99% en poids du total de l'ensemble des éléments et sont présents à des teneurs moyennes supérieures ou égales à 1g/kg. Les autres éléments (68 éléments minéraux), dont les teneurs sont inférieures à 1g/kg, sont désignés sous le terme d'éléments traces métalliques (ETM)^[15].

Un métal lourd possède, entre autres caractéristiques, celle de présenter une densité supérieure à 5 g/cm³. Les métaux lourds que l'on retrouve le plus souvent dans le sol sont: le cadmium, le manganèse, le cobalt, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel et le zinc. L'arsenic est métalloïde lourd, peut également être associé à cette catégorie. Nieboer et Richards^[16], après modification de la classification de Pearson^[15], proposaient d'abandonner le terme métaux lourds au profit d'une classification séparant les ions métalliques en trois classes (tableau 1). Ces trois classes nommées A, B et C se différencient par la stabilité des complexes formés par des ions métalliques avec divers ligands.

Tableau 1: Classification en fonction de l'affinité des ions métalliques pour différents ligands ^[16].

Classe A	Métaux ayant une forte affinité vis-à-vis des ligands contenant des atomes d'oxygène (O^{2-} , OH^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , SO_4^{2-} ...)
Classe B	Métaux ayant une forte affinité vis-à-vis des ligands contenant des atomes d'azote ou du soufre (S^{2-} , CN^- , RS^- , R_2S , R_3As , H^- ...)
Classe C	Classe intermédiaire des métaux se liant indifféremment aux ligands à base d'oxygène, d'azote ou de soufre.

Dans les sols, les métaux sont naturellement présents, sous des formes relativement peu mobiles et à faible teneurs. Les éléments les souvent impliqués dans les pollutions appartiennent aux classes B et classes C du tableau 1, tels que Hg, Ag, Pb, Cu, Ni, Zn et Cd.

I.4.2.2- Origine des métaux lourds

a-Origine naturelle

Ces métaux lourds sont présents de façon naturelle dans le sol et sont majoritairement le résultat d'une altération de la roche mère du sous-sol ^[17]. Toutefois, les différentes activités humaines contribuent également à augmenter leur quantité ; il s'agit :

b-origine anthropique

Les teneurs les plus élevées en éléments inorganiques rencontrées dans les sols sont fortement liées à l'activité humaine.

Les principales activités sont les suivantes:

- Pratiques agricoles due aux épandages d'insecticides, de fongicides, d'engrais, de boues résiduaires urbaines ou de composts d'ordures ménagères,...etc.
- Pollution dues aux retombées atmosphériques telle que l'industrie extractive et métallurgique, pratiques liées à l'incération, utilisation des énergies fossiles, essence au plomb, etc.
- Stockage de déchets urbains ou industriels dues aux résidus des activités de mines et de fonderies de métaux, installations de stockage de déchets,...etc ^[8,18].

Les teneurs en métaux lourds dans des sols de France, néerlandaises, européenne et du monde, pouvant servir de valeurs de références sont classés dans les tableaux (2-6).

Tableau 2: Différentes normes et références françaises de teneurs totales en métaux lourds dans les sols exprimées en mg/Kg /MS ^[19].

	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn	Se
P.Godin (1983)									
Seuil d'anormalie	2	30	150	100	50	100	300	270	
Seuil d'investigation	4	60	300	200	100	200	600		
Seuil de traitement	10	150	750	500	250	500	1500		
Seuil d'urgence	20	300	1500	1000	500	1000	3000	3000	
Norme AFNOR NF U44-041(1985)	2		150	100	50	100	300		10
Article 11 de l'arrêté du 8/ 01 / 1998	2		150	100	50	100	300		

Tableau 3: Valeur cibles néerlandaises pour les éléments traces pour quelques types de sols, valeurs en mg/kg /MS ^[20].

Sols	Sol standard	Sol sableux	Sol argileux
ETM	A=25 ; H=10	A=3 ; H=2	A=30 ; H=5
As	29	17	29
Cd	0,80	0,46	0,71
Cr	100	56	110
Cu	36	17	36
Hg	0,30	0,21	0,31
Ni	35	13	40
Pb	85	55	85
Zn	140	62	147,5

A= pourcentage de particules inférieures à 2µm; **H=** pourcentage de matières organiques.

Tableau 4: valeurs seuils en ETM (mg/kg/MS) pour les sols (France et UE).

ETM \ Arrêté	Directive 86 /278 /EEC	Arrêté du 8 janvier 1998	Projet de révision de la directive européenne (2000)		
			5< pH<6	6<pH<7	PH> 7
Cd	1 à 3	2	0,5	1	1,5
Cr	-	150	30	60	100
Cu	50 à 140	100	20	50	100
Ni	30 à 75	50	15	50	70
Pb	50 à 300	100	70	70	100
Zn	150 à 300	300	60	150	200

Directive 86 /278 /EEC, art ^[21].

Tableau 5: Teneurs critiques en oligo-éléments dans les sols ^[22].

Elément	Toxicité
Cu	125
Mn	1000-3000
Zn	400
Ni	100
Co	50

Tableau 6 : Valeurs de référence pour déterminer le niveau de contamination d'un sol en mg.kg⁻¹/MS

Sol (mg/Kg)					Couche superficielle (moyen) ^c	Sédiment (moyen) ^{c [25]}
Elément	Moyen ^a	Valeur ^{a [23]}	Moyen ^b	Valeur ^{b [24]}		
Fe	26000	100-100000	40000	2000-550000	41000	41000

I.5- Autres composés inorganiques

S'ajoutant à la grande catégorie des métaux lourds, d'autres composés inorganiques qui sont: les cyanures; les nitrates et nitrites provenant en grande partie des engrais; les fluorures, provenant de l'industrie métallurgique et chimique; les sels de sodium, dus à une mauvaise pénétration des eaux issues de l'irrigation, ou à un mauvais drainage du sol.

I.6- Toxicité des métaux lourds

Tout élément est toxique quand il est absorbé en excès par rapport à la capacité d'assimilation de l'organisme. La toxicité des métaux pour les micro-organismes du sol est principalement due à leur capacité à établir des complexes stables avec les protéines ce qui peut altérer les sites actifs ou déplacer des co-facteurs métalliques essentiels [26].

Les différents types d'effets possibles de sept métaux lourds sur les plantes et les animaux sont présentés dans le tableau 7.

La toxicité des métaux lourds pour un même organisme dépend du type de sol, de sa disponibilité de chaque minéral dans ce sol, de l'état physiologique du micro-organisme [26]. Les éléments les plus souvent rencontrés comme phytotoxiques sont le cuivre, le manganèse, le nickel et le zinc [27]. Les plus toxiques pour l'homme sont notamment, le cadmium, le mercure, le chrome et le plomb. Il est ainsi distingué une toxicité aiguë (absorption en forte dose sur un court laps de temps) et une toxicité chronique (absorption à faible dose sur temps plus long).

Tableau 7: Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité [28].

ETM	Plantes	Animaux	Densité g/cm ³
Cd	T	T	8,65
Cr	-	E	7,20
Cu	E	E	8,92
Ni	T	E	8,90
Pb	T	T	11,34
Zn	E	E	7,14
Mn	E	E	7,20

T : toxique, E: essentiel

I.7- La spéciation des métaux traces dans les solutions du sol

Suivant les propriétés physico-chimiques des éléments traces, leur état et leur dynamique dans les sols seront différents [29, 30].

D'un point de vue environnemental, la spéciation correspond à la distribution des espèces chimiques d'un élément dans un système [31]. La spéciation englobe l'identification, la séparation et la détermination de toutes les formes physico-chimiques d'un élément dans l'échantillon qui réunies, forment la concentration totale de l'élément [32]. La spéciation chimique a été utilisée dans différents contextes pour décrire: les analyses des espèces pour leur identification et leur quantification; les processus responsables de la distribution des

espèces, la réactivité des espèces ^[32]. Chaque espèce possède ses propres caractéristiques chimiques et réagira différemment selon l'environnement. La spéciation chimique d'un métal dépend de son état d'oxydation, de son interaction avec les autres composés du système (argiles, matières organique, oxyhydroxydes) et des conditions du milieu (pH) ^[8, 33, 34].

La détermination de la concentration totale en élément, bien qu'insuffisante pour décrire les processus environnementaux, est réalisée dans le but d'estimer l'importance des éléments présents d'un point de vue quantitatif ^[31]. Les éléments traces métalliques (ETM) existent sous plusieurs formes chimiques (particulaires, colloïdales, dissoutes) au sein des formations pédologiques et peuvent être mobilisés dans la solution du sol selon différents mécanismes. Leur passage dans la solution est contrôlée par la forme sous laquelle ils se trouvent dans la phase solide, à savoir: échangeables, complexés à la surface des constituants du sol, ou co-précipités ^[32, 35-37] (Fig.1').

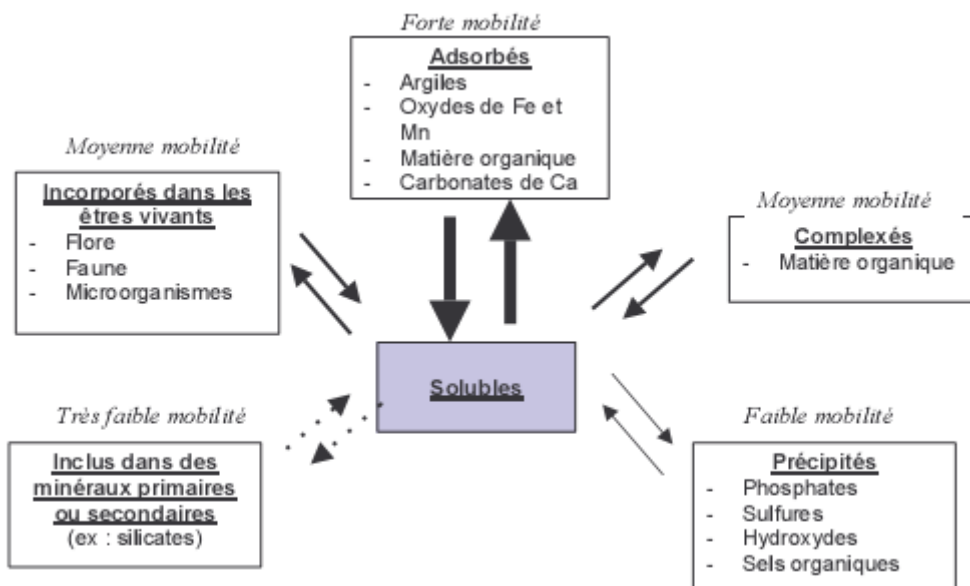


Figure1': Localisation (spéciation) des éléments en traces métalliques (ETM) dans le sol

Les ions métalliques libres et les espèces neutres, sont les formes les plus réactives, car plus facilement assimilables par les organismes vivants ^[38]. Les métaux fortement complexés, ou bien les métaux associés à des particules colloïdales sont moins biodisponibles ^[39].

Des études sur la toxicité de certains métaux, et notamment le cuivre sur les poissons, ont montré que la toxicité n'était pas liée à la concentration totale, mais à la concentration de l'ion libre ^[40,41]. La mesure de la concentration totale n'apporte que peu d'informations pour la prédiction du comportement de l'élément métallique dans l'environnement, d'où l'intérêt d'en connaître la spéciation ^[29].

Par ailleurs, un élément métallique retenu à la surface d'un matériau (par physisorption ou chimisorption) sera plus rapidement mis en solution et donc pourra présenter davantage de risque de toxicité que s'il est inséré dans le réseau cristallographique du matériau.

I.8- Phénomène de sorption des éléments métalliques dans les sols

I.8.1- La physisorption: une adsorption non spécifique

L'adsorption non spécifique résulte des forces électrostatiques entre atomes portant des charges de signe différent. L'énergie de liaison est faible. Par conséquent, les éléments métalliques adsorbés sont facilement mobilisables en cas de changements physico-chimiques du milieu ^[42].

I.8.2- La chimisorption: une adsorption spécifique

L'adsorption spécifique fait intervenir une liaison chimique forte, sans molécule d'eau interposée entre le groupe fonctionnel et la surface de l'ion adsorbé. Les éléments métalliques seront moins susceptibles d'être mobilisés. On parle dans ce cas de complexe de sphère interne ^[42]. La forte affinité des composants organiques du sol pour les métaux est principalement due à la présence de nombreux groupements réactifs susceptibles de former des complexes, est résumé dans le tableau 8.

Tableau 8: Affinités ETMs-phases porteuses: -par ETM ^[22]

ETM	Affinités
Cd	Argiles
Co	Fe -MnOOH
Cu	MO > Fe -MnOOH >> argiles
Mn	Fe -MnOOH
Ni	FeOOH, kaolinite
Pb	FeOOH > carbonates > MO > silicates]
Zn	FeOOH, carbonates

MO: Matière Organique

I.8- Facteurs modifiant la mobilité des métaux lourds

I.8.1- Le pH

Le pH constitue un facteur dont le rôle est crucial pour la mobilité des ions métalliques, car il influence le nombre de charges négatives pouvant être mises en solution ^[43]. Les protons proviennent majoritairement de la respiration végétale et microbienne, de l'oxydation des

sulfures. D'une façon générale, lorsque le pH augmente, les cations sont moins solubles et les anions sont plus solubles ^[10].

De plus, l'augmentation de pH induit la formation d'espèces précipitées qui peuvent limiter la solubilité et la biodisponibilité de toutes les espèces ioniques ^[44]. Cependant, elle entraîne également la dissolution de matières organiques et la formation consécutive de complexes organométalliques plus solubles ^[45]. Les variations de pH ont donc des conséquences complexes et parfois contraires sur la mobilité des métaux lourds, ceci est classé dans le tableau 9.

Tableau 9: Effets du pH sur la mobilité des micropolluants métalliques des sols et des sédiments ^[45].

Mobilité relative	Activité protonique	
	Neutre -alcalin	Acide
Très haute	Se, Mo	B
Haute	As	Zn, Cd, Hg, Co, Ni, Mn
Moyenne	Mn	Cu, Al, Pb, Cr
Basse	Pb, Fe, Zn, Cd, Tl	Fe (3) ,Tl
Très basse	Al, Cr, Hg, Cu, Ni, Co	Mo ,Se ,As

I.8.2- Le potentiel redox (Eh)

Le potentiel redox (Eh) permet de caractériser les échanges entre les espèces chimiques. Ainsi, les formes oxydées prédominent pour un potentiel redox élevé, alors que les faibles valeurs favorisent l'apparition d'espèces réduites. Le Cr³⁺ peut ainsi subir une oxydation directe en Cr⁶⁺, plus mobile et plus toxique.

En conditions réductrices, les sulfates sont réduits en sulfures qui piègent les éléments chalcophiles tels que Fe, Zn, Pb, Cd ^[44]. D'autre part, la dissolution des (hydro)oxydes est favorisée entraînant de manière opposée la solubilisation des métaux associés ^[45].

I.8.3- L'activité biologique

La compréhension globale des phénomènes biologiques jouant sur la solubilité des métaux dans les sols est rendue difficile par la multiplicité des actions et interactions à tous les niveaux.

- **La solubilisation:** provient de la production de composés acides tels que les acides carboxyliques, aliphatiques, nitriques et sulfurique. Certaines bactéries chimolithotrophes (Thiobacillus, Leptospirillum) oxydent les formes réduites du fer et du soufre contenues dans

les sulfures et produisent de l'acide sulfurique, susceptible de dissoudre les silicates, les phosphates, les oxydes et les sulfures, libérant ainsi les métaux contenus. Les champignons et les racines des plantes excrètent eux aussi des acides afin d'augmenter leur absorption de nutriments, ou tout simplement comme déchets métaboliques ^[46]. Cette acidification favorise aussi la mobilité des autres éléments qui ne sont pas indispensables pour le métabolisme végétal.

- **L'insolubilisation:** constitue le phénomène opposé. Bien que le phénomène de détoxification externe des métaux par des exsudats racinaires n'ait jamais été démontré ^[47], certains acides organiques de faible masse moléculaire, comme les acides oxalique, citrique ou fumarique qui interviennent dans la complexation intracellulaire d'éléments nutritifs, peuvent être sécrétés dans le milieu extérieur. Ils limiteraient ainsi les transferts par des processus de complexation.

- **La volatilisation:** repose sur l'action directe de certains microorganismes sur le degré d'oxydation de l'espèce métallique. C'est le cas du mercure, de l'arsenic et du sélénium. La biométhylation permet le transfert de groupements méthyle directement aux atomes, Pb (plomb), Sn (étain), Sb (antimoine), permettant leur volatilisation dans l'atmosphère ^[47].

I.8.4- La température

La température du sol dépend en premier lieu du climat, mais elle est également liée à l'activité biologique et influence rétroactivement la formation de complexes avec des ligands inorganiques, en modifiant l'activité de l'élément en solution ^[44]. La température a un impact direct sur la mobilité des éléments métalliques en déplaçant les équilibres des réactions de dissolution-précipitation et co-précipitation, et un impact indirect, en modifiant la teneur en eau du sol, le pH ou le potentiel redox(Eh).

I.9- Estimation de la mobilité des métaux lourds

Afin d'estimer la mobilité des métaux lourds, on utilise des agents chimiques pour isoler et extraire les métaux associés à certaines phases identifiées du sol ^[47]. Il existe principalement deux types d'extraction:

I.9.1- L'extraction spécifique

Ciblant spécifiquement une fraction du sol ^[49], repose sur l'utilisation d'un seul extractant, qui peut être de l'eau, un solvant organique (éthanol), un sel neutre (KCl, MgCl₂, Ca(NO₃)₂, KNO₃...), un acide faible (acétate, oxalate), un agent complexant (EDTA, DTPA) ou encore un acide fort peu concentré (HCl, HNO₃) ^[43,48]. Les complexants organiques mettraient en solution les éléments échangeables ainsi que ceux complexés principalement par les matières organiques et ceux fixés sur les oxydes de Fe, Mn, Al, susceptible d'être eux-mêmes mis en

solution par le réactif. L'EDTA (acide éthylène diamino tétraacétique) et le DTPA (acide diéthylène triaminepentacétique) sont les composés les plus utilisés. Le tableau 10 montre quelque méthode d'extraction spécifique des ETM du sol.

Tableau 10: Méthodes d'extraction des éléments-traces du sol normalisées ou proposées à la normalisation

Pays	Méthode	Objectif	Référence
France	Na ₂ -EDTA (0,01 mol.l ⁻¹ + CH ₃ COONH ₄ (1mol.l ⁻¹) à pH=7	Teneurs assimilables en Cu, Zn, et Mn (fertilisation)	AFNOR (1996b): NFX 31-147 ^[50]
	DTPA (0,005mol.l ⁻¹) +TEA (0,1 mol.l ⁻¹) +CaCl ₂ (0,01 mol.l ⁻¹) à pH =7,3	Teneurs assimilables en Cu, Zn, Fe et Mn (fertilisation)	AFNOR (1993): NFX 31-121 ^[51]

I.9.2- L'extraction séquentielle

Ce type d'extraction fait appel à plusieurs agents chimiques (de trois à huit), utilisés en chainant les extractions sur un même échantillon (de façon séquentielle) pour déterminer le fractionnement appelé spéciation, des éléments traces métalliques au sein des principaux constituants des sols. Les tableaux 11 et 12 présentent les principaux réactifs utilisés dans les extractions séquentielles.

Tableau11 : Protocole d'extractions séquentielles adapté de rauret et al., 1989 ^[52]

Fractions extraites	Réactif (s)	Mode opératoire (Volume, Durée, Température)
F1: Fraction échangeable	MgCl ₂ (1mol.L ⁻¹), PH=7	8ml ,1h, température ambiante
F2: Fraction acido-soluble	CH ₃ COONa (1mol.L ⁻¹)/CH ₃ COOHpur, PH=5	8ml ,1h, température ambiante
F3: Fraction réductible	NH ₂ OH.HCl (0,04mol.L ⁻¹) dans CH ₃ COOH 25%, PH=2	20mL, 1h, bain-marie à 96±2°C
F4: Fraction oxydable	HNO ₃ (0,02mol/L)/H ₂ O ₂ (30%,PH=2 avec HNO ₃)	3mL HNO ₃ +5mL H ₂ O ₂ ,2h, bain-marie à 85±2°C
F5: Fraction résiduelle	HClO ₄ /HNO ₃	Estimation Ou séchage à l'étuve (30±2°C) pendant 48h, puis attaques acides : 8ml HNO ₃ /HClO ₄

Chaque extraction est suivie d'une étape de centrifugation à 10000 ± 100G pendant 15 ± 2 minutes, puis d'une étape de rinçage avec 20ml d'eau distillée. Le surnageant issu de ce rinçage est mélangé à la solution d'extraction avant analyse des espèces inorganiques étudiées par spectrophotomètre atomique a flamme.

Tableau12 : Protocole d'extractions séquentielles adapté de Jervis et al ^[53]

Fractions	Condition d'extraction	Type(s) de réactif(s)	Jervis et al,1995
F1: métaux échangeables	Sorption-désorption	sol ionique, concentrée, complexant	CH ₃ COONH ₄ 1M.
F2: métaux liés aux carbonates	Conditions réductrices	acide faible	CH ₃ COONH ₄ 1M à pH=5 avec CH ₃ COOH
F3: métaux liés aux oxydes de Fe et Mn	Conditions oxydantes	solution réductrice.	NH ₂ OH-HCl 0,04M dans CH ₃ COOH 25%(V/V)
F4: métaux liés à la MO	Attaque de la matrice cristalline	solution oxydante	HNO ₃ 0,02M+H ₂ O ₂ CH ₃ COONH ₄ 3,2M dans CH ₃ COOH 20%(V/V)
F5: métaux liés à la matrice		acide fort.	HClO ₄ +HF concentré(3fois) HCl 12N jusqu'à dissolution complète
Echantillons étudiés			RFIOM

II- Le transfert sol-plante des métaux lourds

II.1- Le transfert sol-plante

Les plantes sont exposées de deux façons aux métaux lourds: par les parties aériennes et par les racines. Les métaux lourds peuvent être déposés à la surface des feuilles et des racines ou pénétrer dans la plante. Les métaux lourds peuvent y pénétrer par les parties aériennes (feuilles, tiges et fruits), à partir de particules en suspension dans l'air, de composés gazeux ou de composés dissous dans l'eau de pluie ou d'irrigation. Ils peuvent pénétrer par les racines à partir du sol. Une fois prélevés par la plante, les métaux lourds peuvent être piégés et ne pas circuler dans la plante, ou alors transportés du lieu de l'absorption vers un autre organe végétal.

Dans les zones de forte pollution atmosphérique, comme d'une industrie de fabrication d'alliages de métaux ou à côté d'une autoroute, les retombées atmosphériques de métaux sur les parties aériennes des plantes, par les pluies ou les poussières sont importantes. Dans ce cas la contamination des feuilles, tiges et fruits est élevée. Une partie de cette contamination peut être enlevée par simple lavage à l'eau, ce qui montre qu'elle reste à la surface des parties aériennes en dépôt superficiel. Une autre partie reste piégée dans les feuilles par exemple. Il est vraisemblable qu'une troisième partie des métaux lourds peut être transportée dans la plante, mais son importance est controversée ^[54].

II.2- Définition de la phytodisponibilité des métaux lourds

La phytodisponibilité d'un métal lourd c'est la quantité d'élément qui peut être transférée (prélevée) dans la plante durant son développement ^[17].

Elle est la résultante d'un ensemble de processus successifs: l'offre du sol, le transport vers les racines, et le prélèvement par les racines en lui-même, qui contribuent au transfert de l'élément de la phase solide du sol à la solution du sol puis aux tissus de la plante.

II.3- Les facteurs contrôlant le prélèvement des métaux lourds

Le prélèvement des métaux lourds par les racines est sous l'influence de facteurs liés au sol, à la plante, au climat et aux interactions entre les éléments eux-mêmes.

II.3.1- Facteurs liés au sol

II.3.1.1- Le pH

La solubilité d'un métal lourd dépend tout d'abord du pH. Un pH bas augmente la phytodisponibilité des métaux lourds, car l'ion H^+ a une plus grande affinité pour les charges négative sur les colloïdes, et rentre alors en compétition avec les ions métalliques vis-à-vis de ces sites, ce qui induit un relâchage des métaux lourds dans l'eau des pores du sol.

Plus le sol est acide, plus le transfert de Cd, Cu, Co, Cr, Zn, Ni, Hg et As vers la plante est important, car ces éléments sont plus solubles.

La solubilité du Cu est moins affectée par le pH que celle des autres éléments, car deux tendances inverses se contrecarrent. D'un côté le Cu est un métal qui a tendance à être plus soluble en milieu acide et de l'autre côté il est complexé par les matières organiques solubles pour des pH supérieurs à 6,5 ($\text{pH} > 6,5$) [55].

Quand le pH du sol est supérieur à 7 ($\text{pH} > 7$), la solution contient des carbonates et des bicarbonates et la plupart des métaux lourds ne sont pas biodisponibles pour les plantes [58].

Quand le pH est proche de 4, les argiles se dégradent et l'Al domine la solution du sol, l'activité microbienne est inhibée et le phosphate réagit avec les hydroxydes d'Al et les ions ferrique, les phosphates devenant alors indisponibles pour la plante, d'où des problèmes nutritionnels pour celle-ci [56].

II.3.1.2- Potentiel d'oxydoréduction (Eh)

Les conditions lorsqu'elles sont soit réductrices (Eh faible: par exemple un sol hydromorphe, gorgé d'eau), soit oxydantes (Eh élevé: par exemple un sol bien aéré) ont un effet sur la solubilisation des éléments et donc sur leur disponibilité pour les végétaux.

Action directe d'Eh: les anions oxygénés changent de degré d'oxydation selon le potentiel d'oxydoréduction du sol et donc changent de solubilité. Par exemple As(III) réduite est soluble, alors que As (V) oxydée ne l'est pas [57].

Action indirecte d'Eh: le Cd, le Cu, le Co, le Ni, le Pb et le Zn sont divalents dans les conditions classiques de sol et le Tl est monovalent. Pour ces derniers, les effets du Eh sont indirect, par action sur les oxydes de Fe et Mn et sur la matière organique par exemple. Pour ces éléments, la phytodisponibilité peut augmenter ou diminuer selon les cas avec le Eh. En conditions très réductrices, Eh très faible, il y a formation des sulfures d'éléments-traces, qui sont insolubles; le transfert est donc diminué. La circulation de l'eau peut donc modifier la solubilité des éléments en agissant sur le Eh.

Par contre, en conditions réductrices modérées, Eh faible, en milieu peu aéré comme lors d'un excès d'eau dans le sol, les oxydes de fer et de manganèse sont réduits et solubilisés, libérant les éléments qu'ils piégeaient, comme le Cu, le Cd et le Pb [57].

II.3.1.3- Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique représente la quantité maximale de cation de toutes sortes qu'un poids déterminé du sol est capable de retenir ou, autrement dit, le total des charges négatives du sol disponible pour la fixation de cations métalliques ou d'ion H^+ . Une CEC

élevée veut dire que la possibilité de fixation sur les charges négatives augmente. Plus la CEC est élevée, plus les cations métalliques (Cd, Pb, Cr, Co, Zn, Hg, Cu et Tl) sont adsorbés ou complexés par les matières organiques, les argiles et les oxydes, donc moins assimilables par les plantes. C'est pourquoi la quantité et la nature des matières organiques, des argiles et des oxydes dans le sol conditionnent la métalliques des métaux lourds.

Les sols sableux permettent donc un transfert des métaux lourds vers les plantes plus élevé que les sols plus lourds (plus argileux). Le transfert du Cu et du Ni vers les racines est principalement contrôlé par la CEC ^[56].

II.3.2- Facteurs liés à la plante et aux micro-organismes du sol

II.3.2.1- Espèce végétale

Des végétaux d'espèces différentes, cultivés dans les mêmes conditions, n'absorbent pas les mêmes quantités de métaux lourds, et ne les stockent pas dans les mêmes organes (tableau13). Il semble qu'en général, les légumes contiennent plus de métaux lourds que les plantes monocotylédones ^[38]. Il semble par ailleurs, que les concentrations en Zn, Cd, Ni et Cu dans les parties aériennes du trèfle blanc sont mieux corrélées aux teneurs dans le sol que le sont des feuilles de graminée ^[56].

Tableau 13: influence de la variété sur la concentration moyenne en Cd, Cu et Zn en mg.kg⁻¹ de matière sèche de blé tendre français ^[58]

Variétés	Cd	Cu	Zn
Ritma	0,06	2,89	22,53
Sidéral	0,079	3,12	20,64
Soissons	0,087	3,72	22,12
Trémie	0,086	3,002	19,29

Le prélèvement des métaux peut différer selon les différents génotypes de plantes, en relation avec la concentration externe du métal. Trois grandes stratégies existent: Certaines plantes dites « **exclusives** » prélèvent très peu les métaux, même quand ils sont à des concentrations élevées dans le sol.

D'autre dites « **accumulatrices** » présentent de fortes accumulations de métaux lourds même à de très faibles concentrations des métaux dans le sol. Toutefois, lorsque la concentration de métaux dans le sol augmente, ces plantes n'augmentent plus le prélèvement, probablement à cause de compétitions entre ions métalliques pour les sites de prélèvement.

Les dernières dites «**indicatrices**», ont des concentrations de métaux dans leurs tissus qui reflètent la concentration du métal dans le sol et qui augmentent de façon linéaire avec elle ^[59]. Les teneurs normales et critiques en métaux lourds sont présentés dans les tableaux 14 et 15.

Tableau 14: Teneurs normales en métaux lourds dans les plantes (mg/Kg de matière sèche)

[60]

ETM	Teneurs dans les plantes
Cd	0,05
Cr	1,5
Co	0,2
Cu	10
Fe	150
Pb	1,0
Mn	200
Ni	1,5
Zn	50

Tableau 15: Teneurs critiques en métaux lourds (mg/kg de matière sèche) dans les plantes ^[22]

ETM	Déficiéce	Toxicité
Cu	3-5	20-100
Fe	50	1000
Mn	10-20	300-500
Cd	-	5
Zn	15-20	100-400
Ni	1-5	10-100
Co	0,2	15-50
Pb	-	12-300
Cr	-	3

II.3.2.2- Influence de la plante sur le sol

La plante modifie la composition physico-chimique et microbienne du sol proche de la racine, en absorbant des nutriments et en excréant des produits. La racine peut ainsi libérer des sécrétions, des ions métalliques, des mucilages, des cellules mortes, de l'oxygène et du CO₂ dans leur entourage, ce qui a pour effet de changer le potentiel redox et de faire baisser le pH

^[56]. C'est pour cette raison cette zone sous influence racinaire porte un nom spécifique: la rhizosphère.

La capacité des plantes à émettre des exsudats racinaires augmentant la solubilité des métaux lourds dans la rhizosphère dépend des espèces et des cultivars ^[60].

II.3.2.3-Stade et âge de la plante

La quantité de métaux lourds diminue avec le développement de la plante ^[47]. La concentration dans les tissus diminue aussi, c'est ce qu'on appelle effet de dilution. Chez le maïs, il apparaît que le transfert de Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb et Zn vers la plante est interrompu en fin de cycle végétatif ^[61].

II.3.3-Facteurs climatiques

II.3.3.1- Lumière

Le prélèvement de métaux lourds par les plantes tend à augmenter quand la lumière augmente ^[60].

II.3.3.2- Température

Le prélèvement augmente avec la température du sol, jusqu'à une température optimale dépendante de l'espèce végétale ^[47,61].

Il est bien connu que la carence en zinc sur le maïs se manifeste surtout les années à printemps froid. L'élévation de la température racinaire de 15°C à 20°C entraîne un accroissement de la concentration de Cd et Ni de plantules de maïs en solution nutritive ^[61].

II.3.3.3- Humidité

Elle intervient indirectement en favorisant l'activité biologique et donc la production de substance susceptible de mobiliser les éléments, ou en modifiant le potentiel redox du sol (en général un excès d'humidité favorise des conditions réductrices), ou bien en influant sur la profondeur d'enracinement.

En années sèches, les racines descendent plus profondément dans le profil du sol et prélèvent moins de métaux lourds qu'en années humides si les éléments sont d'origine anthropique ^[62].

II.3.4- Facteurs liés aux techniques culturales

Les techniques culturales modifient les conditions du milieu et agissent donc sur les facteurs liés au sol, à la plante et les facteurs climatiques qui contrôlent le prélèvement. Certaines pratiques, comme le travail du sol, agissent à plusieurs niveaux. Le choix du labour, du non labour ou du travail superficiel du sol a de multiples conséquences sur l'état d'aération du sol, son pH, la profondeur d'enracinement des racines. Lors d'un semi direct, la quantité de racines qui reste en surface est plus importante que lors d'un labour profond, modifiant la quantité de

métaux lourds prélevés, puisque la concentration en éléments traces en surface et en profondeur sont différentes ^[63].

II.3.5- Facteurs liés aux caractéristiques des éléments et aux interactions entre éléments

Les racines des plantes sont exposées simultanément à une multitude d'éléments dans le sol et ces éléments interagissent de différentes manières. L'absorption d'un ion est influencée par la présence d'autres éléments ou molécules dans la solution du sol ou dans la plante (tableau 16). Le prélèvement des métaux lourds est souvent inhibé par les macronutriments (surtout Mg, Ca et P) et les métaux lourds peuvent à leur tour inhiber l'absorption des macronutriments.

Certains éléments, ayant une charge et une taille proche, peuvent être en compétition pour un même site d'absorption et la forte concentration de l'un diminue l'absorption de l'autre ^[47].

Le Zn diminue le prélèvement de Cd. Mais par ailleurs, la teneur en Zn chez certaines plantes décroît lorsque le prélèvement de Cd, Pb et Cu augmente ^[60].

Tableau 16: Interaction positives et négatives entre éléments présents dans le sol ^[64]

ETM	Interaction négative (inhibition du transfert)	Interaction positive ou négative selon conditions	Interaction positive (stimulation du transfert)
Cd	Zn, Fe, Ca, P, K, Mn		N, Cu
Cu	Mo, Zn, Al, Mn	Cd, Ca, P, N	Cd
Co	Ca		
Ni	Ca, P		
Pb	Ca, P, S		
Zn	S, Mn, Fe	Ca, Mg, P	
Cr	Mg, Fe, Ca, P, K, Mn		
Mn	Zn, Fe, Cu, Mo, Cr, As		
Fe	Zn, Cr, Mo, Cd, P		
S	Zn, As, Se, Pb, Mo		

III- Particularités de quelques métaux lourds

III.1- Le cadmium

Dans le sol, le Cd se trouve sous les formes chimiques suivantes:

Cd^{2+} , CdSO_4 , CdCl^+ , CdHCO_3^+ , CdO , CdCO_3 , $\text{Cd}(\text{PO}_4)_2$, CdS ^[65]. Très phytodisponible, le Cd peut s'accumuler dans les racines ou les parties aériennes. Le chaulage peut diminuer le transfert du Cd vers les plantes. Le Cd est plus mobile dans le sol que le Cu et le Pb, donc plus disponible pour les plantes.

Le Cd est considéré comme cancérigène pour l'homme et il présente des effets génotoxiques ^[17].

Les apports anthropiques de Cd dans les sols sont importants par rapport aux autres métaux lourds, par l'industrie (essentiellement par voie atmosphérique), les engrais phosphatés, l'épandage de déchets.

III.2- Le nickel

Les formes chimiques du Ni dans le sol sont:

Ni^{2+} , NiSO_4 , NiHCO_3^+ , NiCO_3 .

Le Ni est facilement prélevé par la plante. Il a été postulé que Ni associé aux oxydes de fer et de manganèse semble être le plus disponible pour la plante ^[11]. Les céréales absorbent une quantité nettement plus importante de Ni lorsque celui-ci est ajouté au sol, qu'en étant d'origine géologique. Les grains d'avoine accumulent plus de Ni que la paille. Le chaulage diminue le transfert.

Le Ni est peu toxique pour l'homme. Les effets toxiques du Ni sur le maïs se traduisent par un ralentissement de croissance des racines et par une diminution du nombre de grain par épi, ce qui implique une diminution significative de la production du maïs ^[66].

III.3- Le plomb

Dans le sol le Pb se trouve sous les formes chimiques suivantes:

Pb^{2+} , PbHCO_3^+ , PbOH^+ , PbSO_4 , $\text{Pb}(\text{OH})_2$, PbCO_3 , PbO , $\text{Pb}(\text{PO}_4)_2$, $\text{PbO}(\text{PO}_4)_2$, PbCl^+ ^[68].

Le Pb est très peu prélevé par les racines des plantes où il s'accumule. Le transfert sol-plante du Pb est négligeable par rapport au dépôt direct sur les parties aériennes de poussières contenant du Pb, sur tout dans les zones urbaines ou industrielles ou le long des grands axes routiers.

Le Pb est très toxique pour l'homme. Le fœtus et le jeune enfant sont particulièrement sensibles à l'effet toxique neurocomportemental du Pb, caractérisé par une baisse peu ou pas réversible des facultés cognitives ^[66].

Les apports anthropiques de Pb résultent de cinq groupes d'activités ^[13]:

- Les sources principales sont liées à l'utilisation de composés organométalliques comme antidétonants dans les moteurs à explosion. Le métal est alors rejeté par les gaz d'échappement.

- Les sources industrielles: libération de Pb par les usines de traitement du minerai ou lors de recyclage des batteries.

- Les déblais des mines et les poussières des crassiers.
- Les boues de station d'épuration.
- Certains pesticides étaient fabriqués à base de Pb.
- Le Pb est un des polluants métalliques les moins mobiles dans le sol.

III.4- Le zinc

Dans le sol, le Zn est sous les formes chimiques suivantes:

Zn^{2+} , $ZnSO_4$, $ZnHCO_3^+$, $ZnCO_3$, $ZnFe_2O_4$, Zn_2SiO_4 , $Zn_3(PO_4)_2$ ^[67].

Le Zn est fortement phytodisponible, et se trouve en quantités plus élevées dans les racines que dans les parties aériennes. Le chaulage diminue le transfert du Zn vers les plantes.

Les formes solubles de Zn sont facilement assimilables par les plantes. La vitesse d'absorption dépend largement du genre, de l'espèce et de la variété (450g de Zn/ha/an pour une culture de maïs, 670g Zn/ha/an pour hêtrière de 130ans).

Le Zn est peu toxique pour l'homme et ses dangers résultent plutôt d'une déficience. De même, la carence en Zn est plus fréquente chez les ruminants que ses manifestations toxiques ^[17].

Les apports anthropiques de Zn résultent de trois groupes d'activités majeures ^[13]:

- Les sources minières et industrielles: traitement du minerai, raffinage, galvanisation du fer, gouttières, toitures, fabrication de piles électriques, pigments, matières plastiques, caoutchouc.

- Les épandages agricoles: on retrouve le Zn en abondance dans les lisiers.
- De nombreuses activités urbaines et le trafic routier libèrent du Zn dans

l'environnement: toitures, gouttières, usure de pneus de voitures, incinération des déchets domestiques.

III.5- Le chrome

Selon le pH et le potentiel redox du sol, le chrome peut exister sous forme anionique ou cationique, sous forme trivalente (Cr^{3+} et CrO^{2-}) ou hexavalente ($Cr_2O_7^{2-}$ et CrO_4^{2-}).

Le chrome hexavalent, qui est essentiellement issu des activités industrielles, est en grande partie réduit en Cr^{3+} , notamment pour des pH inférieurs à 5 et en présence d'agents réducteurs comme le soufre et la matière organique.

Le chrome hexavalent non réduit peut se maintenir à l'état anionique mobile ou s'adsorber sur les oxydes de fer.

Le chrome trivalent, plus stable, prédomine sous forme organométallique soluble ou, plus généralement, sous forme précipitée d'oxydes hydratés, associés ou inclus dans des oxydes de fer et des complexes organométalliques insolubles. Moins de 1 % du chrome est extractible par des réactifs tels que l'EDTA, le chrome est donc peu mobile.

Sous une forme adsorbée sur les hydroxydes métalliques, le Cr est peu disponible aux végétaux. La concentration en Cr des végétaux est donc principalement contrôlée par la concentration du Cr en solution dans le sol. Le Cr dans un sol neutre ou basique sera donc plus disponible vis-à-vis des plantes que dans un sol acide.

Le chrome est utilisé dans le traitement de surface des métaux. Il est nocif à l'état hexavalent, mais il est rapidement transformé en forme trivalente moins dangereuse dans le milieu marin [14].

III.6- Le cuivre

Le Cu est un des éléments les plus essentiels pour les plantes et les animaux. En effet l'organisme ne peut croître complètement en son absence. Il ne peut être remplacé par un autre élément, il a une influence directe sur l'organisme et le bon fonctionnement de son métabolisme.

Le cuivre est considéré comme l'élément le plus mobile des métaux lourds, par référence aux processus supergènes.

Les formes chimiques du Cu présentent dans le sol sont:

Cu^{2+} ; CuOH^+ ; $\text{Cu}(\text{OH})_2$; CuO ; CuCO_3 ; CuO_2^- ; Cu-O-Fe ; Cu-O-Al ; Cu-O-Mn .

Dans le sol, le cuivre est bien réparti le long du profil et se fixe préférentiellement sur la matière organique (25 à 50 %), 98% du Cu soluble dans le sol se trouvent complexés à la matière organique, les oxydes de fer, de manganèse et les argiles. La répartition cuivre entre ces différentes fractions est fonction du pH, de la quantité et de la composition de la matière organique d'une part, et des colloïdes minéraux d'autre part. En métallurgie, il entre dans de nombreux alliages. Les sels de cuivre (sulfate, acétate, dérivés organiques) sont utilisés comme fongicides ou algicides en agriculture, pour les traitements chimiques de surfaces, la fabrication de peintures et de céramiques. En dehors des pollutions industrielles ou de

traitements agricoles, ce métal provient habituellement de la corrosion des tuyauteries de distribution ^[66]. Le cuivre présent dans les racines est entièrement sous forme complexée, mais la pénétration racinaire doit quand même se réaliser à l'état de formes dissociées.

III.7- Le cobalt

Dans les sols, le cobalt produit sous forme Co^{2+} et Co^{3+} , est fortement adsorbé sur les oxydes de fer et de manganèse, ainsi que sur la matière organique et les argiles. De ce fait, le cadmium ne migre pas en phase soluble. Par contre, les chélates organiques sont très mobiles dans le sol et le cobalt lié est facilement biodisponible, en particulier aux pH élevés et dans les sols bien drainés ^[66].

III.8- Le fer

Dans des conditions aérobies, Fe^{2+} est libéré et il s'oxyde en Fe^{3+} et précipite sous forme d'oxydes insolubles. Dans le sol, le fer présente une grande affinité pour les complexes organiques mobiles et les chélates. Ces composés interviennent dans la migration du fer dans les horizons du sol. Le fer est assez mobile dans les sols acides et envoyés régulièrement (sous forme réduite Fe^{2+}) ^[66].

III.9- Le manganèse

La plus grande partie du manganèse du sol se trouve sous forme d'oxydes en équilibre avec les ions Mn^{2+} adsorbés sur le complexe argilo-humique ou présents, à des concentrations de 10^{-6} à 10^{-4}M dans la solution du sol. La mobilité du manganèse est très dépendante du pH mais aussi des conditions redox du milieu:

- À pH inférieur à 6,5 ($\text{pH} < 6,5$): les formes les moins oxydées dominent, ce sont elles qui libèrent le plus facilement Mn^{2+} , forme sous laquelle s'effectue préférentiellement le transfert de manganèse.
- Au delà de $\text{pH} = 7$: la prédominance des oxydes tri et tétravalents, extrêmement peu soluble limite considérablement la mobilité de cet ETM.
- Contrairement à beaucoup d'autres ETM, l'aptitude du manganèse à la complexation par des substances organiques est peu marquée, de sorte que l'essentiel des transferts s'effectue sous forme d'ions Mn^{2+} libres ^[66].

Les Sols Etudies - Matériels et Protocoles Expérimentaux

I- Les sols étudiés-matériels et protocoles expérimentaux

Ce chapitre décrit, d'une part les échantillons de sols étudiés, leurs origines et les différents prétraitements qu'ils ont subi, et d'autre part, l'ensemble des techniques et des protocoles expérimentaux utilisés au cours de cette étude.

I.1- Présentation de la zone d'étude :

La zone d'étude, où les échantillonnages de sol ont eu lieu, se situe à Hammam Bouhrara, à 60 Km de la ville de Tlemcen et de 12 Km de la ville Maghnia.

C'est un site représentatif du contexte de contamination tant par les eaux usées des usines de Maghnia que par les retombées atmosphériques.

En effet, ces sols se trouvent d'une part sur un axe qui assure un trafic routier important et d'autre part ils sont irrigués par les eaux usées urbaines, les eaux d'Oued Tafna et les eaux du barrage de Hammam Bouhrara.

Le barrage de Hammam Bouhrara (mise en eau en 1999) est situé sur la confluence de oued Mouilah avec oued Tafna à 10 km en aval de la ville de Maghnia (coordonnées Lambert du site X=102,920, Y=85,200 voir la carte N°2). Il est destiné à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation. La cuvette du barrage constitue l'exutoire principal de l'oued Mouilah dont le bassin versant s'étend sur une superficie de près de 2650km². Il est composé d'une vaste plaine riche en terres agricoles et en réseau hydrique. Autour de ces richesses hydriques et pédologiques, il s'y est développé d'importantes activités agricoles, industrielles et commerciales engendrant une importante pollution des milieux hydriques et terrestres (fig. 2, 3). Cette pollution se propage et se diffuse pour atteindre finalement le barrage Hammam Bouhrara qui constitue le récepteur de tous les rejets aussi bien solides et liquides de l'ensemble des activités du périmètre que ceux provenant du Maroc ^[67]. Oued Mouilah, avec ses nombreux affluents, constitue également une importante source de pollution pour le barrage car il draine en Algérie les eaux domestiques et industrielles de l'importante ville frontalière marocaine d'Oujda et sa périphérie, ses affluents sont:

- **Oued Isly:** Il draine la région sud d'Oujda et plus particulièrement le gisement minier de plomb et de zinc ^[68].
- **Oued El Heimer:** Il reçoit les eaux industrielles de la mine de Sidi Boubeker et les eaux urbaines des agglomérations de la région ^[68].
- **Oued BouNaim:** Ce dernier draine toutes les eaux usées urbaines et industrielles de la ville d'Oujda et d'autres agglomérations secondaires avoisinantes Beni drar, El Aleb ^[68].

- **Oued Ourdeffou:** Cet oued se forme au niveau de Maghnia par l’affluent oued lemhaguene et oued Aouina, traverse la ville de Maghnia en drainant les eaux usées urbaines, les eaux résiduaires industrielles de l’ENOF ainsi que les déchets solides (décharges sauvages dans le lit de l’oued). A l’est de Maghnia il rejoint oued abbés en véhiculant les eaux industrielles [68].
- **Oued Lemhaguene et oued Aouina:** Les deux oueds forment l’oued ouerdeffou au sud de la ville de Maghnia. Ils drainent surtout les eaux de lessivage des terres agricoles [68].
- **Oued Abbes:** Cet oued draine les terres agricoles au sud de Maghnia et reçoit les eaux usées des entreprises ENCG, CERTAF, ERIAD [68].

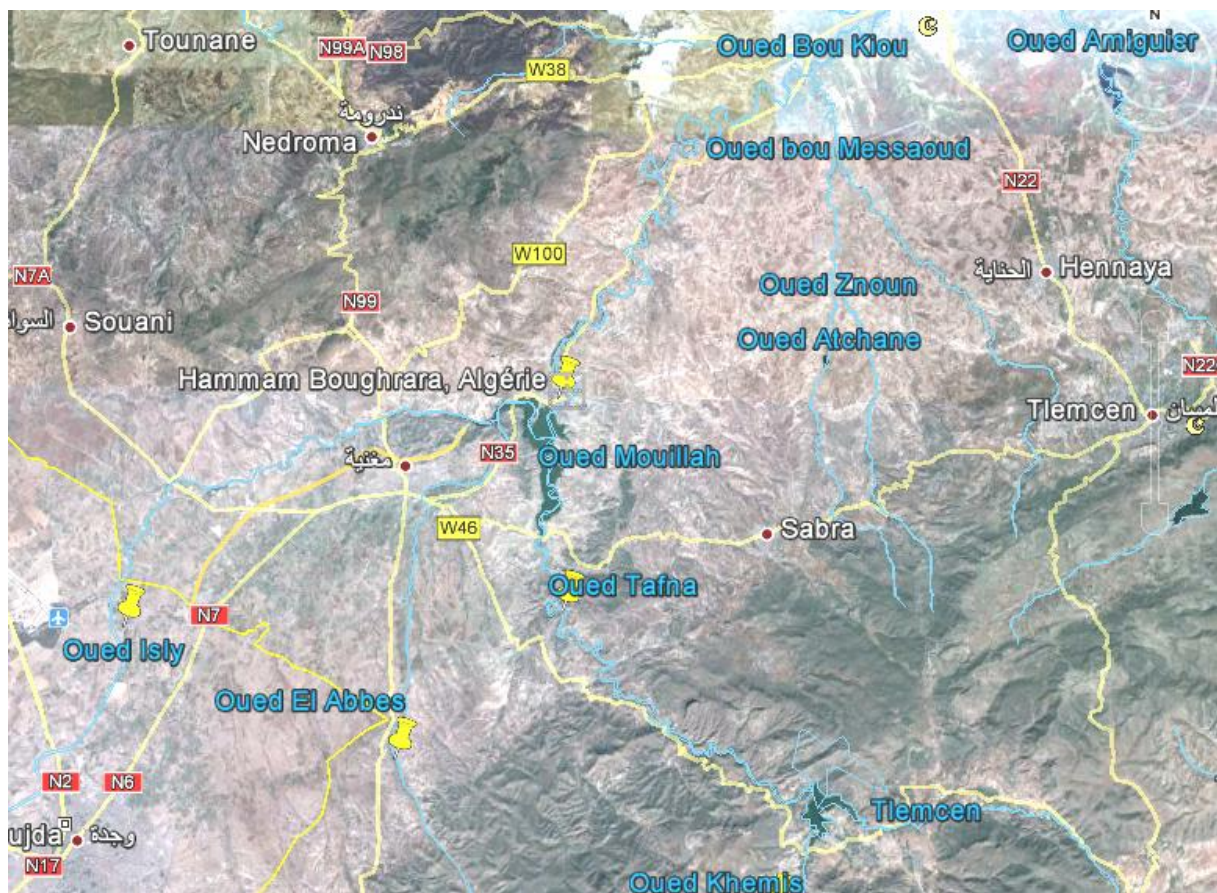


Figure 2: Situation de barrage et les réseaux hydrographiques du bassin versants dans la Tafna

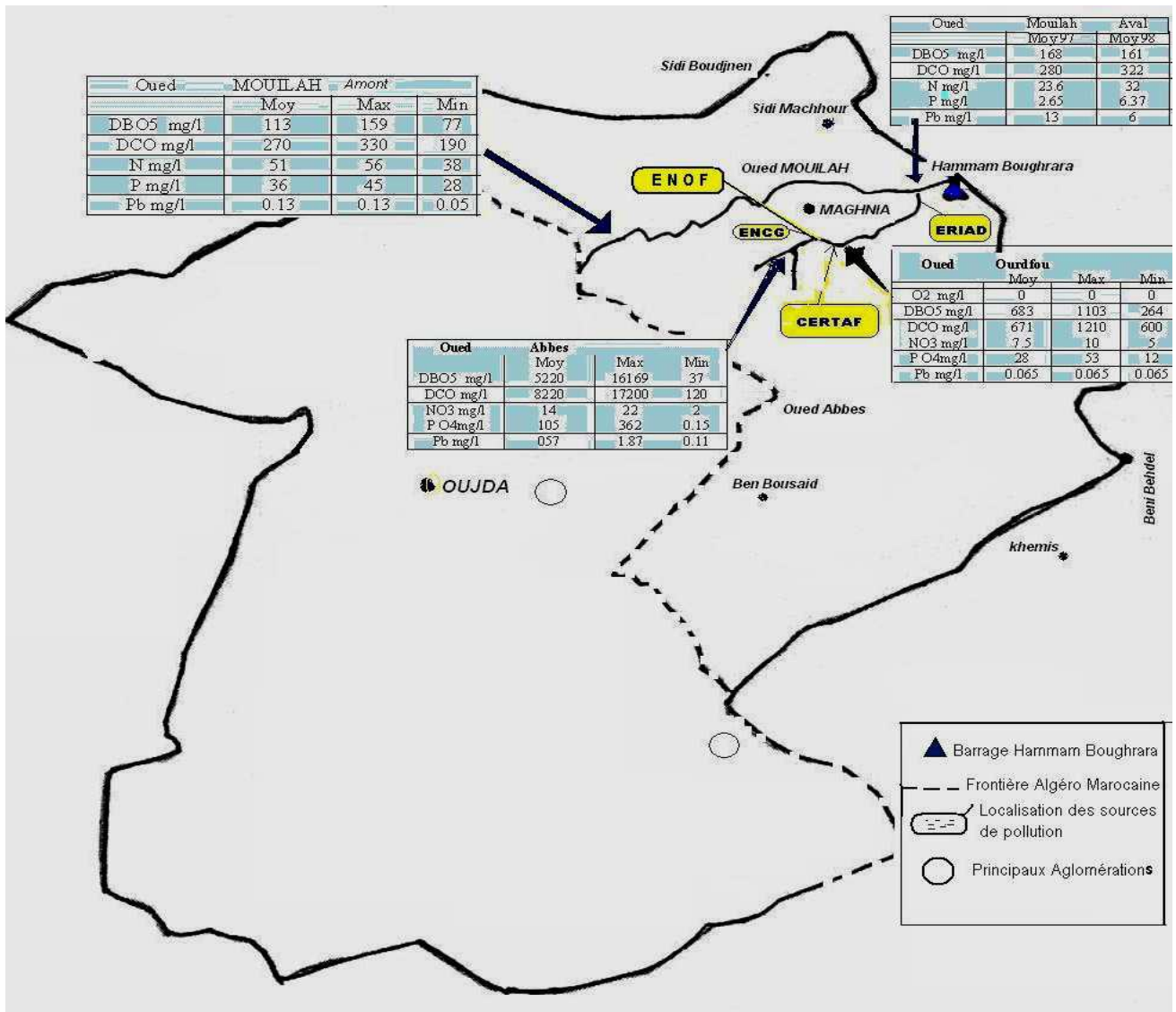


Figure 3: Localisation des sources de pollution [69]

Tenant compte de ces critères trois sols ont été choisis.

S1: sol du **blé dur**, les études ont été faites aux cours des saisons d'**hiver**, de **printemps** et d'**été** (fig.4, 5).

S2: sol du **poivron**, les études ont été faites aux cours des saisons de **printemps**, d'**été** et d'**automne** (fig. 6).

S3: sol du **maïs**, les études ont été faites aux cours des saisons de **printemps**, d'**été** et d'**automne** (fig. 7).

Les études ont été réalisées durant les périodes citées ci-dessus pour les trois sols depuis l'année 2006 jusqu'à l'année 2010.

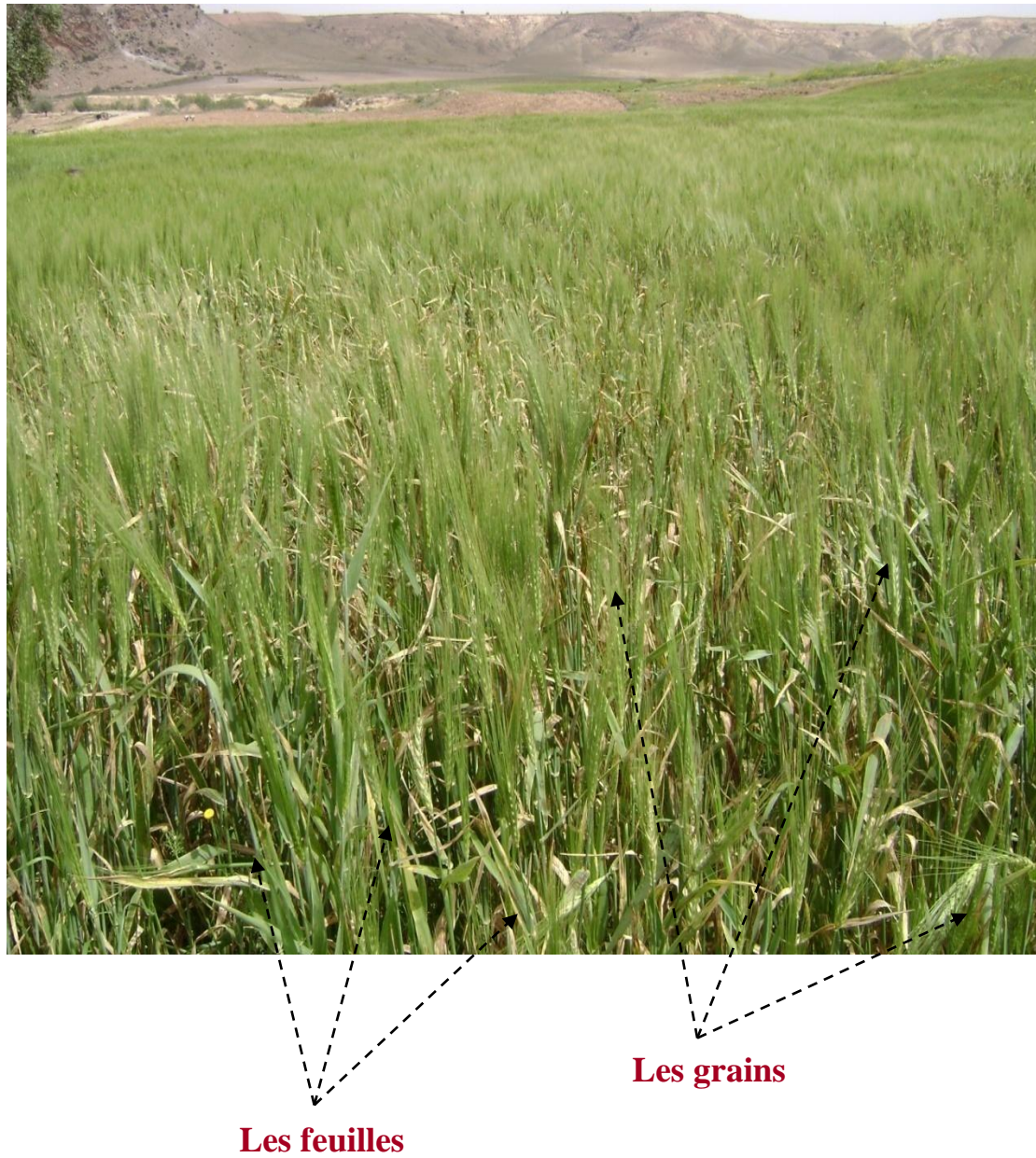


Figure 4: Le champ du blé dur (Sol S1) à Hammam Bouhrara



Les feuilles

Les racines

Les Tiges

Les grains

Figure 5: Les différents organes du blé dur

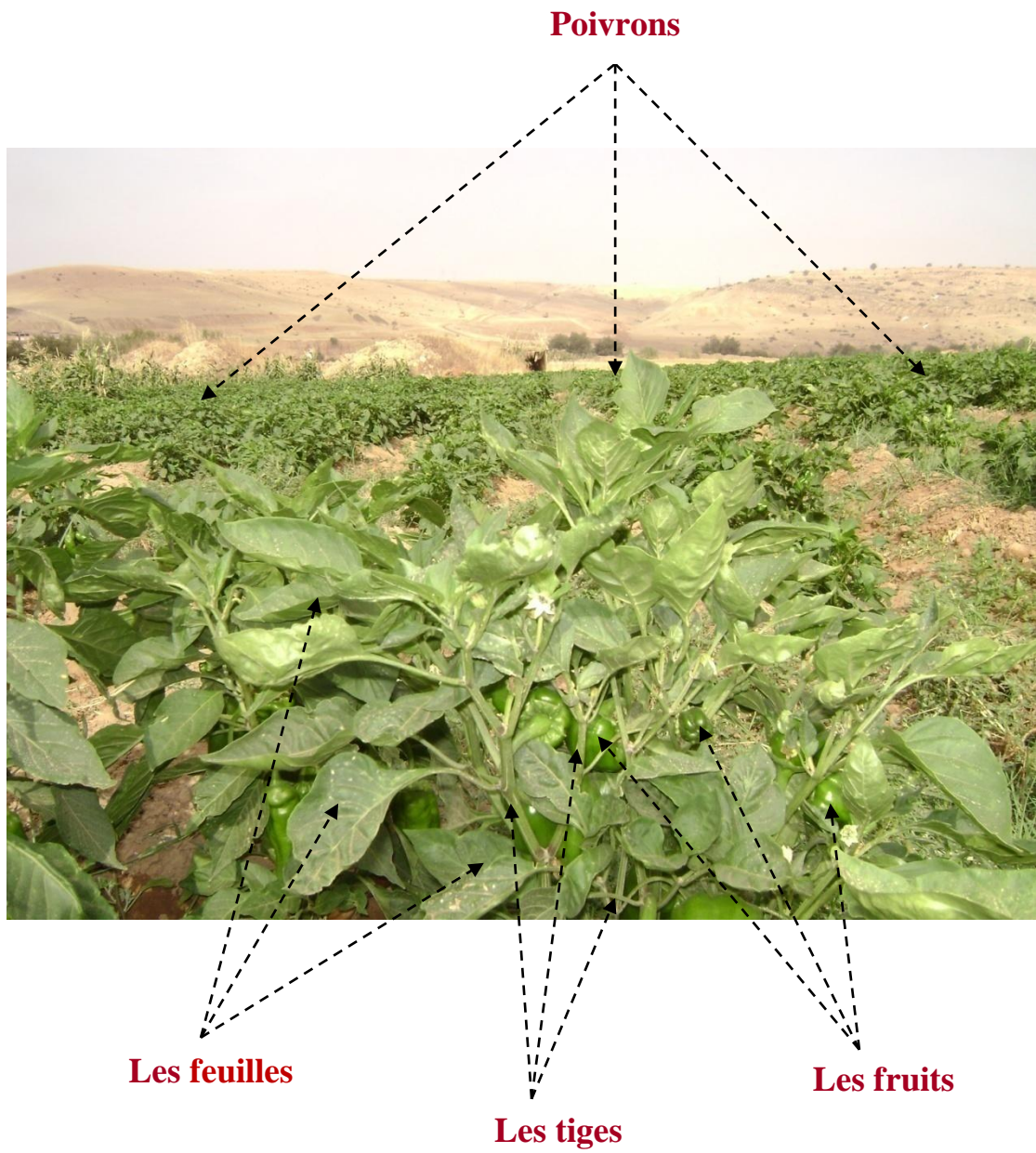


Figure 6: Le champ du poivron (sol S2) à Hammam Bouhrara

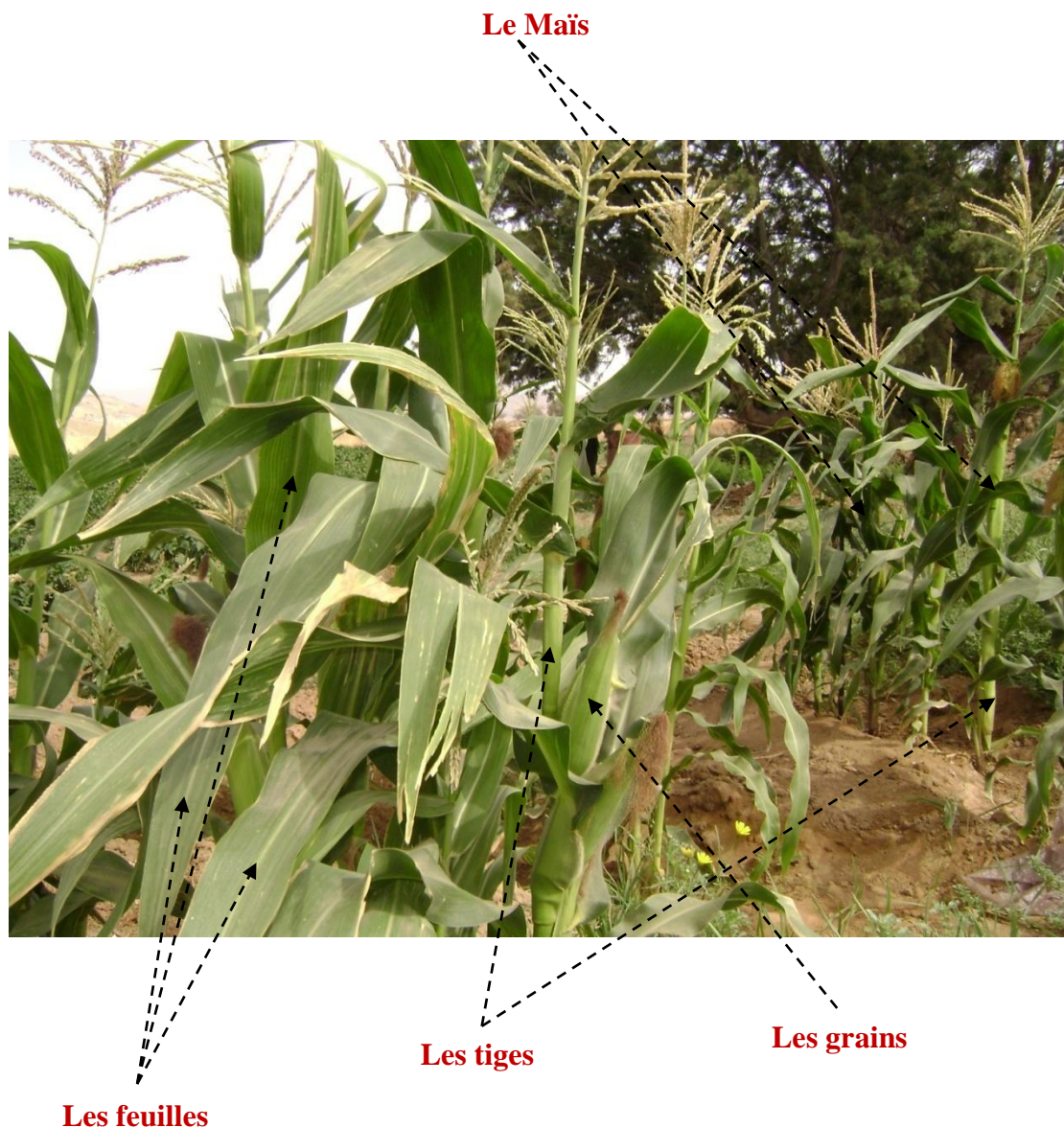


Figure 7: Le champ de maïs (sol S3) à Hammam Boughrara

I.2- Matériels et protocoles expérimentaux

L'ensemble des expériences de laboratoire a été réalisé à température ambiante: $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Les solutions ont été préparées avec de l'eau bi distillée. Les réactifs utilisés sont de qualité analytique compatible avec l'analyse des métaux traces. L'ensemble du matériel (verrerie, flacons en polyéthylène...) est systématiquement décontaminé au moyen d'acide nitrique à 10 % pendant 48 h puis rincé à l'eau bi distillée, afin d'éviter toute contamination. De plus, pour chaque expérimentation, l'ajout de blancs (réactifs sans échantillon de sol) a été systématique afin de vérifier l'absence de contamination.

Les échantillons des sols ont été prélevés à une profondeur de 30 cm.

Pour chaque opération, trois répétitions ont été mises en oeuvre pour chacun des sols ^[70].

I.2.1- Prélèvement

La zone de prélèvement est identifiée et limitée, elle est ensuite divisée en 5 à 6 prélèvement /ha pour les champs choisis. Chaque unité de prélèvement est de 200 à 300 g de terre. La détermination des unités a été faite en diagonale (fig.8) ^[70].

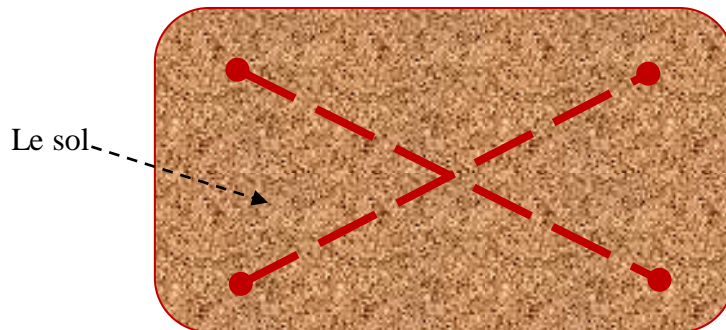


Figure 8: Échantillonnage en diagonale des sols S1, S2 et S3

I.2.2- Echantillon final

Les différents prélèvements sont réunis, la quantité de terre obtenue est étalée pour écarter les éléments grossiers (cailloux, feuilles, racines, coquilles d'escargots, etc). La notion de sol sec est basée sur la référence d'un séchage effectué à l'air, en couche mince, à la température ambiante et à l'abri de la lumière directe du soleil, tout en remuant journallement la terre. Dans son état sec, le sol contient une faible quantité d'eau dite hygroscopique, ainsi, les échantillons séchés à l'air conservent une humidité hygroscopique, pour éliminer toute l'eau, il sera nécessaire de procéder par un séchage à l'étude à 105°C durant 24h ^[71].

Le passage de l'échantillon total prélevé des sols S1, S2 et S3 à l'échantillon réduit, nécessaire à l'analyse a été réalisé par quartage.

I.2.3- Quartage

L'échantillon de chaque sol est divisé en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés. Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération a été répétée trois fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial ^[72] (fig.9).

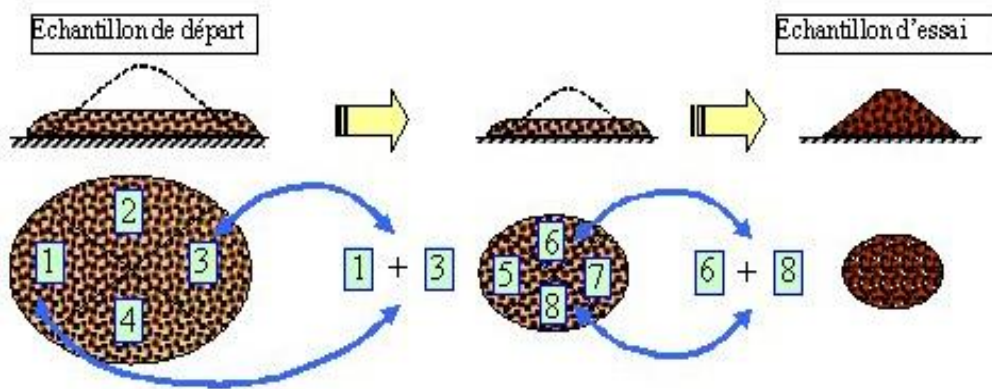


Figure 9: Opération de quartage.

I.2.4- Conditionnement des échantillons

Pour l'étude des ETM, des précautions ont été prises lors de l'échantillonnage afin d'éviter toute contamination, chaque horizon de sol après prélèvement ont été placés dans des sacs en plastique de « qualité alimentaire»^[73].

I.2.5- Analyses physico-chimiques

I.2.5.1- Granulométrie

La structure, la texture et la composition d'un sol lui confèrent des caractéristiques particulières qui influencent les phénomènes d'infiltration et de rétention des éléments traces métalliques. La détermination de la distribution de la taille des particules, ou composition granulométrique du sol, est appelée analyse granulométrique.

La granulométrie a été déterminée en suivant la norme NF X 31-100^[74] dans le laboratoire d'analyses des sols de génie civile.

Le protocole de fractionnement, mettant ainsi en œuvre 2 méthodes complémentaires (fractionnement par voie sec jusqu'à 50 µm puis séparation gravimétrique jusqu'à 2 µm par sédimentation des particules permet de classer les particules de la façon suivante, en fonction de leur diamètre:

- Sable grossiers (200-2000µm), résidus grossiers de la roche mère et de matériel végétal;
- Sable fins (50-200µm);
- Limons grossiers (20-50µm);
- Limons fins (2-20µm);
- Argiles (<2 µm), fraction communément mais improprement«argiles», car cette fraction ne comporte pas seulement les argiles minéraux mais souvent aussi d'autre minéraux.
- La méthode de sédimentation pour les particules de sol inférieures ou égales à 2 µm utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des particules fines

est fonction de leur dimension. C'est une hypothèse forte puisque les particules d'argile se présentent sous forme de plaquettes et non pas sous forme de grains sphériques.

Le tamisage par voie sèche ou par sédimentation se fait en utilisant une série de tamis (Fig 9a).



Figure 9a: Refus dans les différents tamis.

I.2.5.2- Acidité du sol (pH_{eau}, pH KCl et pH CaCl₂)

a- Principe

La mesure du pH s'effectue sur une suspension de terre fine.

Le pH_{eau} mesure l'acidité réelle et prend en compte les ions H₃O⁺ libres dans la solution du sol. Le pH_{KCl} mesure l'acidité potentielle qui prend en compte les ions H₃O⁺ libres dans la solution du sol et ceux déplacés par le KCl ou CaCl₂. Les mesures de pH_{eau} et pH_{KCl} sont effectuées selon la norme ISO 10390 [75].

b- Mode opératoire

10 g de sol sont mis en suspension dans 25ml d'eau distillée /ou de chlorure de potassium KCl (1mol.L⁻¹) /ou de chlorure de calcium CaCl₂ (0.01M), agités pendant 1 heure puis laissés au repos pendant 2 heures.

Le pH est ensuite mesuré à l'aide d'un pH-mètre de type Radiometer M220.

I.2.5.3- Détermination de l'humidité

Méthode par séchage à l'étude à 105°C :

- Peser dans un bécher, préalablement taré, un poids P exactement connu de terre tamisée à 2mm (10g par exemple),

- Porter le bécher à l'étude pendant 24 heures,
- Retirer le bécher à l'étuve et le laisser refroidir dans un dessiccateur,
- Peser,
- Le pourcentage d'humidité se déduit des pesées suivantes :
- Bécher vide : B; - bécher + terre séchée à l'air = P1;
- Bécher + terre séchée à 105°C = P2.
- La teneur en eau en pourcentage de la terre séchée à l'air est de :

$$\text{Eau \%} = (P_1 - P_2) \cdot 100 / (P_1 - B)^{[71]}$$

I.2.5.4- Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC)

a- Introduction

La capacité d'échange cationique d'un sol est la quantité totale de cations que ce sol peut adsorber sur son complexe et échanger avec la solution environnante dans des conditions de pH bien définies.

Pour un sol, la capacité d'échange cationique est due aux substances colloïdales portant des charges négatives telles que les minéraux argileux, la matière organique et la silice colloïdale. Elle est en relation, dans les minéraux argileux comme dans la matière organique et la silice, avec la surface spécifique et les charges permanentes et variables. Autrement dit la CEC présente la somme des déficits de la charge négative superficielle devant être compensés pour obtenir l'électroneutralité des particules solides constituant le milieu à un moment donné. À noter qu'il existe aussi une capacité d'échange anionique, peu souvent mentionnée. Le total des charges négatives du sol disponible (essentiellement dues au complexe argilo-humique) est également appelé le complexe adsorbant. On peut exprimer la CEC en milliéquivalents (désignés par mé) pour 100 g de matière sèche. Les valeurs sont alors données en charges électriques unitaires :

Un milliéquivalent = poids atomique $\times 10^{-3}$ / valence,

si par exemple la CEC d'un sol est de 20 mé.100g⁻¹ et que ce sol est saturé par du calcium,

Cela veut dire que l'échantillon retient $20 \times 40 / 2 = 400$ mg de calcium par 100g, alors que si c'est le potassium qui sature l'échantillon, celui-ci retient $20 \times 39 / 1 = 780$ mg de potassium par 100g ^[76].

Selon le système international d'unités, la CEC est exprimée en centimole de charges positives par kilogramme ($\text{cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$), sachant que numériquement, $1 \text{mé} \cdot 100 \text{g}^{-1} = 1 \text{cmol} \cdot \text{Kg}^{-1}$

b- Principe de la détermination de la CEC

La détermination de la capacité d'échange d'un sol consiste à saturer son complexe adsorbant par un ion assez efficace équilibrant la charge de l'échantillon et cependant assez facile à déplacer par la suite.

La CEC est ainsi déterminée par un procédé comportant 3 phases :

- Les actions échangeables et l'hydrogène du complexe adsorbant sont déplacés par une solution mono-ionique,
- Le complexe adsorbant est saturé à l'aide de cette solution (généralement tamponnée à un $\text{pH}=7$,
- Le filtrat recueilli contient tous les cations et l'hydrogène déplacés par la solution mono-ionique. C'est à partir de ce filtrat que l'on déterminera les cations échangeables et l'acidité d'échange.
- Le complexe est donc totalement garni de cations de la solution mono-ionique (par exemple les cations ammonium) mais le matériau se trouvant humecté avec la solution saturante contient ainsi plus que la quantité des cations saturants associés aux colloïdes. Cet excès devra être éliminé par lavage, par exemple avec l'alcool.

Le cation saturant va être déplacé à l'aide d'un autre cation, après quoi il y aura dosage de ce cation déplacé.

c-Méthode au chlorure de cobaltihexamine (Méthode Orsini et Rémy, 1976)

c.1-Principe

L'ion complexe cobalt $(\text{Co}(\text{NH}_3)_6)^{3+}$ a un pouvoir de remplacement élevé sur les colloïdes argileux, ce qui permet l'utilisation d'un réactif très dilué.

L'échantillon de terre est saturé par une solution de chlorure cobaltihexamine de concentration connue. Les ions $(\text{Co}(\text{NH}_3)_6)^{3+}$ vont déplacer les cations du complexe adsorbant et se fixer sur celui-ci. Dans la solution recueillie lors de la saturation, on retrouve les cations échangeable et les ions $(\text{Co}(\text{NH}_3)_6)^{3+}$ non consommés. La capacité d'échange cationique est obtenue par différence entre la quantité d'ions $(\text{Co}(\text{NH}_3)_6)^{3+}$ dans la solution initiale et celle restante après la mise en contact avec le sol. Les cations échangeables peuvent être déterminés dans le même extrait que la capacité d'échange cationique.

La solution d'extraction n'étant pas tamponnée, le pH de l'échange est proche des conditions du sol en place.

Cette méthode ^[77] est valable pour une gamme très étendue de sols allant des sols tropicaux acides aux sols neutres et basiques et aux sols contenant du calcaire.

c.2-Réactifs

- **Solution de chlorure de cobaltihexamine ([Co(NH₃)₆]Cl₃) 50 mé.l⁻¹**

Dissoudre 4,453 g de chlorure de cobaltihexamine dans une fiole jaugée de 1000 ml contenant 700 mL d'eau distillée. Ajuster au volume avec l'eau et agiter pour homogénéiser.

- **Indicateur de Tashiro**

Dissoudre 0,2 g de rouge de méthyle et 0,1 g de bleu de méthylène dans 100 ml d'éthanol.

Remarque

Q : nombre de mé apportés par la solution de cobaltihexamine, le nombre de mé apportés par la prise d'essai doit être compris entre Q/10 et Q/3.

Exemple

50 ml de solution de cobaltihexamine à 50 mé.l⁻¹ apportent 2,5 mé. Les mé de la prise d'essai doivent être compris entre 0,25 et 0,83 mé. Pour une CEC présumée de 5 mé.100 g⁻¹ de sol, ou 0,05 mé.g-1 , il faudra prendre une prise d'essai de 5g.

À titre indicatif, on peut s'inspirer du tableau ci-dessous :

CEC présumée mé.100 g-1	<2,5	2,5 à 5	5 à 10	10 à 32	32 à 64
Prise d'essai en g	10	10	5	2,5	2,5

c.3-Protocole

- Peser au 2,5g de prise d'essai et la verser dans un flacon à agitation de 200ml.
- Ajouter 50mL de la solution de chlorure de cobaltihexamine. Boucher le flacon. Agiter pendant 1 heure.
- Filtrer aussitôt. Recueillir les 20 premiers ml de la solution de filtrat dans un flacon propre et sec fermant hermétiquement. Effectuer le dosage au plus tard 24 h après l'extraction. Les cations échangeables peuvent être dosés dans cet extrait.
- Mettre en marche l'appareil Parnas-wagner type Martin. Brancher le chauffe-ballon, ouvrir le réfrigérant.
- Prélever 10 ml de l'extrait et l'introduire dans l'appareil. Ajouter 20 ml d'eau distillée.
- Placer la fiole conique de 250 ml contenant 40 ml de solution d'acide borique 2% et 6 gouttes d'indicateur de Tashiro en dessous du réfrigérant, la pointe plongeant dans le liquide.

- Verser quelques gouttes de phénolphtaléine 0,1% dans l'appareil. Si l'indicateur n'a pas viré au rose, ajouter avec précaution de la solution d'hydroxyde de sodium 33% jusqu'au virage de l'indicateur.

- Distiller jusqu'à environ 150 ml.
- Doser avec la solution d'acide sulfurique.
- Faire un essai à blanc avec la solution de chlorure de cobaltihexamine.

c.4-Calculs

$$\text{CEC mé.}100\text{g}^{-1} \text{ (ou cmol+.Kg}^{-1}\text{)} = (M_2-M_1).N.V100/S.A = (M_2-M_1) 0,01 \times 50 \times 100/10S = 5 (M_2-M_1)/S$$

Où M_2 : volume en ml de la solution d'acide sulfurique utilisée pour l'essai à blanc sur la solution de chlorure de cobaltihexamine,

M_1 : volume en ml de la solution d'acide sulfurique utilisée pour l'essai sur le distillat,

V : volume de la solution d'extraction ($v = 50$ ml),

S : poids de la prise de terre en g,

A : aliquote prélevée (10 ml),

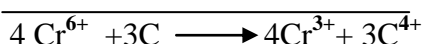
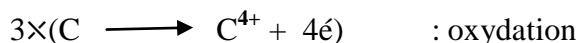
N : concentration de l'acide sulfurique.

I.2.5.5- Dosage du carbone organique total par la méthode de Walkley et Black

a- Principe du dosage

Le dosage de la matière organique est réalisé à partir du dosage de l'un de ses constituants : le carbone organique. Comme on vient de le rappeler, le carbone organique(C.O) est estimé à 58% de la matière organique (M.O.) d'où $\% \text{ C.O.} \times 1,724 = \% \text{ M.O.}$

La méthode de détermination du carbone organique ^[78] est basée sur l'oxydation de ce dernier par le bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en milieu acide sulfurique (source de chaleur).



La quantité de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ utilisée excède la quantité nécessaire pour l'oxydation du C.O. L'excès de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ qui n'a pas réagi est ensuite dosé en retour par une solution titrée d'un réducteur qui est le sulfate ferreux (sel de Mohr) en présence de ferroïne (indicateur redox). Ce dosage en retour permet donc de calculer la quantité de bichromate qui a été neutralisée par le carbone organique.



b- Réactifs

- **Solution de sulfate d'ammonium-fer(II) hexahydraté ((NH₄)₂Fe(SO₄)₃, 6H₂O) «sel de Mohr» 0,5 mol.l⁻¹**

Dans une fiole jaugée de 2000ml contenant environ 1000ml de solution d'acide sulfurique 0,25 mol.l⁻¹, dissoudre 392,160g de sel de Mohr. Ajuster au volume avec la solution d'acide sulfurique. Homogénéiser. Se conserve au maximum 2 semaines.

- **Férroïne (indicateur redox)**

Dans une fiole jaugée de 100ml contenant environ 90ml d'eau distillée, dissoudre 0,974g de sel de Mohr et 1,485g de phénantroline 1-10 (C₁₂H₈N₂, H₂O). Ajuster au volume et agiter.

c- Mode opératoire

- Echantillonner et peser un poids P de terre broyée, séchée et tamisée à 2mm et verser dans une fiole conique. La détermination du poids P varie avec la teneur en matière organique de l'échantillon. Plus la terre est riche en matière organique, plus la prise d'essai sera faible.

- À la réaction de l'excès de bichromate avec le sel de Mohr, il faut que la chute de ce dernier dans la burette soit comprise entre 8 et 14 ml. Tout échantillon dont le premier dosage aurait donné une chute de burette inférieure à 8mL ou supérieure à 14 ml de solution de sel de Mohr sera recommencé.

- Pour la première pesée on se base sur la couleur de la terre; une terre sombre est généralement riche en matière organique, une terre plus claire est moins riche en matière organique.

- Avec plus de 14 ml, on risque de se placer dans de mauvaises conditions de titrage. Avec moins de 8mL on aurait consommé dans la réaction une grande partie du bichromate de potassium et une partie du carbone pourrait ne pas être entrée en réaction. Pour cela il faudrait déterminer une pesée de sol P dosable dans une chute de burette limite allant de 8 à 14 ml de la solution de sel de Mohr de la façon suivante; dans les conditions optimales de précision et d'oxydation, il faut que le virage se situe à la moyenne des chutes limites, soit environ $14+8/2=11$ ml. Donc que l'équivalent en sel de Mohr de bichromate de potassium qui a réagi tende vers 11. Etant donné, que pour chaque échantillon la différence entre le témoin (20 ml normalement) et la chute de burette est proportionnelle à la prise d'essai on peut écrire la formule :

$$P/Xg = (20-n)/11 \text{ d'où l'on tire : } Xg = 11P/20-n$$

Où P : prise d'essai (en g), n : quantité de sel de Mohr nécessaire pour doser P (en ml).

D'une manière générale, pour la plupart des sols, les prises d'essai varient de 0,25 g à 2,5 g pour les horizons de surface et de 2,00 g à 10,00 g pour les horizons profonds.

Mettre la prise d'essai dans une fiole conique de 300 ml.

d- Oxydation

- Ajouter 10 ml de la solution de bichromate de potassium $0,1666 \text{ mol.l}^{-1}$ à la pipette. Agiter la fiole conique d'un mouvement de va-et-vient, doucement.

- Verser d'un coup, avec l'éprouvette 20 ml d'acide sulfurique (95%, $d=1,84$) dans la suspension. Agiter pendant une minute. Laisser reposer 30 min, ainsi l'oxydation peut se développer. Au bout de 30 min ajouter 150 ml d'eau distillée pour stopper la réaction.

e- Dosage

- Ajouter 6 gouttes de ferroïne. Avant de commencer le dosage, ne pas oublier de rincer la burette une ou deux fois avec la solution de titrage.

- Doser avec le sel de Mohr en laissant couler celui-ci goutte à goutte au centre de la suspension à doser, tout en agitant continuellement.

- Une échantillon normal prend la couleur sombre au contact de la ferroïne, et vire finalement au rouge. Le virage sera repérable au moment opportun sur la couche supérieure du liquide ou à travers le film de la solution provoquée par le tourbillonnage de l'agitation.

f- Calculs

La réaction : $2 \times [\text{Cr}_2\text{O}_7 + 8\text{H}^+ + 6\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Cr}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O}]$

$3 \times [\text{C} \longrightarrow \text{C}^{4+} + 4\text{e}^-]$

$2\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + 7\text{H}_2\text{SO}_4 + 3\text{C} \longrightarrow 2\text{K}_2\text{SO}_4 + 2\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{CO}_2 + 8\text{H}_2\text{O}$

Fait apparaître que pour son équilibrage, il faut trois carbones pour deux bichromates de potassium. 588 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ correspondent à 36 g de carbone.

La solution de bichromate de potassium renferme 49 g/l de produit et correspond à

$36 \times 49 / 588 = 3$ g de carbone

1mL de solution de bichromate de potassium oxyde $3/1000 = 0,003$ g ou 3 milligrammes de carbone. Expérimentalement il a été constaté que l'oxydation du carbone par cette méthode ne se fait qu'à 77% de sa totalité : il faut corriger le résultat par le facteur $100/77 = 1,2987$.

Ce qui nous amène à dire que : -1mL de solution de bichromate de potassium correspond à $(3\text{mg} \times 1,2987) = 3,8961$ ou 3,9 mg de carbone par excès.

• Carbone en g pour 100 g de terre

P : poids de la prise de terre en g.

T' =10 : le volume de la solution de bichromate de potassium (quantité oxydante

+ excès), V: ml versés de solution de Mohr, t : la concentration de la solution de sel de Mohr (t=10/T),

T : mL versés de solution de sel de Mohr pour le témoin, t=1 : la concentration de la solution de bichromate de potassium.

$3,9 \times \text{ml de bichromate oxydé} \times 100/P \times 1/1000 = p \text{ g de carbone}/100 \text{ g de terre ou}$
 $3,9(10-Vt).100/P.1/1000 = p \text{ g de carbone}/100 \text{ g de terre, en simplifiant, on obtient :}$
 $3,9(10-Vt)/10P = 0,39(10-Vt)/P = p \text{ g C}/100 \text{ g de terre soit :}$

P=1 g de terre

V= 6 ml versés de solution de sel

T =0,485, la concentration de la solution de sel de Mohr

$0,39 (10-6 \times 0,485)/1 = 2,77 \text{ g C}/100 \text{ g de terre} = 2,77\% \text{ C}$

• Matière organique

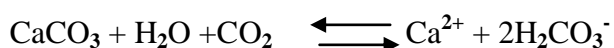
Comme la matière organique ne renferme que 58% de carbone, il faut multiplier le % de C par le facteur $100/58 = 1,724$ pour avoir le % de matière organique.

I.2.5.6- Dosage du calcaire total

a- Introduction

Le calcaire peut se trouver dans le sol à l'état de fragments de dimensions quelconques depuis les blocs et les graviers jusqu'à la taille des colloïdes argileux. Généralement les fragments sont des parties de la roche-mère. On peut trouver des formes provenant d'une précipitation du calcaire précédemment maintenu à l'état dissous par les solutions du sol. Il arrive aussi que le calcaire du sol ait une origine biologique et qu'il soit constitué, partiellement ou en totalité, par des coquilles de gastéropodes. Il peut se produire également que le calcaire n'existe pas initialement dans les horizons du sol mais qu'il ait été apporté dans le profil en surface par colluvionnement à l'état fragmentaire, par ruissellement hypodermique à l'état dissous, en profondeur par précipitation du bicarbonate de calcium dissous dans la nappe phréatique, quand celle-ci remonte en saison humide dans les horizons proches de la surface et enfin par apport éolien. Dans le sol, le calcaire est la source la plus fréquente de calcium, celui-ci étant sous forme d'ions sur le complexe absorbant.

Ce calcium fixé constitue le calcium échangeable du sol; il est donc fourni au complexe par les solutions du sol dans lesquelles il se trouve à l'état de bicarbonate mais aussi de sulfate et parfois de nitrate. La dissolution du calcaire à l'état de bicarbonate de calcium dans l'eau chargée de gaz carbonique se fait selon la réaction suivante :



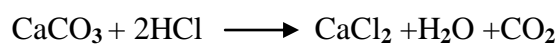
Le calcaire remplit dans le sol plusieurs fonctions et il est d'autant plus actif et efficace qu'il se trouve à un degré de finesse plus avancé. À l'état de graviers et de sables grossiers, il agit surtout comme élément granulométrique, mais aussi comme réserve de calcium assez facilement mobilisable. Mais au sein du calcaire total c'est surtout à l'état de très fines particules susceptibles de se solubiliser rapidement sous forme de bicarbonates des sols: c'est le calcaire actif. Comme le calcium provoque la floculation des colloïdes argileux et humiques. Le calcaire du sol est élément favorisant la stabilité de la structure et la perméabilité. On sait que l'humus calcique est le meilleur ciment des agrégats.

Le calcaire fournit d'autre part aux végétaux le calcium nécessaire à l'édification de leurs tissus ^[78].

b- Dosage du calcaire total : Méthode du calcimètre

b.1- Principe

On décompose par un acide fort (acide chlorhydrique) le carbonate de calcium contenu dans l'échantillon de terre et on mesure le volume de gaz carbonique dégagé par la réaction à la température et à la pression atmosphérique :



Le volume de gaz carbonique dégagé lors de la réaction est mesuré à l'aide d'une burette à gaz (le calcimètre Bernard). Un poids connu de carbonate de calcium pur pour analyses est traité de la même manière. En comparant les deux volumes, on détermine le taux de carbonates exprimé en carbonate de calcium dans l'échantillon de sol.

- 1 molécule gramme de carbonate de calcium (100g) donne 22,4l de gaz carbonique à la pression de 1atm et à zéro degrés Celsius.
- 1 litre de gaz carbonique obtenu dans les mêmes conditions, est engendré par $100/22,4=4,5$ g de CaCO_3 .
- 0,450 g de $\text{CaCO}_3 \longrightarrow 100\text{mL}$ de CO_2
- 0,150 g de $\text{CaCO}_3 \longrightarrow 33,3\text{mL}$ de CO_2

b.2- Mode opératoire

b.2.1- Etalonnage du calcimètre

- Peser 100mg de carbonate de calcium, anhydre (c'est-à-dire séché à l'étuve à 200°C durant 2 heures puis refroidi au dessiccateur) à 0,1 mg près et verser dans la fiole à doigt. Rassembler au fond 5mL d'eau distillée. Introduire l'acide chlorhydrique (technique, $d=1,18$, puis diluer à $\frac{1}{2}$) dans le doigt à l'aide d'une pissette souple.

- Vérifier que le niveau du liquide dans le tube gradué est au zéro.

- Adapter la fiole à doigt au calcimètre.
- Egaliser les pressions d'air de part et d'autre de la colonne liquide du calcimètre.
- Fermer le tube à l'aide de la pince de Mohr.
- Prendre la fiole par son bouchon et renverser l'acide dans la fiole, agité.
- Attendre que la réaction soit complète : 1 min suffit pour le sel pur.
- À l'aide du niveau, égaliser à nouveau les pressions d'air de part et d'autre de la colonne liquide du calcimètre.
- Lire le volume dégagé : V1.
- Recommencer l'opération avec une prise d'essai de 200 mg de carbonate de calcium, anhydre.
- Lire le volume dégagé : V2.
- Vérifier que $V_2 = 2V_1$ [79].
- Cet étalonnage ne s'opère qu'une fois par période.

b.2.2- Dosage

- Peser à 0,01 g près un poids P (0,25 à 10 g) de terre passée au tamis à mailles de 2mm, et l'introduire dans une fiole à doigt. Le poids P doit être choisi de façon à ce que le dégagement de gaz carbonique, d'une part ne soit pas supérieur au volume du tube gradué, d'autre part soit suffisamment grand pour que la lecture de son volume du tube gradué se fasse avec une bonne précision (de 10 à 40 ml, par exemple).
- Humidifier l'échantillon de terre dans la fiole avec le moins d'eau possible, pour chasser l'air inclus dans la terre.
- Verser 10ml d'acide chlorhydrique dans le doigt de la fiole.
- Attendre que la réaction soit complète.
- A l'aide du niveau, égaliser à nouveau les pressions d'air de part et d'autre de la colonne liquide du calcimètre.
- Lire le volume dégagé : V3.
- Noter la température de l'air.

b.2.3- Calculs

Soit V4 le volume de CO₂ obtenu avec 0,3 g de carbonate de calcium.

Le pourcentage de calcaire est :

$$0,3 / V_4 = P_x / V_3 \cdot 100 \implies x = 30V_3 / V_4 P$$

P : prise d'essai en gramme.

X = % de carbonate de calcium

b.2.4– Remarques

Il est important de tenir la fiole par le bouchon ou par le rebord du col, pour éviter de la chauffer avec la main. De même il ne faut pas opérer près d'un appareil de chauffage, ou au soleil. Vérifier périodiquement l'étanchéité du bouchon et du tube de caoutchouc qui relie la fiole au tube du calcimètre.

I.2.6- Détermination de la teneur totale des ETM-Extraction totale

a- Principe

La quantité de polluant extraite dépend à la fois de la technique d'extraction utilisée mais aussi de la composition physico-chimique du sol.

Les métaux contenus dans un sol à forte teneur en argile par exemple, seront plus difficiles à mettre en solution que ceux présents dans un sol plutôt sablonneux. Le risque à cette étape réside dans la perte des composés (par volatilisation, occlusion, et/ou adsorption sur les parois des récipients).

La source d'erreur possible est d'autant plus grande que la quantité des polluants recherchés est faible.

Comme pour le prétraitement des échantillons, il existe différentes méthodes d'extraction dite totale.

Pour les éléments métalliques, la méthode de solubilisation la plus utilisée est la minéralisation par attaques acides. Réalisée en milieu ouvert ou fermé et à chaud (150°C), elle utilise l'acide nitrique, l'eau régale (mélange acide chlorhydrique/acide nitrique) ou un mélange d'acide perchlorique et d'acide fluorhydrique ^[80].

L'extraction par attaque acide, en milieu fermé, présente l'avantage d'éviter les pertes d'éléments volatils (mercure, arsenic, plomb ou cadmium).

b- Analyse des éléments mis en solution par attaque à l'eau régale

Peser 1g de sol (S1, S2 et S3) à 0,01g près à partir d'un échantillon broyé dans un mortier puis passé au tamis 250 micros et verser dans un ballon à rodage de 250ml; ajouter également quelques billes de verre.

- Ajouter 2 à 3ml d'eau distillée puis 7,5ml d'acide chlorhydrique et 2,5ml d'acide nitrique.
- Laisser en contact pendant au moins 12h (une nuit) afin de permettre une oxydation lente de la matière organique du sol.
- Placer le ballon dans le chauffe-ballon, connecter le réfrigérant.
- Chauffer à fond pendant 10 min, puis redescendre à 180°C. Laisser alors la minéralisation se poursuivre pendant 2h.

- Arrêter la minéralisation, laisser refroidir plusieurs minutes.
- Avant d'enlever le réfrigérant, rincer celui-ci avec 10ml d'eau distillée.
- Filtrer soigneusement dans une fiole jaugée de 100ml le surnageant sur un papier filtre.

Laisser passer tout le filtrat initial à travers le papier filtre, puis laver le résidu insoluble sur le papier filtre avec un minimum d'eau distillée. Ajuster au volume ^[80].

Cette méthode est utilisée pour le dosage des éléments totaux et principalement pour le cuivre, le manganèse, le zinc, le fer, le chrome, le nickel, le plomb, le cadmium et le cobalt.

c-Dosage des éléments en traces

Le dosage des éléments en traces dans les extraits ainsi préparés avec l'eau régale a été réalisé par spectrophotomètre atomique à flamme (Aurora Instruments Ltd-AI 1200).

d-Calculs

Le calcul de la teneur des ETM se fait selon la formule suivante:

$$T \left(\frac{mg}{kg} \right) = C \times \frac{V}{S}$$

Où **T**: concentration de l'élément en mg/Kg,

C: concentration de l'élément en mg/l déterminée par la courbe d'étalonnage,

S: poids de la prise de terre en g (1g), **V** : volume d'extraction en ml (25ml).

I.2.7- Extractions séquentielles

a- Principe et objectifs

La détermination des teneurs totales en métaux lourds est une donnée importante qui permet d'évaluer le degré de contamination des sols mais qui ne permet toute fois pas d'appréhender les comportements des polluants. L'analyse de la spéciation opérationnelle, fondée sur des techniques d'extraction séquentielle, et dont l'objet est d'identifier et de quantifier les éléments polluants dans des potentiels sur l'environnement. Néanmoins, la multiplicité des protocoles analytiques rend l'emploi des méthodes de spéciation très discutable.

Le principe général des extractions séquentielles repose sur la réalisation d'attaques chimiques successives, chacune étant supposée détruire la liaison entre les éléments inorganiques étudiés et une fraction solide spécifique du sol. Les concentrations en espèces chimiques libérées sont ensuite dosées après chaque étape d'extraction. Ces procédures visent ainsi à apprécier qualitativement la capacité de différents compartiments du sol à accumuler des éléments minéraux en traces et donc, de ce fait, ces extractions offrent la possibilité d'estimer la mobilisation potentielle de ces éléments dans l'environnement.

Un échantillon de terre est soumis successivement à l'action de plusieurs agents d'extraction, chaque réactif est censé extraire une (ou plusieurs) forme(s) des éléments traces.

b- Mode opératoire

Depuis une vingtaine d'années, de nombreuses procédures d'extractions chimiques séquentielles (dont le nombre d'extractions, la nature des agents extractants varient selon les conditions opératoires de leur mise en œuvre) ont été développées dans l'objectif d'appréhender qualitativement la nature des liaisons sols-polluants inorganiques [81]. Cependant, en raison de la diversité des protocoles existants et des limites intrinsèques de chaque protocole (risques de redistribution des éléments par ré-adsorption ou précipitation pendant les différentes phases d'extraction, non sélectivité et ordre d'utilisation des extractants, aspects cinétiques non pris en compte, influence du contexte chimique, manque de reproductibilité des techniques employées,) [82], il est difficile de connaître une véritable répartition des éléments entre les différents compartiments du sol [81]. Il semble plus judicieux d'interpréter les résultats en termes de «fractionnement opérationnel» selon un protocole donné [81] que d'utiliser les extractions séquentielles comme un outil de Compréhension des mécanismes [10].

La procédure de Tessier [83] couramment utilisée pour l'analyse des éléments traces à Comportement cationique présents dans les sols et sédiments a été retenue dans le cadre de notre étude.

A partir de cinq extractions successives (Tableau 17), cette procédure permet de distinguer quatre fractions (ou compartiments) plus une résiduelle :

- **La fraction échangeable (F1)** par extraction dans une solution électrolyte fort à pH neutre. Il s'agit ici de déterminer les espèces métalliques liées à la phase solide du sol par des liaisons de faible énergie (de type adsorption non spécifique par attraction électrostatique).

- **La fraction liée aux carbonates (F2)** par l'attaque d'acide faiblement complexant (acide acétique) permettant d'extraire les espèces métalliques précipitées avec les carbonates.

- **La fraction liée aux oxydes de fer et de manganèse (F3)** par extraction dans une solution de réactifs réducteurs ou complexant (dithionite, hydroxylamine, acétate....).

- **La fraction liée à la matière organique et aux sulfures (F4)** par attaque avec des réactifs oxydants (H_2O_2) qui vont contribuer à dégrader et/ou solubiliser la matière organique du sol et les sulfures, les espèces métalliques associées étant ainsi libérées dans la phase liquide.

- **La fraction résiduelle (F5)** qui n'est dissoute que par des acides forts et peut contenir des silicates, certains oxydes et la matière organique résistante. La fraction résiduelle peut être

déduite par différence entre les quantités obtenues lors des quatre étapes précédentes ou bien par une mise en solution par fusion alcaline ou par attaques acides.

Cette procédure est employée ici avec une prise d'essai de 1g de sol sec. Trois répétitions ont été réalisées. Chaque extraction est suivie d'une étape de centrifugation à $10000 \pm 100G$ pendant 15 ± 2 minutes, puis d'une étape de rinçage avec 8 ml d'eau distillée. Le surnageant issu de ce rinçage est mélangé à la solution d'extraction avant analyse des espèces inorganiques étudiées.

Tableau 17: Protocole d'extractions séquentielles adapté de Tessier et al. (1979).

Fractions extraites	Réactif (s)	Mode opératoire (Volume, Durée, Température)
F1: Fraction échangeable	$MgCl_2$ (1mol.L ⁻¹), PH=7	8ml, 1h, température ambiante, agitation continue
F2: Fraction acido-soluble	CH_3COONa (1mol.L ⁻¹) / CH_3COOH pur, PH=5	8ml, 5h, température ambiante+ agitation continue
F3: Fraction réductible	$NH_2OH.HCl$ (0,04mol.L ⁻¹) dans CH_3COOH 25%, PH=2	20mL, 6h, bain-marie à $96 \pm 2^\circ C$, agitation continue
F4: Fraction oxydable	HNO_3 (0,02mol.L ⁻¹) / H_2O_2 (30%, PH=2 avec HNO_3)	3mL HNO_3 + 5mL H_2O_2 , 2h, bain-marie à $85 \pm 2^\circ C$, agitation intermitante
	CH_3COONH_4 (3,2 mol.L ⁻¹) dans HNO_3 20%	5mL + eau distillée pour volume final de 20ml, 1/2 h
F5: Fraction résiduelle	HF/ $HClO_4$	Estimation Ou séchage à l'étuve ($30 \pm 2^\circ C$) pendant 48h, puis attaques acides: 8mL de HF/ $HClO_4$, 2h

I.2.8- Extractions chimiques sélectives

a- Principe

Une extraction chimique sélective consiste à mettre en contact une quantité de sol avec une solution (eau, solution saline, etc.), à agiter pendant un temps défini, à filtrer ou centrifuger le mélange obtenu et à doser, dans leur totalité, les éléments-traces qui ont migré du sol vers la solution. Les extractants les plus utilisés sont les solutions salines ($CaCl_2$, $NaNO_3$, NH_4NO_3 , $Ca(NO_3)_2$, acétate d'ammonium, $BaCl_2$, $AlCl_3$, etc.), les chélatants (DTPA, EDTA) et l'acide acétique.

b- Extraction simple à l'EDTA à pH= 7

b.1- Principe

L'extraction des formes solubles du Cu, du Zn, du Cd, du Pb, du Mn, du Co, du Ni, du Cr et du Fe réalisée par une solution mixte d'acétate d'ammonium et d'EDTA, à pH=7 dans un

rapport : prise d'essai sur solution égal à 1/10 (m/v). Cette méthode conduit à estimer la quantité de métaux lourds susceptibles d'être assimilables par les végétaux. Elle s'applique principalement aux sols agricoles.

b.2- Mode opératoire

- Peser 1g de sol sec à 0,01g près et le verser dans un flacon de 125mL.
- Ajouter 10mL de la solution d'extraction EDTA à $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$. Boucher hermétiquement sans attendre et agiter vigoureusement de manière à bien disperser la terre.
- Agiter aussitôt pendant 2 h à $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Filtrer aussitôt (un contact prolongé peut continuer l'extraction).
- Récupérer le filtrat dans une fiole conique de 125 ml et Boucher immédiatement.
- Laisser décanter puis centrifuger le surnageant durant 10 minutes à 2000tr/min, de façon à avoir un liquide translucide exempt de toutes impuretés, verser le liquide dans une fiole conique de 125mL et boucher immédiatement.
- Après le réglage du spectrophotomètre d'absorption atomique, passer successivement les solutions étalons, la solution d'essai.
- Doser le cuivre, le manganèse et le zinc en utilisant les longueurs d'onde suivantes : Cu=324,7nm ; Mn=279,5nm ; Zn=213,9nm.
- Après chaque mesure, rincer avec la solution d'extraction ^[84].

- **Solution d'extraction d'EDTA**

Dans une fiole jaugée de 1000 ml contenant environ 400 ml d'eau distillée, dissoudre 3,723g d'EDTA et 77g d'acétate d'ammonium. Après dissolution à froid, ajouter 450ml d'eau distillée puis amener à la température d'environ 20°C . Maintenir cette température, mesurer le pH et si nécessaire, l'ajuster à $7,00 \pm 0,05$ à l'aide des solutions d'ammoniaque à 1 mol.l^{-1} ou d'acide acétique à $0,1 \text{ mol.l}^{-1}$. Ajuster au volume. Homogénéiser ^[84].

c- Mode opératoire de l'extraction des métaux lourds par les solutions salines (CaCl_2 , NaNO_3 , NH_4NO_3 , NH_4OAC) et par l'acide HCl

Les principaux points des protocoles d'extraction par des solutions salines non tamponnées sont donnés dans le tableau 18, élaboré d'après ^[85].

Le principe est le même pour les quatre réactifs CaCl_2 à $0,01 \text{ mol.l}^{-1}$, NaNO_3 à $0,1 \text{ mol.l}^{-1}$, NH_4OAC à 1 mol.l^{-1} et NH_4NO_3 à 1 mol.l^{-1} . La prise d'essai de terre séchée à l'air est agitée pendant deux heures dans la solution du sel, dans un rapport 1/10 ou 1/2,5 (M/V). La suspension est ensuite centrifugée et filtrée.

Tableau 18: Mode opératoire de l'extraction des métaux lourds par les solutions salines (CaCl₂, NaNO₃, NH₄NO₃, NH₄OAC) et par l'acide HCl

Réactifs	CaCl ₂ à 0,01 mol.l ⁻¹	NaNO ₃ à 0,1mol.l ⁻¹	NH ₄ NO ₃ à 1 mol.l ⁻¹	NH ₄ OAC à 1 mol.l ⁻¹	HCl à 0,1 mol.l ⁻¹
Prise d'essai	5 g	20 g	20 g	20 g	1 g
Volume de solution	50 ml	50 ml	50 ml	50 ml	5 ml
Agitation	20°C±2°C, 120min±5min, retournement à 30 tr min ⁻¹	20°C±2°C, 120min±5min, retournement à 30 tr min ⁻¹	20°C±2°C, 120min±5min, retournement à 30 tr min ⁻¹	20°C±2°C, 120min±5min retournement à 30 tr min ⁻¹	20°C±2°C, 120min±5min, retournement à 30 tr min ⁻¹
Centrifugation	15 min à 1000 g	15 min à 1000 g	15 min à 1000 g	15 min à 1000 g	1 h
Filtration	0,22 µm	0,22 µm	0,22 µm	0,22 µm	0,22 µm
Acidification	0,5 ml HCl	0,5 ml HNO ₃	0,5 ml HNO ₃	0,5 ml HNO ₃	0,5 ml H ₂ O

- **Remarque**

Les prises d'essai sont de terre préparée selon la norme ISO 11466 ^[84] (terre séchée à l'air, tamisée à 2mm).

II- Les Plantes

II.1- Techniques de prélèvement de plantes étudiées

Le prélèvement doit être effectué de façon à préserver l'information: ni pertes ni pollutions. Pour se préserver de risques de pollution, il faut éviter d'utiliser des outils ou des récipients susceptibles de contaminer l'échantillon: pas d'outil en acier inox, pas de récipient dont les parois contiennent des pigments à base d'éléments en traces (PVC pouvant contenir du zinc, du cadmium, etc). On évitera également le contact entre l'échantillon végétal et la terre.

Une procédure possible est la suivante: utiliser des outils tranchants en céramique (ciseaux) ou avec des lames en carbure de titane ou de tungstène. Si ces outils ne sont pas disponibles, l'alternative est l'utilisation de matériels à base d'acier ordinaire, le risque étant une pollution par le fer. On peut également prélever certains organes (feuilles, fruits, épis, etc) par arrachage à la main. Après la récolte, l'échantillon sera placé dans un sac en polyéthylène. Entre le prélèvement et le transfert au laboratoire, l'échantillon sera placé dans un conteneur frais et à l'abri de la lumière, une glacière. De façon générale le temps de transfert de l'échantillon au laboratoire doit être le plus court possible.

II.2- Préparation des échantillons des plantes étudiés

Dès son arrivée au laboratoire, l'échantillon va être l'objet d'une série d'opérations : identification de la demande analytique, lavage éventuel, stabilisation, broyage,

homogénéisation, stockage, broyage, homogénéisation, stockage en flacon inerte.

- **Identification:** l'identification du blé dur, du poivron et du maïs a été faite dans le laboratoire botanique de l'Université de Tlemcen, cette étape est essentielle car elle donne les indications sur les procédures qui vont suivre: lavage éventuel, température de séchage, type de broyeur, etc ^[86].

- **Lavage :** cette étape ne s'impose que s'il faut éliminer les dépôts atmosphériques éventuels. C'est le cas des denrées alimentaires, par exemple, qui font l'objet d'un lavage préalable de la part du consommateur. Cette étape est délicate car elle doit éliminer les dépôts en surface sans altérer le contenu du végétal. On utilisera un système de trempage rapide dans une faible concentration d'acide et les suivants étant constitués d'eau pure ^[86].

- **Stabilisation de l'échantillon :** la méthode habituelle est le séchage en étuve. Le séchage ne devra pas dépasser 50°C pour éviter les pertes. Cette dernière procédure n'est applicable que pour des échantillons peu riches en eau. En effet avec des végétaux tels que tomates, melons et autres fruits contenant beaucoup d'eau, il existe un risque de fermentation avec pertes d'éléments avant d'obtenir la stabilisation par siccité ^[86].

- **Broyage :** Cette étape est éminemment critique car elle peut être source de contaminations ou de pertes. Le choix du broyeur est effectué en fonction de différents critères : il doit effectuer l'opération de façon totale (pas de résidu), sans échauffement de l'échantillon, être adapté à la nature de l'échantillon (fibreuse, cassant, grain, etc.), être constitué de matériaux ne comportant pas d'éléments faisant l'objet d'analyses pour être compatible avec les pesées pour analyses ultérieures. Par exemple pour des pesées de l'ordre de 0,5 g la granulométrie doit être inférieure ou égale à 0,200 mm. Pour les échantillons fibreux (blé, maïs) le type de broyeur sera à couteaux. Pour les grains il est préférable d'utiliser un broyeur centrifuge à couronne, pour des échantillons cassants (pommes de terre, pommes ou poires séchées par exemple) un broyeur à marteau ou un broyeur planétaire à billes constituent des bons choix. Un cas particulier est celui des feuilles de vignes qui après broyage laisse une bourre fibreuse dans la chambre de broyage. Le broyeur utilisé dans ce cas du type moulin à café qui permet d'incorporer la bourre à la poudre végétale ^[86]. L'opération de broyage peut être source d'hétérogénéité de la poudre obtenue.

Pour les échantillons très peu volumineux, On utilise par ailleurs un mixeur lorsqu'il s'agit de graines.

II.3- Minéralisation, mise en solution

II.3.1- Principe

Cette méthode s'adresse à tout matériel végétal ou ligneux.

La minéralisation est l'opération par laquelle la matière organique est détruite libérant ainsi les matières minérales que l'on peut alors mettre en solution. Il existe deux grands types de procédures : la minéralisation par voie sèche et celle par attaque acide oxydante.

- **Minéralisation par voie sèche:** l'échantillon est placé dans un four à moufle et chauffé progressivement jusqu'à 480°C. La matière organique est détruite par combustion. Le résidu est constitué par la cendre minérale. L'opération de minéralisation doit être complétée par mise en solution en milieu acide des cendres obtenues. Cette méthode peut s'appliquer à l'ensemble des éléments en traces mais est inadaptée pour le dosage des éléments volatils (mercure, sélénium, arsenic, etc.).

- **Minéralisation par attaque acide oxydante:** l'échantillon est placé dans une solution acide et oxydante puis chauffé jusqu'à destruction de la matière organique. La mise en solution est concomitante de la minéralisation. Cette méthode est utilisable pour les éléments volatils moyennant certaines précautions: attaque en milieu fermé (bombes utilisées notamment par chauffage par micro ondes) ou semi fermé (ballons munis de réfrigérants) .Cette méthode permet le dosage de l'ensemble des éléments en traces minéraux. Dans notre étude on a utilisé la minéralisation par voie sèche ^[86].

II.3.2- Mode opératoire

1000 mg de matériel végétal préalablement séché, sont introduits dans une capsule.

La capsule est placée dans un four dont la température est augmentée progressivement jusqu'à 500°C et qui est ainsi maintenue pendant 2 heures. Un palier est effectué aux alentours de 200°C jusqu'à la fin du dégagement de fumées.

Après refroidissement, les cendres sont humectées avec quelques gouttes d'eau puis on ajoute 2ml de HCl au 1/2. On évapore à sec sur plaque chauffante. Après avoir ajouté 3ml de HCl +1ml de HNO₃, on laisse en contact 10 minutes et on filtre dans des fioles jaugées de 25ml. Après avoir ajusté au trait de jauge puis homogénéisé par agitation manuelle, les solutions sont transvasées dans des godets préalablement rincés avec la solution et sur lequel le numéro de l'échantillon est inscrit ^[86].

II.3.3- Dosage

Les échantillons ainsi mis en solution ont été dosés par spectrophotomètre atomique à flamme domaine de travail de l'ordre du mg.l⁻¹ technique s'appliquant aux éléments en traces qui ne sont ni volatils ni fortement réfractaires.

L'ensemble des analyses ont été réalisées trois fois par spectrophotomètre atomique à flamme (Aurora Instruments Ltd-AI 1200) et confirmé par ICP.

III- Analyses des métaux lourds

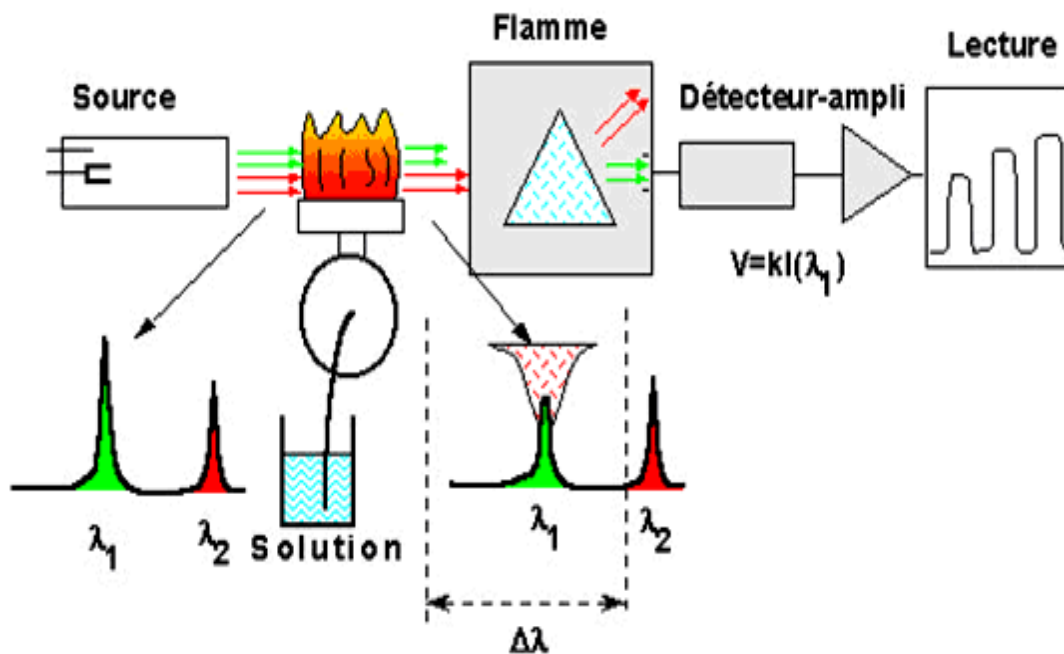
III.1- Appareillages

La quantification des métaux en solution est réalisée par spectrophotomètre atomique à flamme (Aurora Instruments Ltd-AI 1200) (Fig 9b).

La spectroscopie se base sur l'analyse des rayonnements électromagnétiques se traduisant par un spectre d'absorption du gaz dans des longueurs d'onde spécifiques. Ces méthodes utilisent l'absorption dans le visible, l'ultraviolet et l'infrarouge, mesurée grâce au spectromètre, souvent appelé spectrophotomètre dans les articles. La spectrométrie d'absorption atomique (SAA) est une des méthodes de spectroscopie [87].

III.2- Principe

L'appareil est schématisé ci-dessous :



La SAA est fondée sur le principe que les atomes libres peuvent absorber la lumière d'une certaine longueur d'ondes. L'absorption de chaque élément est spécifique, aucun autre élément n'absorbe sa longueur d'ondes. L'absorption de lumière par les atomes fournit ainsi un puissant instrument analytique à la fois pour l'analyse quantitative et qualitative.

L'élément à doser doit être en solution diluée. La spectrométrie permet en effet un dosage d'élément sous forme de traces (parties par million ou mg/l). La lampe à utiliser doit émettre des photons dont l'énergie correspond à l'excitation d'un atome (lampe à cathode creuse mono-

élément) ^[87].



Figure 9b: spectrophotomètre atomique à flamme

III.3- Limites de quantification

La limite de quantification est donnée en fonction de l'appareil et du métal analysé. Cette valeur est également liée aux paramètres de mise en solution et notamment au rapport volume/masse (volume du jaugé, prise d'essai) cité plus haut, généralement de l'ordre de 200 (100 ml/0,5 g ou 50 ml/0,25 g) quelle que soit la méthode de minéralisation (attaque par HClO₄ ou attaque à l'eau régale et sauf exception) ^[87].

III.4- La limite de détection

La limite de détection des polluants dans le sol (en mg.kg⁻¹ de matière sèche) selon la méthode utilisée et donnée dans le tableau 19:

Tableau 19: La limite de détection des principaux éléments traces métalliques (mg.kg⁻¹ de matière sèche: ppm).

Métaux	SAA Flamme	SAA Four
Cd	0.4	0.004
Pb	1.2	0.06
Zn	0.4	0.004

La méthode analytique varie également selon le métal et la concentration à déterminer.

Les métaux les plus couramment dosés sont le cadmium (Cd), le plomb (Pb) et le zinc (Zn), classiquement analysés dans le cas d'étude d'impact de projets routiers. Les autres métaux [le cuivre (Cu), le cobalt (Co), le chrome (Cr), et le fer (Fe)] sont plus souvent recherchés dans le cas d'étude de sols de type friche industrielle ¹⁸⁷.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

I- Le sol

I.1- Caractérisation physico-chimique des sols S1, S2

I.1.1- Analyse granulométriques des sols étudiés

La granulométrie est exprimée par une courbe granulométrique qui donne la répartition de la dimension moyenne des grains, exprimée sous forme de pourcentage du poids total du matériau.

Elle est tracée en diagramme avec:

- en abscisse, ouverture des tamis en mm.
- en ordonnée, le pourcentage des tamis cumulés.

La répartition granulométrique des différentes fractions obtenues pour les trois sols S1, S2 et S3 dans les différentes saisons des années 2006 - 2010 est donnée dans les tableaux (20-24) et exprimée par les courbes granulométriques (fig 10-54) :

Tableau 20: Répartition granulométrique des particules en pourcentage dans les différentes saisons de l'année 2006 des trois sols S1, S2 et S3.

Texture	Cailloux	Graviers	Sables			Limons	Argiles	
			Grossiers	Moyens	Fins			
Diamètre des particules	200mm-20mm	20mm - 2mm	2mm - 500µm	500µm-200µm	200µm-50µm	50µm - 2µm	< 2 µm	
S1	Hiver	-	9,78	9,81	20	37,30	22,80	-
	Printemps	-	09,93	10	19,80	37,25	22,78	-
	Été	-	10	10,16	20,40	36,90	22,4	-
S2	Automne	-	10	10,85	21,32	34,25	23,30	-
	Printemps	-	10,2	11	21,25	34,10	23,20	-
	Été	-	10,6	11,09	21,06	34	23,12	-
S3	Automne	-	12	10,30	20	35,55	21,88	-
	Printemps	-	12,10	10,33	20	35,49	21,85	-
	Été	-	12,13	10,42	20,08	35,41	21,80	-

Tableau21: Répartition granulométrique des particules en pourcentage dans les différentes saisons de l'année 2007 des trois sols S1, S2 et S3.

Texture	Cailloux	Graviers	Sables			Limons	Argiles	
			Grossiers	Moyens	Fins			
Diamètre des particules	200mm-20mm	20mm - 2mm	2mm-500µm	500µm-200µm	200 µm - 50µm	50µm - 2µm	< 2 µm	
S1	Hiver	-	9,80	9,82	19,98	37,31	22,81	-
	Printemps	-	9,92	10	19,87	37,26	22,77	-
	Eté	-	10	10,15	20,39	36,91	22,41	-
S2	Automne	-	10	10,85	21,32	34,25	23,30	-
	Printemps	-	10,2	11	21,25	34,10	23,20	-
	Eté	-	10,55	11,11	21,09	33,99	23,11	-
S3	Automne	-	11,98	10,29	20,05	35,58	21,85	-
	Printemps	-	12	10,37	20,03	35,54	21,84	-
	Eté	-	12,14	10,45	20,06	35,43	21,79	-

Tableau 22: Répartition granulométrique des particules en pourcentage dans les différentes saisons de l'année 2008 des trois sols S1, S2 et S3.

Texture	Cailloux	Graviers	Sables			Limons	Argiles	
			Grossiers	Moyens	Fins			
Diamètre des particules	200mm-20mm	20mm - 2mm	2mm-500µm	500µm-200µm	200 µm - 50µm	50µm - 2µm	< 2 µm	
S1	Hiver	-	9,78	9,84	20	37,29	22,80	-
	Printemps	-	9,95	10,02	19,85	37,23	22,78	-
	Eté	-	10,03	10,11	20,40	36,90	22,4	-
S2	Automne	-	10,01	10,84	21,31	34,28	23,29	-
	Printemps	-	10,18	11,04	21,24	34,08	23,19	-
	Eté	-	10,53	11,10	21,07	34	23,13	-
S3	Automne	-	12	10,28	20,07	35,55	21,83	-
	Printemps	-	12,02	10,38	20	35,53	21,85	-
	Eté	-	12,11	10,46	20,07	35,42	21,80	-

Tableau 23: Répartition granulométrique des particules en pourcentage dans les différentes saisons de l'année 2009 des trois sols S1, S2 et S3.

Texture		Cailloux	Graviers	Sables			Limons	Argiles
				Grossiers	Moyens	Fins		
Diamètre des particules		200mm-20mm	20mm - 2mm	2mm-500µm	500µm-200µm	200 µm - 50µm	50µm - 2µm	< 2 µm
S1	Hiver	-	9,79	09,80	19,99	37,32	22,81	-
	Printemps	-	9,93	10,04	19,84	37,24	22,79	-
	Eté	-	10	10,13	20,38	36,94	22,41	-
S2	Automne	-	10,02	10,83	21,30	34,26	23,31	-
	Printemps	-	10,19	11,02	21,23	34,07	23,21	-
	Eté	-	10,55	11,08	21,08	33,98	23,15	-
S3	Automne	-	11,99	10,30	20,07	35,57	21,82	-
	Printemps	-	12	10,39	20,01	35,52	21,86	-
	Eté	-	12,12	10,43	20,09	35,41	21,81	-

Tableau 24: Répartition granulométrique des particules en pourcentage dans les différentes saisons de l'année 2010 des trois sols S1, S2 et S3.

Texture		Cailloux	Graviers	Sables			Limons	Argiles
				Grossiers	Moyens	Fins		
Diamètre des particules		200-20mm	20 - 2mm	2mm-500µm	500-200µm	200 µm - 50µm	50 µm - 2µm	< 2 µm
S1	Hiver	-	9,81	9,82	20	37,30	22,80	-
	Printemps	-	9,91	10,02	19,88	37,22	22,80	-
	Eté	-	10,02	10,10	20,37	36,95	22,42	-
S2	Automne	-	10	10,84	21,29	34,27	23,31	-
	Printemps	-	10,18	11,03	21,22	34,08	23,23	-
	Eté	-	10,56	11,09	21,10	33,95	23,13	-
S3	Automne	-	11,98	10,29	20,05	35,55	21,88	-
	Printemps	-	12,01	10,40	20	35,53	21,86	-
	Eté	-	12,13	10,44	20,11	35,40	21,78	-

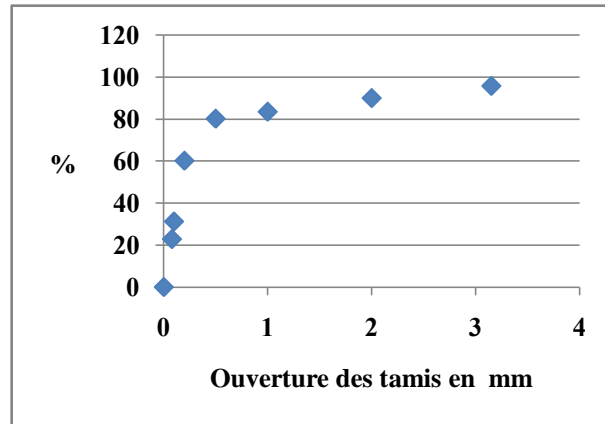


Figure 10: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2006

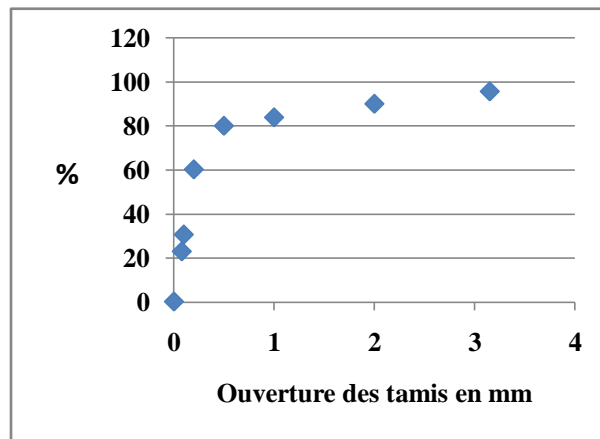


Figure 11: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2006

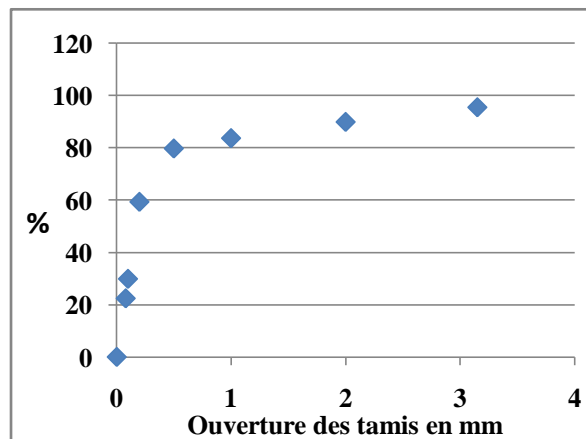


Figure 12: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison d'été de l'année 2006

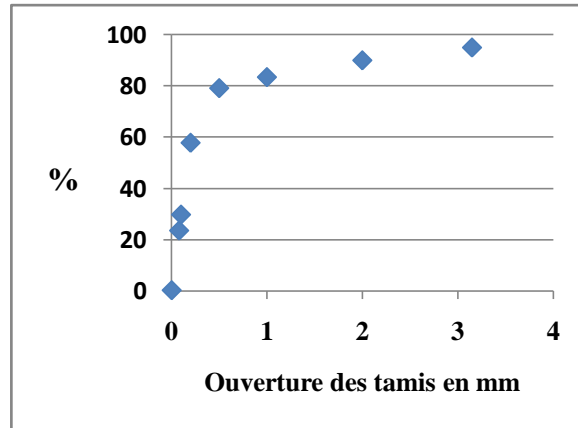


Figure 13 : Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2006

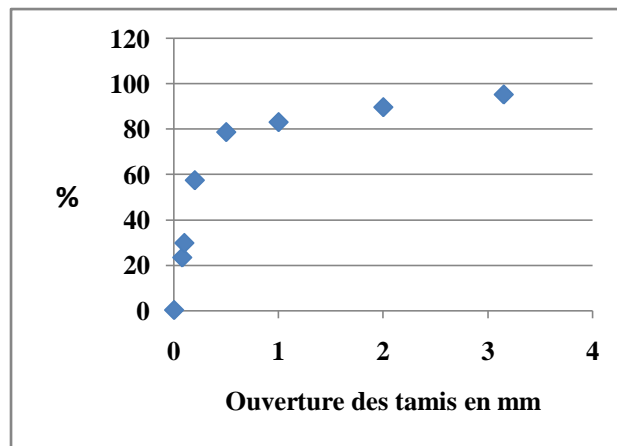


Figure 14: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2006

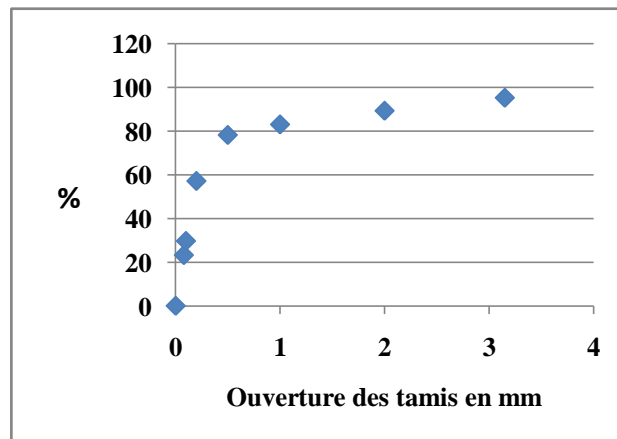


Figure 15 : Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison d'été de l'année 2006

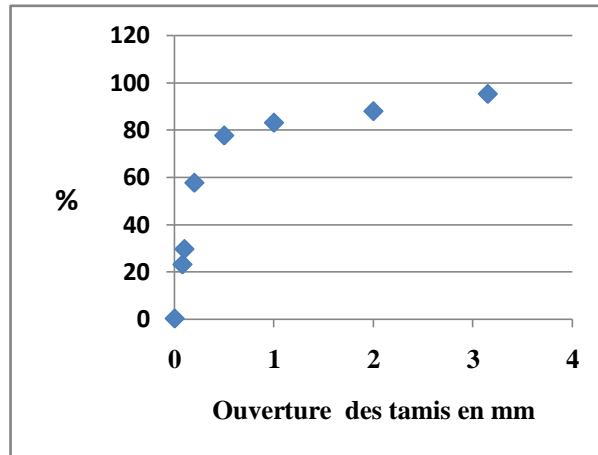


Figure 16: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2006

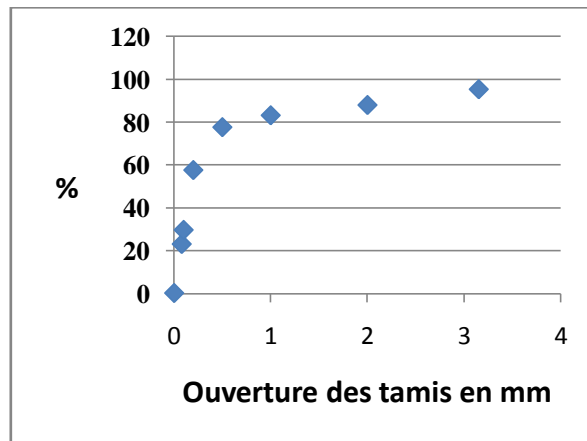


Figure 17: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2006

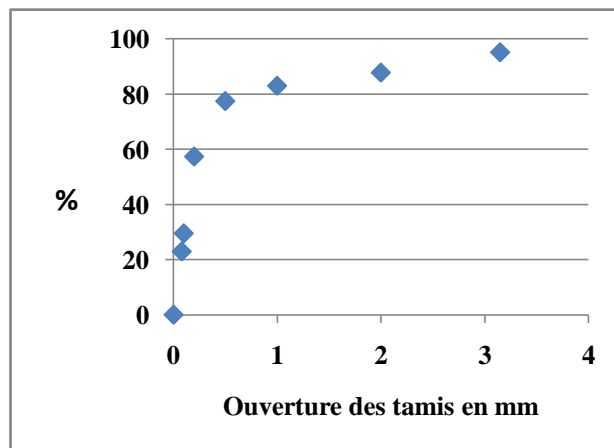


Figure 18: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison d'été de l'année 2006

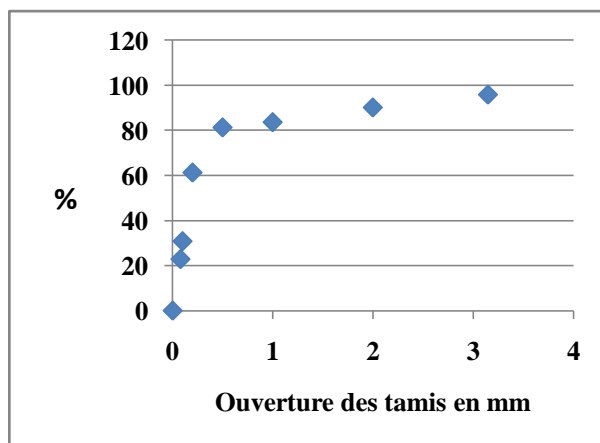


Figure 19: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2007

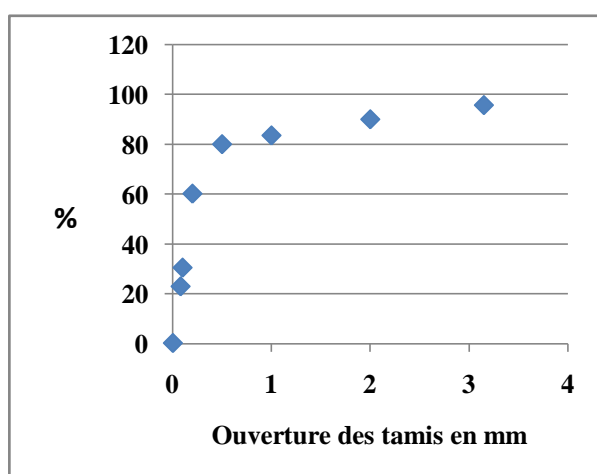


Figure 20: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2007

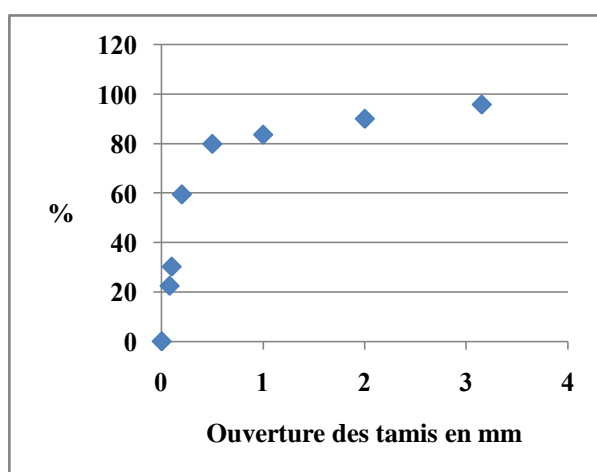


Figure 21: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison d'été de l'année 2007

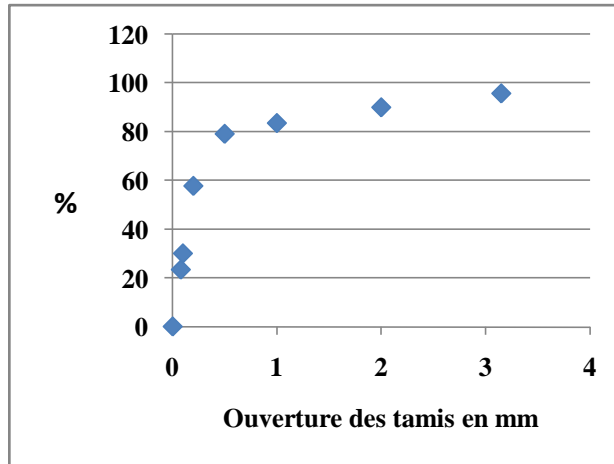


Figure 22: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2007

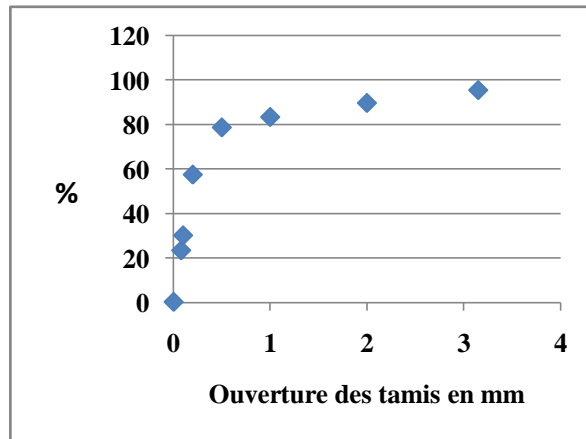


Figure 23: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2007

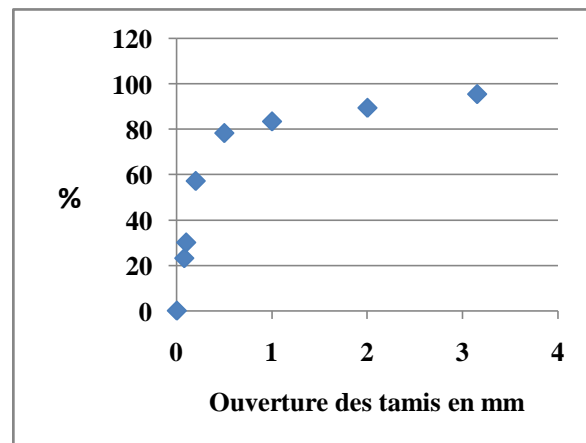


Figure 24: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison d'été de l'année 2007

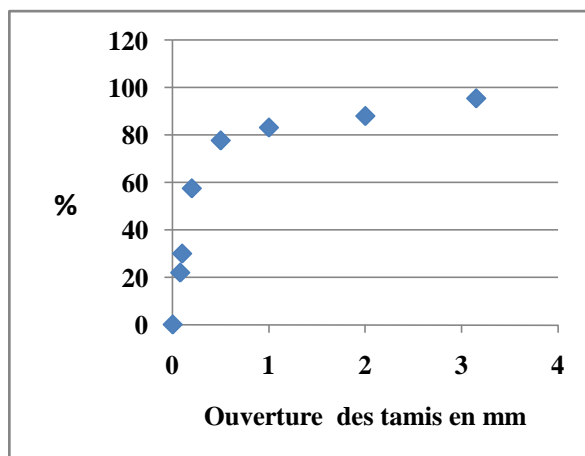


Figure 25 : Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2007

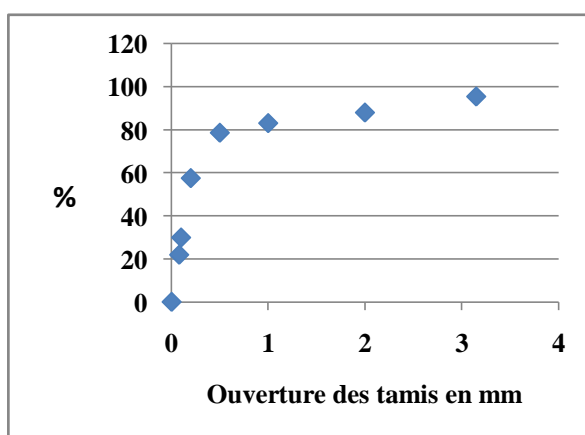


Figure 26: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2007

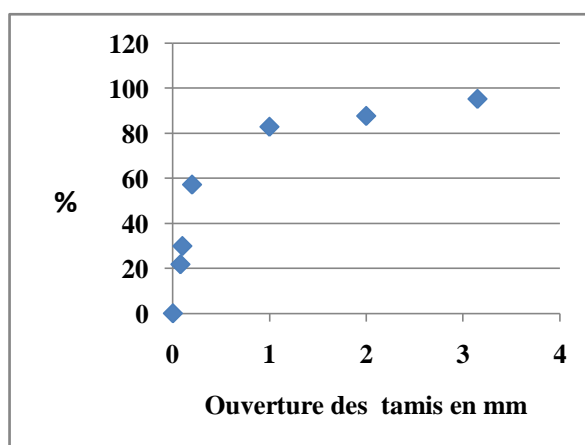


Figure 27: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison d'été de l'année 2007

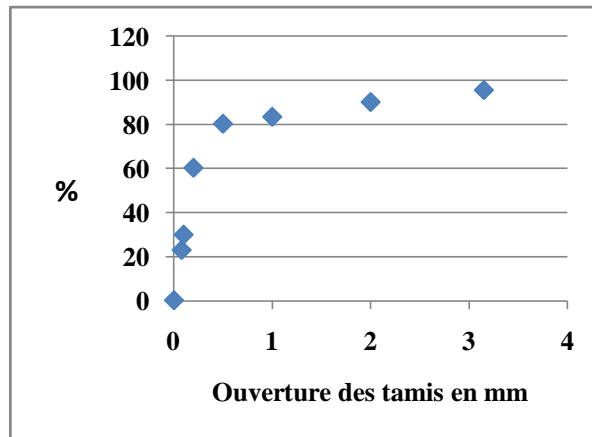


Figure 28: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2008

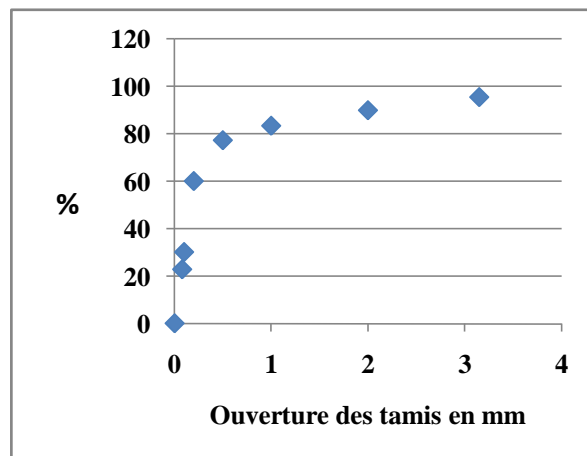


Figure 29: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2008

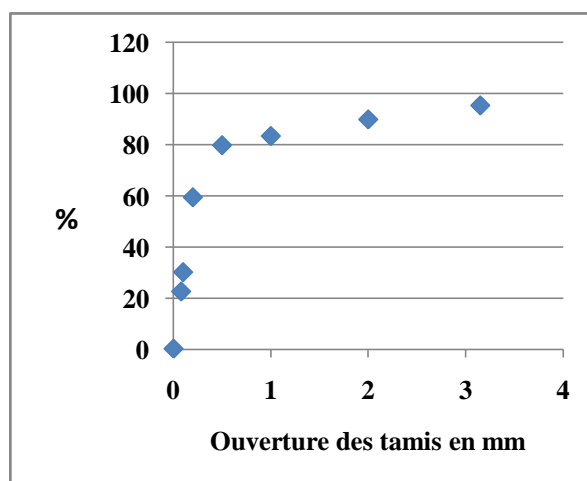


Figure 30: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison d'été de l'année 2008

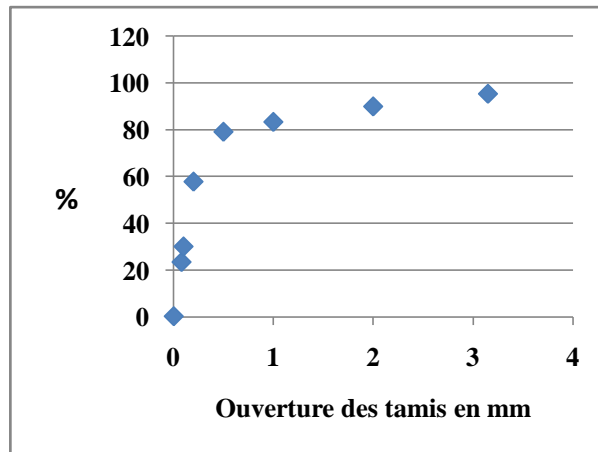


Figure 31: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2008

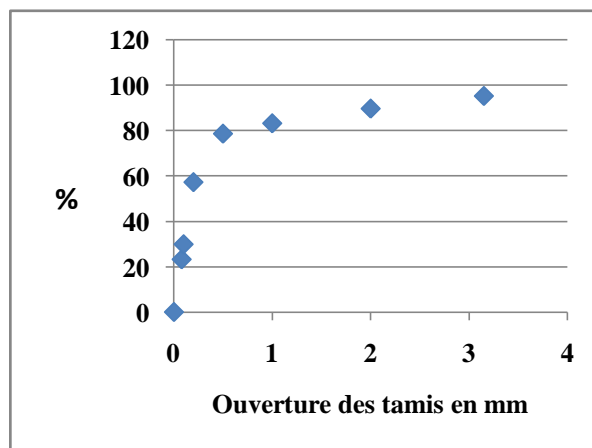


Figure 32: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2008

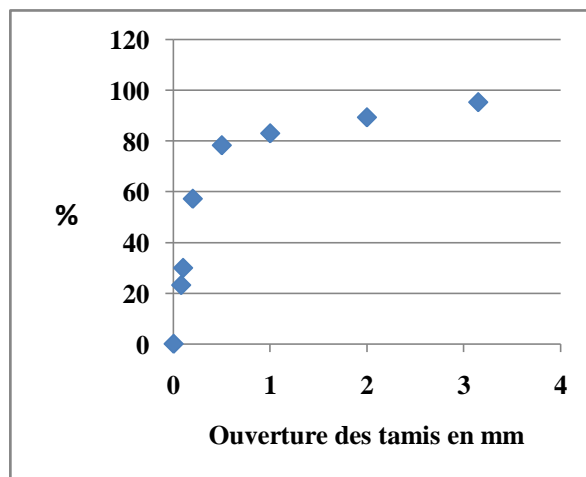


Figure 33: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison d'été de l'année 2008

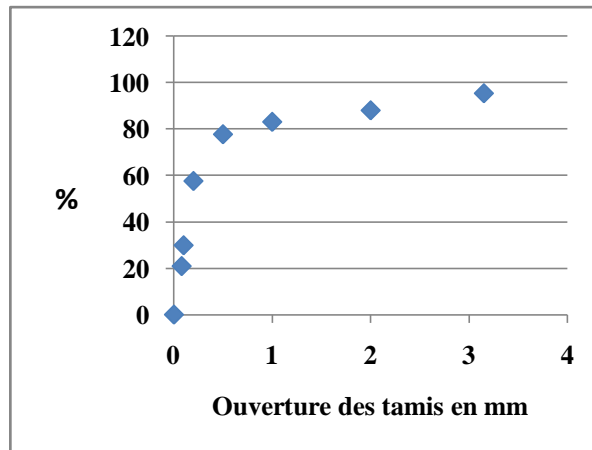


Figure 34: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2008

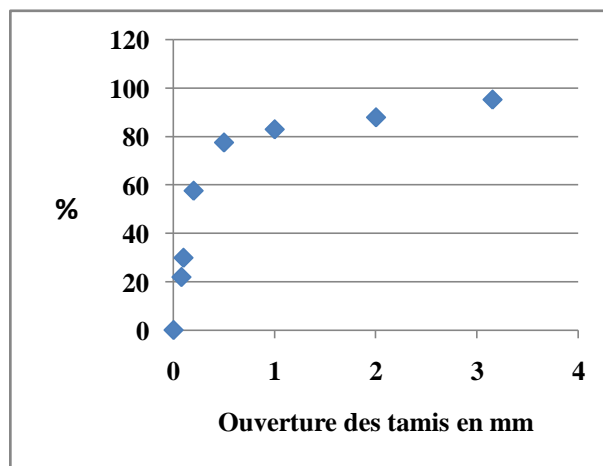


Figure 35: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2008

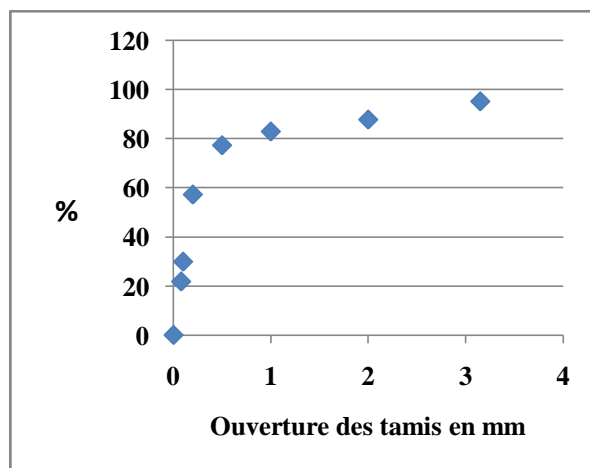


Figure 36: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison d'été de l'année 2008

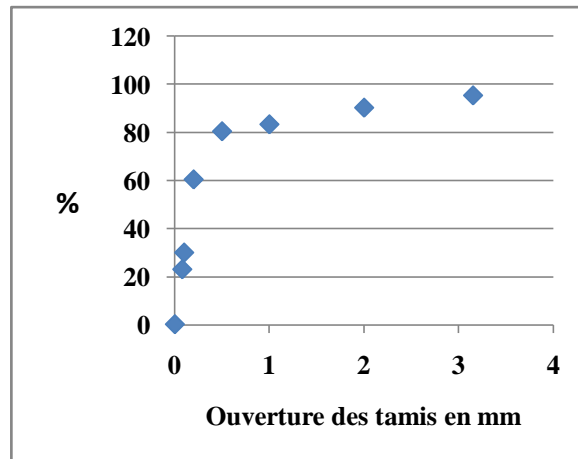


Figure 37: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2009

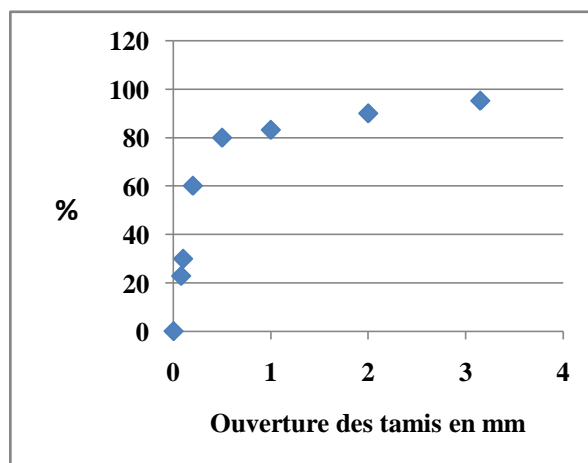


Figure 38: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2009

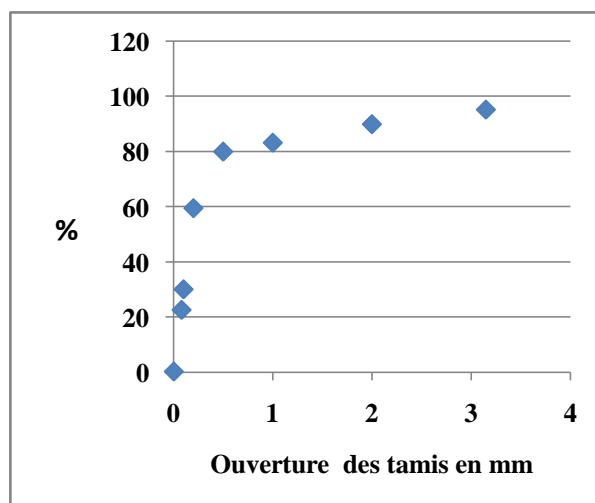


Figure 39: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison d'été de l'année 2009

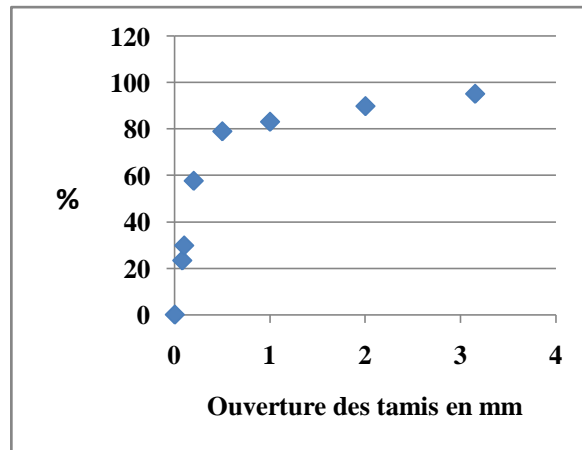


Figure 40: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2009

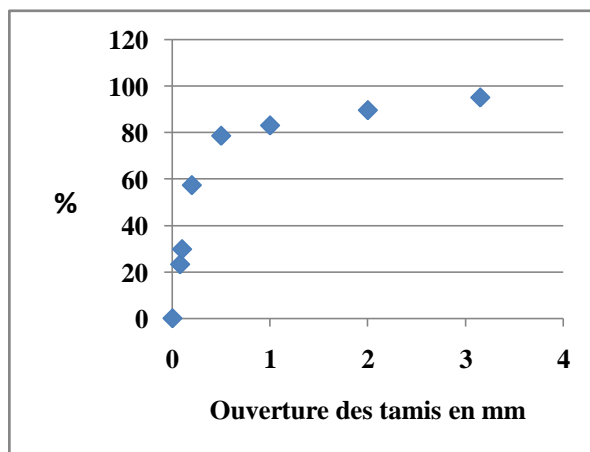


Figure 41: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2009

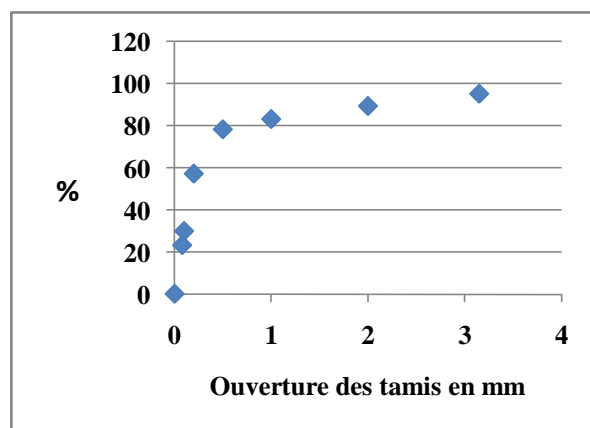


Figure 42: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison d'été de l'année 2009

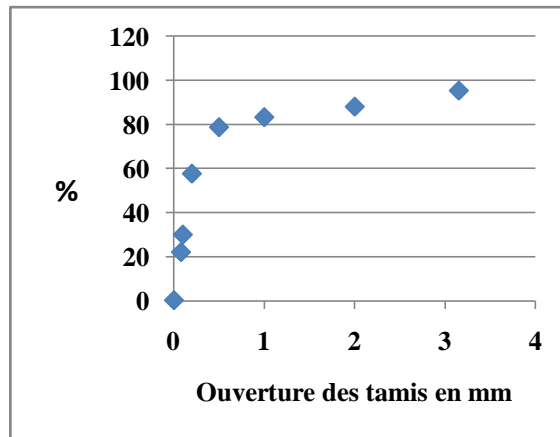


Figure 43: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2009

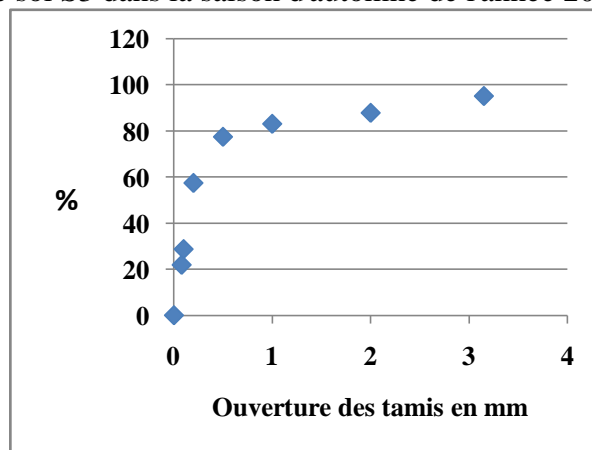


Figure 44: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2009

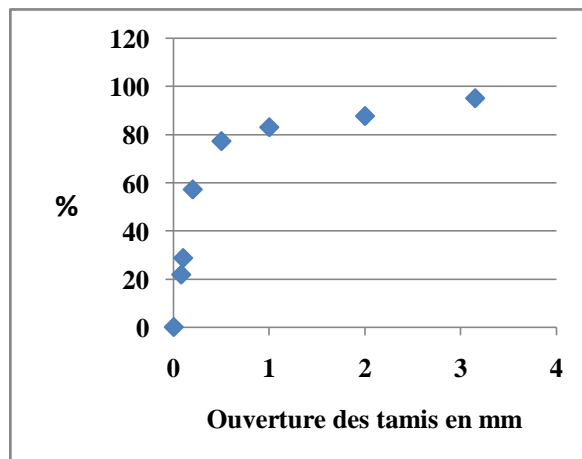


Figure 45: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison d'été de l'année 2009

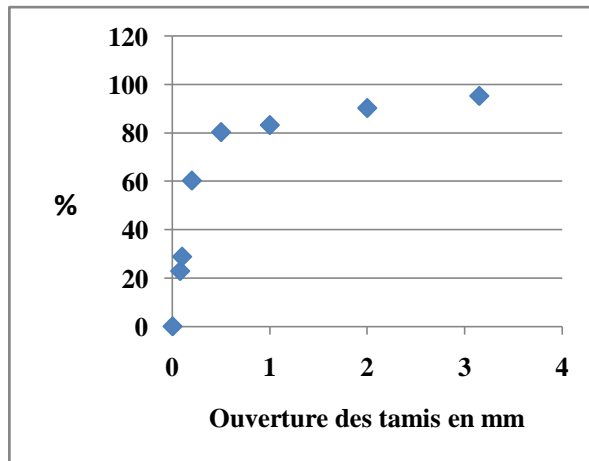


Figure 46: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2010

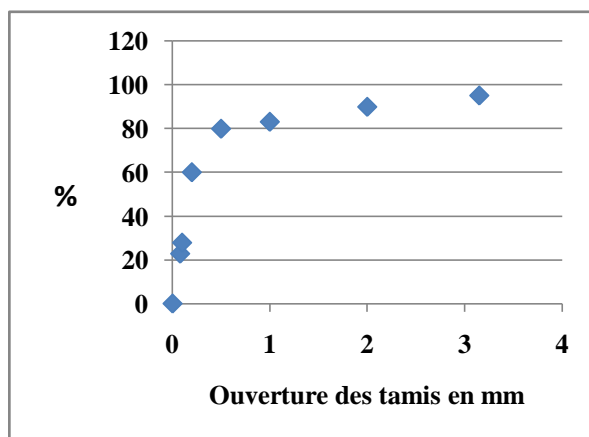


Figure 47: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2010

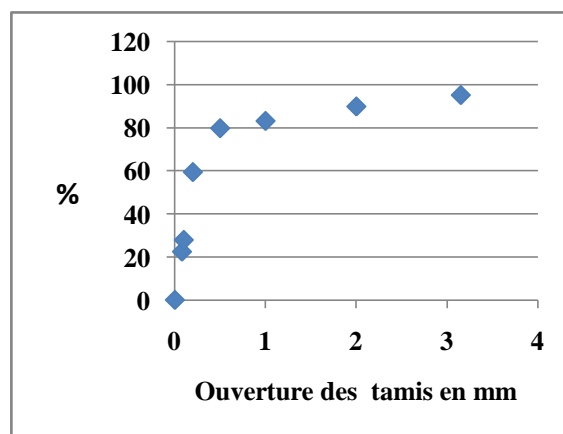


Figure 48: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S1 dans la saison d'été de l'année 2010

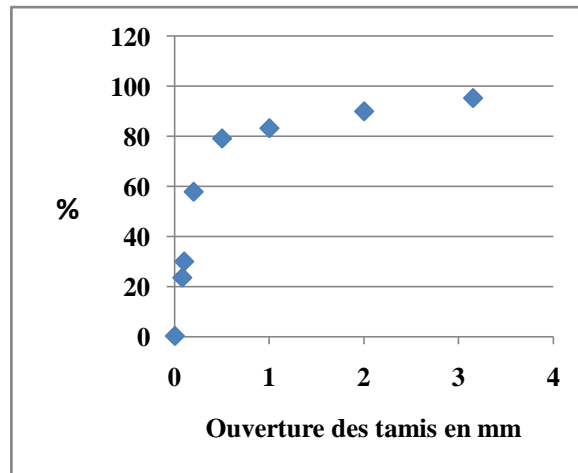


Figure 49: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2010

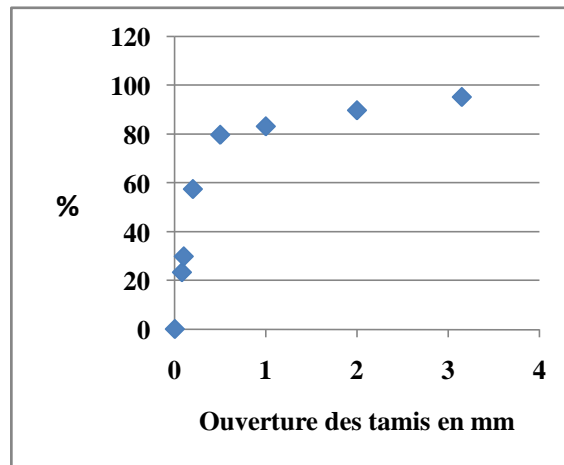


Figure 50: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2010

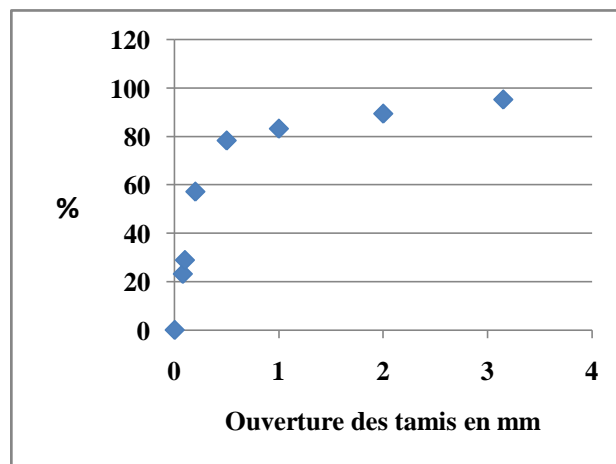


Figure 51: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S2 dans la saison d'été de l'année 2010

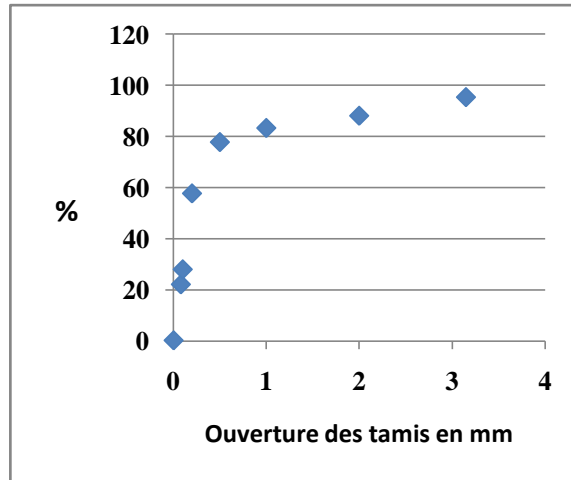


Figure 52: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2010

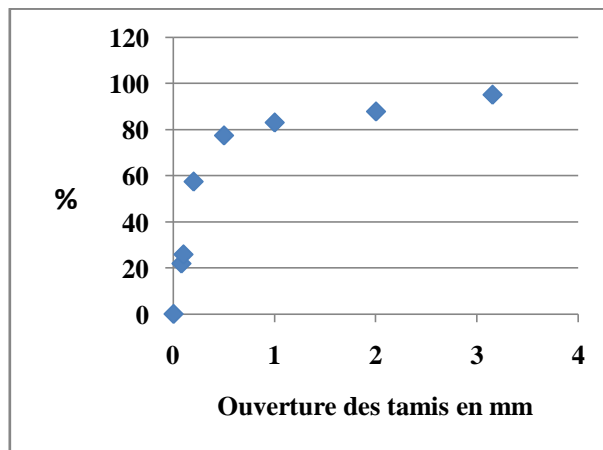


Figure 53: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2010

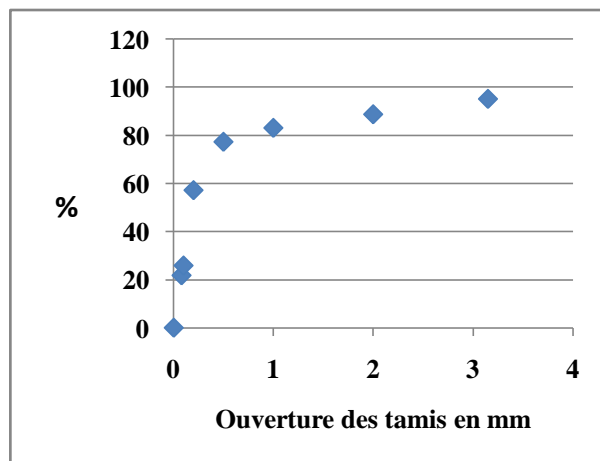


Figure 54: Pourcentage des tamis cumulés en fonction des ouvertures des tamis en mm pour le sol S3 dans la saison d'été de l'année 2010.

La répartition granulométrique en fonction des classes texturales présentées dans ces tableaux montrent que les sols S1, S2 et S3 ont des profils semblables.

Ils sont majoritairement composés de fraction comprise entre 200µm - 50µm, donc leur texture est celle d'un sable limoneux. On remarque aussi qu'il n'y a pas de variations significative de la granulométrie des trois sols selon les saisons et au cours des années.

Pour la suite de notre étude, toutes les analyses sont effectuées sur la fraction granulométrique 200µm afin d'obtenir des échantillons homogènes, car cette fraction représente 55% de l'échantillon de sol.

I.1.2- Les paramètres physico-chimiques des sols S1, S2 et S3 aux cours de différentes saisons des années 2006-2010.

L'ensemble des résultats est répertorié dans les tableaux (21-25):

Tableau 21: Paramètres physico-chimiques des sols S1, S2 et S3 dans les différentes saisons de l'année 2006.

Paramètres Sols		Humidité résiduelle (%)	pH eau	pH KCl	pH CaCl ₂	CEC (meq/ 100g)	Calcaire total	Matières organiques (%)	Carbone total
S1	Hiver	18	7,55	6,49	7	6,75	37,87	3,69	2,14
	Printemps	11	8,42	7,38	7,87	6,87	38,40	3,44	2
	Eté	6	8,52	7,48	7,98	7	38,51	3,41	1,98
S2	Automne	16	8,21	7,18	7,68	6,42	37,90	3,55	2,06
	Printemps	11,5	8,39	7,35	7,87	6,89	38,36	3,43	1,99
	Eté	7	8,50	7,45	7,95	6,98	38,48	3,42	1,98
S3	Automne	15,50	8	6,95	7,48	6,40	37,33	3,60	2,08
	Printemps	12	8,11	7,05	7,57	6,88	37,98	3,58	2,07
	Eté	10	8,21	7,15	7,65	6,95	38	3,53	2,05

Tableau 22: Paramètres physico-chimiques des sols S1, S2 et S3 dans les différentes saisons de l'année 2007.

Paramètres Sols		Humidité résiduelle (%)	pH eau	pH KCl	pH CaCl ₂	CEC (meq/ 100g)	Calcaire total	Matières organiques (%)	Carbone total
S1	Hiver	19,12	7,52	6,49	7	7,85	37,96	3,72	2,16
	Printemps	12,43	8,43	7,40	7,91	8,95	38,45	3,45	2,06
	Eté	09,90	8,55	7,53	8	10	38,60	3,39	1,96
S2	Automne	16,52	8,20	7,20	7,69	7,33	38	3,55	2,06
	Printemps	12,50	8,41	7,39	7,90	8,52	38,41	3,46	2
	Eté	10	8,53	7,51	7,50	9,95	38,59	3,40	1,96
S3	Automne	16,45	7,92	6,91	7,40	6,12	37,90	3,64	2,11
	Printemps	12,62	8	6,98	7,48	6,49	38,18	3,59	2,08
	Eté	10,06	8,28	7,26	7,77	06,96	38,31	3,50	2,03

Tableau 23: Paramètres physico-chimiques des sols S1, S2 et S3 dans les différentes saisons de l'année 2008.

Paramètres Sols		Humidité résiduelle (%)	pH eau	pH KCl	pH CaCl ₂	CEC (meq/ 100g)	Calcaire total	Matières organiques (%)	Carbone total
S1	Hiver	18,51	7,88	6,80	7,37	8,84	38	3,66	2,12
	Printemps	11,33	8,53	7,50	8	10,41	38,50	3,40	1,96
	Eté	10,21	8,60	7,58	8,09	10,45	38,69	3,30	1,91
S2	Automne	16,85	8,25	7,22	7,74	8,23	38,33	3,53	2,06
	Printemps	11,46	8,40	7,38	7,88	9,23	38,56	3,46	2,10
	Eté	10,32	8,59	7,57	8,06	10,42	38,65	3,33	1,93
S3	Automne	16,13	8,18	7,15	7,66	6,90	37,94	3,57	2,04
	Printemps	11,22	8,30	7,29	7,78	6,96	38,35	3,48	2,07
	Eté	10,12	8,38	7,36	7,85	06,97	38,48	3,47	2,01

Tableau 24: Paramètres physico-chimiques des sols S1, S2 et S3 dans les différentes saisons de l'année 2009.

Paramètres Sols		Humidité résiduelle (%)	pH eau	pH KCl	pH CaCl ₂	CEC (meq/ 100g)	Calcaire total	Matières organiques (%)	Carbone total
S1	Hiver	18	7,95	6,93	7,43	08,62	38,15	3,62	2,10
	Printemps	11,67	8,51	7,50	8	10	38,62	3,43	1,99
	Eté	10,75	8,65	7,63	8,13	11,12	38,78	3,20	1,85
S2	Automne	16,53	8,12	7,08	7,60	8,25	38,11	3,58	2,07
	Printemps	12	8,50	7,48	7,94	10,33	38,59	3,41	1,97
	Eté	10,85	8,63	7,60	8,10	11,10	38,75	3,25	1,88
S3	Automne	16	8	6,97	7,49	8	38,02	3,59	2,08
	Printemps	11,66	8,49	7,46	8	10,03	38,49	3,42	1,98
	Eté	10,33	8,56	7,52	8,03	10,25	38,63	3,37	1,95

Tableau 25: Paramètres physico-chimiques des sols S1, S2 et S3 dans les différentes saisons de l'année 2010.

Paramètres Sols		Humidité résiduelle (%)	pH eau	pH KCl	pH CaCl ₂	CEC (meq/ 100g)	Calcaire total	Matières organiques (%)	Carbone total
S1	Hiver	18,11	8	6,97	7,48	10,13	38,24	3,59	2,08
	Printemps	11,78	8,57	7,56	8,06	11,87	38,73	3,35	1,94
	Eté	10,88	8,71	7,70	8,18	13,23	38,86	3,10	1,79
S2	Automne	16,60	8,17	7,15	8,06	10	38,20	3,58	2,07
	Printemps	12,25	8,58	7,55	7,05	11,52	38,70	3,34	2,21
	Eté	11	8,69	7,65	8,16	12,88	38,80	3,15	1,82
S3	Automne	16	8,12	7	7,50	09,54	38,17	3,58	2,07
	Printemps	12	8,54	7,50	8,02	10,33	38,63	3,40	1,97
	Eté	10,65	8,62	7,60	8,10	11,08	38,73	3,27	1,89

1.1.2.1- L'humidité résiduelle

Les valeurs en humidité résiduelle s'échelonnent entre 6 et 19,12 pour le sol S1, entre 7 et 16,85 pour le sol S2 et entre 10 et 16,45 pour le sol S3, il ya une variation temporelle de l'humidité, qui est assez significative à travers les saisons dans les trois sols. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans la saison d'automne pour les sols S1 et S2 et dans la saison d'hiver pour le sol S3. Le prélèvement des ETM par les plantes augmente principalement avec augmentation de la valeur d'humidité résiduelle c'est-à-dire dans la saison d'hiver et d'automne.

1.1.2.2- Le pH

Le pH-eau mesuré pour les sols S1, S2 et S3 montre un caractère alcalin. Cela coïncide avec la forte teneur en carbonates dans ces sols. Il n'ya pas de modifications significatives du pH aux cours du temps. Le pH-KCl et pH-CaCl₂ sont toujours inférieurs au pH-eau et il n'y a pas une différence

importante entre ces trois mesures, ceci nous renseigne sur la tendance à l'acidification du sol analysé.

Les évolutions du pH pourraient notamment résulter de l'activité biologique et d'une augmentation de la teneur en CO₂.

I.1.2.3- La capacité d'échange cationique (CEC)

Pour les trois sols S1, S2 et S3, les valeurs de la capacité d'échange cationique obtenues s'échelonnant entre 6,12 et 13,23 meq/100g, ces valeurs sont assez faibles par rapport aux valeurs moyennes annoncées par ^[81]: 60 meq/100g pour un sol minéral et 200 meq/100g pour un sol organique. Ces valeurs varient peu aux cours du temps cependant on remarque une augmentation de la capacité d'échange cationique avec augmentation du pH.

Plus la CEC est élevée, plus les cations métalliques (Cd, Cu, Pb, Co, Zn, Ni, Cr, Mn) sont adsorbés ou complexés par les matières organiques et les oxydes, donc moins assimilable par les plantes. C'est pourquoi la quantité et la nature des matières organiques et des oxydes dans le sol conditionnent la métallique des métaux lourds.

I.1.2.4- Le calcaire totale

Les taux de calcaire total enregistré dans les sols S1, S2 et S3 sont importants, ce sont des sols calcaires. Ils varient entre 37,87 et 38,86 % pour le sol S1, entre 37,90 et 38,80% pour le sol S2 et entre 37,33 et 38,17 % pour le sol S3. Il n'y a pas de différences importantes de teneur en calcaire entre les différents saisons et années dans les trois sols. Le calcaire fournit aux végétaux le calcium nécessaire. Entre autres, le calcaire bloque certains éléments indispensables aux plantes comme le fer et divers oligoéléments (notamment manganèse, cuivre), il provoque alors des carences (qui se manifestent par exemple des chloroses chez les végétaux) ^[88].

I.1.2.5- La matière organique (MO)

Les sols S1, S2 et S3 ne sont pas riches en matières organiques et une variation non considérable de la matière organique aux cours du temps est observée.

On remarque également qu'une augmentation légère du pH entraîne une diminution du taux de la matière organique, entraînant du même coup l'augmentation de la CEC des sols. Les eaux usées, à travers leur pouvoir fertilisant entraînent une augmentation des éléments nutritifs du sol ^[88] qui stimulent l'activité microbiologique du sol ^[89], ce qui favorise la minéralisation de la matière organique.

I.2- Extraction des métaux lourds dans les sols S1, S2 et S3

I.2.1- Extraction par l'eau régale aux cours des saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010

Après la mise en solution, on a déterminé la concentration totale de sept métaux lourds et deux

métaux majeurs: cadmium(Cd), plomb (Pb), cuivre (Cu), zinc (Zn), Nickel (Ni), cobalt (Co), chrome (Cr), manganèse (Mn) et le fer (Fe), en utilisant le spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme. L'ensemble des résultats obtenus de l'analyse des teneurs totales de ces métaux lourds, est donné dans les tableaux (26-30) et représenté sous formes d'histogrammes dans les figures (55-63).

Tableau 26: Teneurs en métaux lourds dans les sols S1, S2 et S3 aux cours des différentes saisons de l'année 2006 extrait par l'eau régale –fraction 0,2mm.

	S1			S2			S3		
	Hiver	Print	Eté	Aut	Print	Eté	Aut	Print	Eté
Cd	0,7 ±0,07	1 ±0,10	1,1 ±0,10	2 ±0,20	2,78 ±0,47	3,56 ±0,52	2,34 ±0,40	3 ±0,50	3,81 ±0,54
Cu	13,45 ±0,93	14,56 ±1,14	14,33 ±1,14	5 ±0,57	9,86 ±0,83	10,35 ±0,85	15,43 ±1,15	17,96 ±1,17	17,6 ±1,17
Pb	29,66 ±1,50	30,5 ±1,51	35,63 ±1,51	84,33 ±1,92	94,33 ±1,98	99,9 ±0,85	55,43 ±1,64	60 ±1,64	62,4 ±1,70
Zn	60,33 ±1,70	73,57 ±1,81	80,12 ±1,90	300,9 ±4,03	508,72 ±5,10	600,07 ±7,01	83,22 ±1,90	107,66 ±1,64	129,57 ±2,22
Ni	14,85 ±1,15	17,68 ±1,17	28,77 ±1,48	17,44 ±1,17	20,66 ±1,20	36,87 ±1,52	6,79 ±0,65	9,88 ±1,64	10,87 ±0,86
Co	4,82 ±0,51	6,89 ±0,63	5,51 ±0,57	4,35 ±0,54	6,90 ±0,67	5,36 ±0,57	5,76 ±0,58	7,97 ±1,64	7,36 ±0,72
Mn	82,52 ±1,90	109,27 ±2,10	100,33 ±2	150,54 ±2,50	197,88 ±2,96	189,93 ±2,80	100,66 ±2,02	187,42 ±1,64	170,18 ±2,64
Fe	8978,3 ±9,88	9887,3 ±10,72	9007 ±10	11500,7 ±12,12	12578,6 ±13	12450,3 ±12,86	9421,1 ±10,32	9885,3 ±10,69	9876,5 ±10,60
Cr	7 ±0,71	8,43 ±0,77	8,82 ±0,78	28,59 ±1,48	31,87 ±1,50	32,44 ±1,50	16,28 ±1,16	17,56 ±1,64	18,61 ±1,18

Print: printemps, **Aut:** automne

Tableau 27: Teneurs en métaux lourds dans les sols S1, S2 et S3 aux cours des différentes saisons de l'année 2007 extrait par l'eau régale –fraction 0,2mm.

	S1			S2			S3		
	Hiv	Print	Eté	Aut	Print	Eté	Aut	Print	Eté
Cd	0,98 ±0,09	1,59 ±0,15	1,84 ±0,18	2,87 ±0,48	3,28 ±0,50	3,85 ±0,54	2,93 ±0,49	3,74 ±0,52	4,05 ±0,55
Cu	15,13 ±1,15	17,88 ±1,17	16,97 ±1,16	13 ±0,93	18,75 ±1,18	14,35 ±1,14	58,43 ±1,67	78,84 ±1,84	67,44 ±1,73
Pb	39 ±1,52	56,87 ±1,64	44,89 ±1,45	86 ±1,92	96,77 ±1,98	100 ±2,04	66,33 ±1,75	81 ±1,90	78,77 ±1,85
Zn	82,77 ±1,90	96,48 ±1,98	110,7 ±2,05	541,83 ±6,27	623,37 ±7,16	651,18 ±7,40	197,54 ±3,01	230,21 ±3,30	268,55 ±3,64
Ni	17,97 ±1,17	18,81 ±1,18	29,5 ±1,50	28,23 ±1,48	33,45 ±1,51	38,33 ±1,53	6,79 ±0,65	9,88 ±0,84	10,5 ±0,85
Co	7,76 ±0,74	9,9 ±0,84	8,67 ±0,77	6,75 ±0,65	9,4 ±0,82	7,36 ±0,72	37,77 ±1,52	50,55 ±1,60	56 ±1,65
Mn	122,43 ±2,20	191,55 ±2,90	172,58 ±2,70	160,66 ±2,55	206,9 ±3,05	198 ±2,96	168,44 ±2,64	210,33 ±3,10	198,76 ±2,98
Fe	10089,4 ±10,80	10779 ±11,10	10567 ±11,05	11391, 3±12,14	12980,3 ±13,33	12970,3 ±13,3	10332 ±10,87	10471 ±10,90	10456 ±10,89
Cr	9,64 ±0,82	10,76 ±0,85	12,92 ±0,92	27,22 ±1,46	30,45 ±1,50	38,66 ±1,52	17,18 ±1,17	20,33 ±1,20	28,2 ±1,48

Tableau 28: Teneurs en métaux lourds dans les sols S1, S2 et S3 aux cours des différentes saisons de l'année 2008 extrait par l'eau régale –fraction 0,2mm.

	S1			S2			S3		
	Hiv	Print	Eté	Aut	Print	Eté	Aut	Print	Eté
Cd	1,57 ±0,15	2,73 ±0,47	2,80 ±0,48	3,30 ±1,50	4,33 ±0,55	4,78 ±0,55	1,73 ±0,17	4,26 ±0,56	4,94 ±0,5
Cu	18,6 ±1,18	19,63 ±1,19	19,13 ±1,19	12,85 ±0,92	30,44 ±1,50	20,87 ±1,20	79,85 ±1,87	100,5 ±2,02	90,67 ±1,97
Pb	22,15 ±1,28	76,75 ±1,83	73,17 ±1,80	109,4 ±2,01	120,37 ±2,17	118,66 ±2,10	105,9 ±2,02	113,11 ±2,10	100,77 ±2
Zn	300 ±4,03	367,07 ±4,60	382,57 ±4,76	542,07 ±6,36	655,44 ±7,40	670,5 ±7,51	300,55 ±4,04	310,44 ±4,05	340,56 ±4,30
Ni	23,87 ±1,30	23,92 ±1,33	30,42 ±1,50	33,5 ±1,51	40,27 ±1,54	44,78 ±1,55	48,37 ±1,58	55,36 ±1,63	60,27 ±1,70
Co	6,1 ±0,62	12,55 ±0,90	12,12 ±0,90	9,66 ±1,83	15,17 ±1,15	10,45 ±0,86	42,61 ±1,55	55,44 ±1,64	60,79 ±1,70
Mn	186 ±2,80	242,85 ±3,38	230,85 ±3,27	187,68 ±2,80	215,25 ±3,10	205,40 ±3,01	225,18 ±3,20	249,56 ±3,40	228,55 ±3,20
Fe	10256, ±10,73	10983 ±11	10790 ±10,95	12097,5 ±13	13007,3 ±14,04	13000 ±14	11053 ±12,18	11768 ±12,24	11698 ±12,55
Cr	14,45 ±1,14	25,35 ±1,45	25,10 ±1,45	38,12 ±1,53	50,76 ±1,60	45,33 ±1,56	20,43 ±1,20	38,21 ±1,53	35,95 ±1,52

Tableau 29: Teneurs en métaux lourds dans les sols S1, S2 et S3 aux cours des différentes saisons de l'année 2009 extrait par l'eau régale –fraction 0,2mm.

	S1			S2			S3		
	Hiv	Print	Eté	Aut	Print	Eté	Aut	Print	Eté
Cd	2 ±0,20	2,70 ±0,47	2,94 ±0,48	3,85 ±0,54	4,10 ±0,55	4,25 ±0,55	3,79 ±0,53	4,86 ±0,56	5,33 ±1,44
Cu	19,51 ±1,19	21,54 ±1,24	20,97 ±1,20	24,15 ±1,44	38,89 ±1,52	31,87 ±1,50	83,15 ±1,90	103,33 ±2	96,33 ±1,44
Pb	80,5 ±1,90	91,67 ±1,97	88,62 ±1,95	116,66 ±2,10	125,43 ±2,20	120,77 ±2,20	106,55 ±2	119 ±2,10	115,33 ±1,44
Zn	310,77 ±4,05	370 ±4,60	396,88 ±4,82	643 ±7,24	683,25 ±7,53	701 ±8	350 ±4,40	380,33 ±4,50	404,78 ±4,83
Ni	25,18 ±1,42	25,88 ±1,43	31,81 ±1,50	45,32 ±1,57	53,27 ±1,60	60,15 ±1,70	54,44 ±1,60	60,22 ±1,70	65,88 ±1,72
Co	12,33 ±0,94	17,36 ±1,17	15 ±1,15	10,50 ±0,85	16,22 ±1,16	12,5 ±0,90	45 ±1,56	60,16 ±1,70	64 ±1,70
Mn	200 ±3,02	255,14 ±3,45	247,22 ±3,40	197,68 ±1,64	249,66 ±3,40	225,33 ±3,17	251,33 ±3,41	254,67 ±3,44	237 ±3,29
Fe	10506,70 ±10,64	11034 ±12,10	10957 ±11,05	12340 ±13,24	13288,1 ±14,25	13098, 1±14	12061 ±13,15	12796 ±13,44	12712± 13,40
Cr	32,11 ±1,50	43,10 ±1,54	36,49 ±1,52	42,61 ±1,55	57 ±1,65	49,21 ±1,60	35,89 ±1,52	50,77 ±1,60	44 ±1,54

Tableau 30: Teneurs en métaux lourds dans les sols S1, S2 et S3 aux cours des différentes saisons de l'année 2010 extrait par l'eau régale –fraction 0,2mm.

	S1			S2			S3		
	Hiv	Print	Eté	Aut	Print	Eté	Aut	Print	Eté
Cd	2,55 ±0,45	2,89 ±0,48	3 ±0,50	4,17 ±0,55	4,32 ±0,56	4,40 ±0,56	4,57 ±0,56	5,02 ±1,44	5,75 ±1,44
Cu	20,61 ±1,20	22,90 ±1,28	22,34 ±1,26	30,77 ±1,50	42,81 ±1,54	36,33 ±1,52	87,22 ±1,95	105,67 ±1,44	98,66 ±1,44
Pb	82,33 ±1,90	98,23 ±1,98	90 ±1,98	120,77 ±2,16	139,11 ±2,28	130,56 ±2,28	110,45 ±2,05	135,66 ±1,44	120,5 ±1,44
Zn	374,56 ±4,55	400,33 ±4,86	415,29 ±4,87	655,27 ±7,18	683,25 ±7	718 ±6,89	436,28 ±5,06	488,27 ±1,44	506,25 ±1,44
Ni	29 ±1,49	30,19 ±1,50	38,33 ±1,52	50,88 ±1,60	63,76 ±1,70	68,44 ±1,76	57,67 ±1,65	64,43 ±1,44	69,20 ±1,44
Co	20,15 ±1,20	30,77 ±1,50	24,16 ±1,45	17,64 ±1,17	28 ±1,48	20,33 ±1,20	50,43 ±1,60	63,33 ±1,44	69,45 ±1,44
Mn	227 ±3,13	268,25 ±3,48	256,24 ±3,31	203,28 ±3	259,88 ±3,43	242,58 ±3,39	258,55 ±3,36	268,86 ±1,44	250,87 ±1,44
Fe	11090, 7 ±12,14	11575 ±12,20	11298 ±12,11	13392,6 ±14,56	13700,25 ±14,64	13500,3 ±14,60	12789 ±13,68	12830 ±13,70	12816± 13,68
Cr	42,88 ±1,54	53,25 ±1,62	48,77 ±1,58	48,33 ±1,57	69,44 ±1,76	55 ±1,62	42,19 ±1,54	61,82 ±1,44	55,23 ±1,44

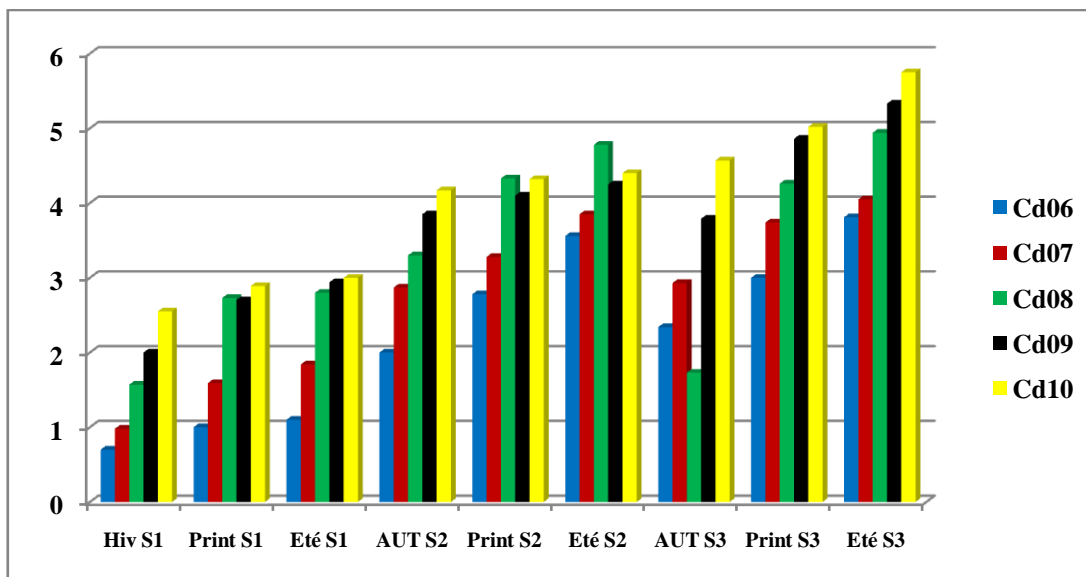


Figure 55: Histogramme illustrant les teneurs en Cd (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2006 à 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait à l'eau régale).

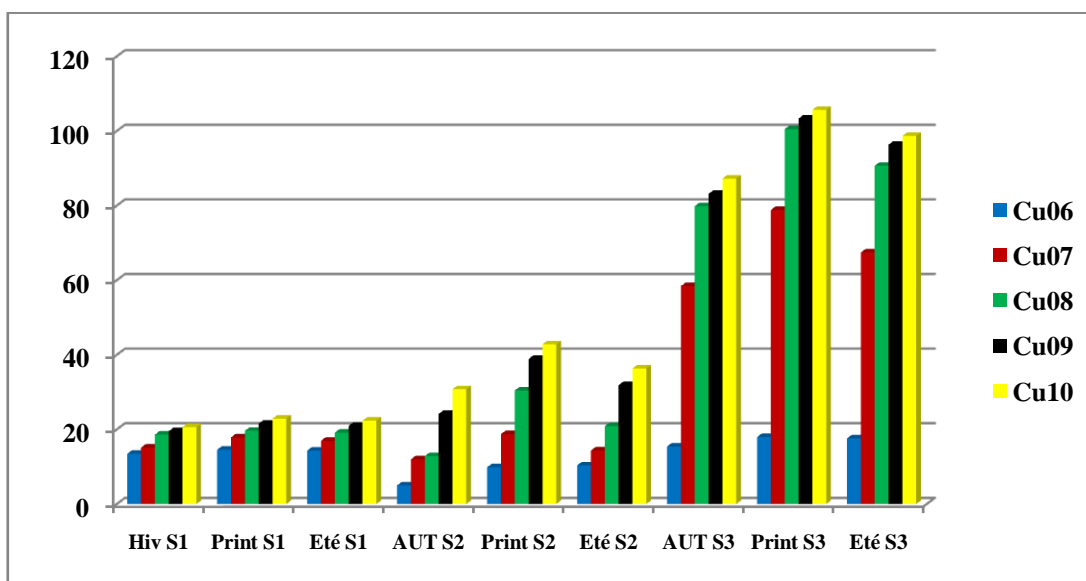


Figure 56: Histogramme illustrant les teneurs en Cu (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2006 à 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait à l'eau régale).

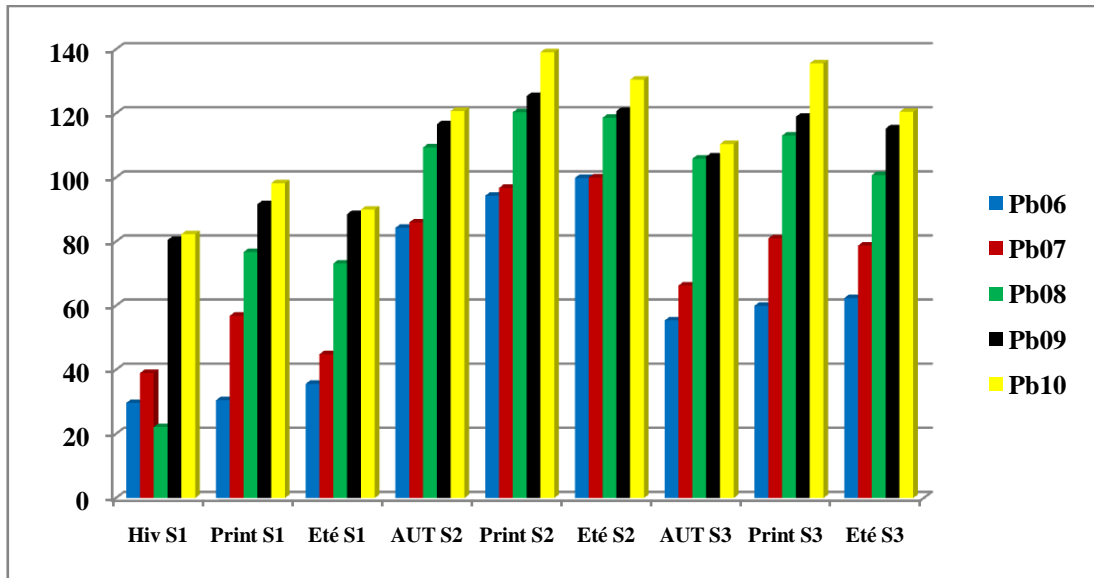


Figure 57: Histogramme illustrant les teneurs en Pb (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2006 à 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait à l'eau régale).

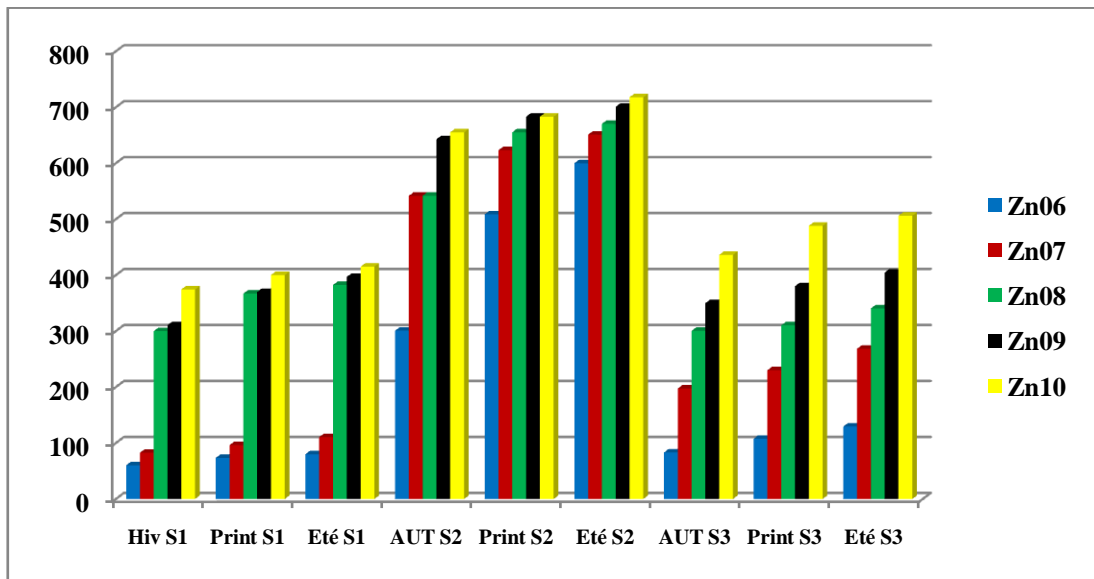


Figure 58: Histogramme illustrant les teneurs en Zn (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2006 à 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait à l'eau régale).

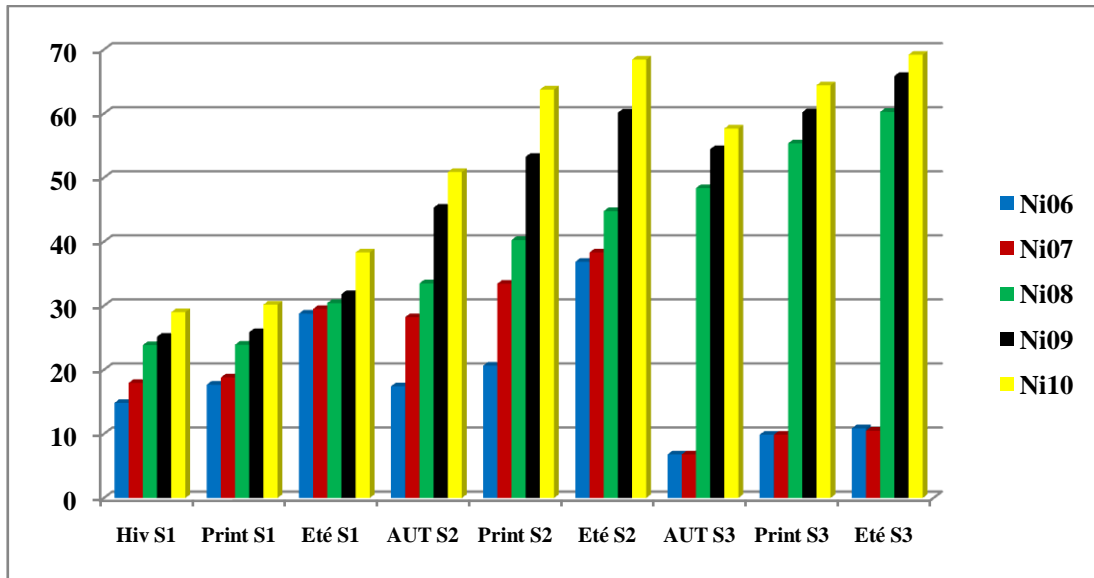


Figure 59: Histogramme illustrant les teneurs en Ni (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2006 à 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait à l'eau régale).

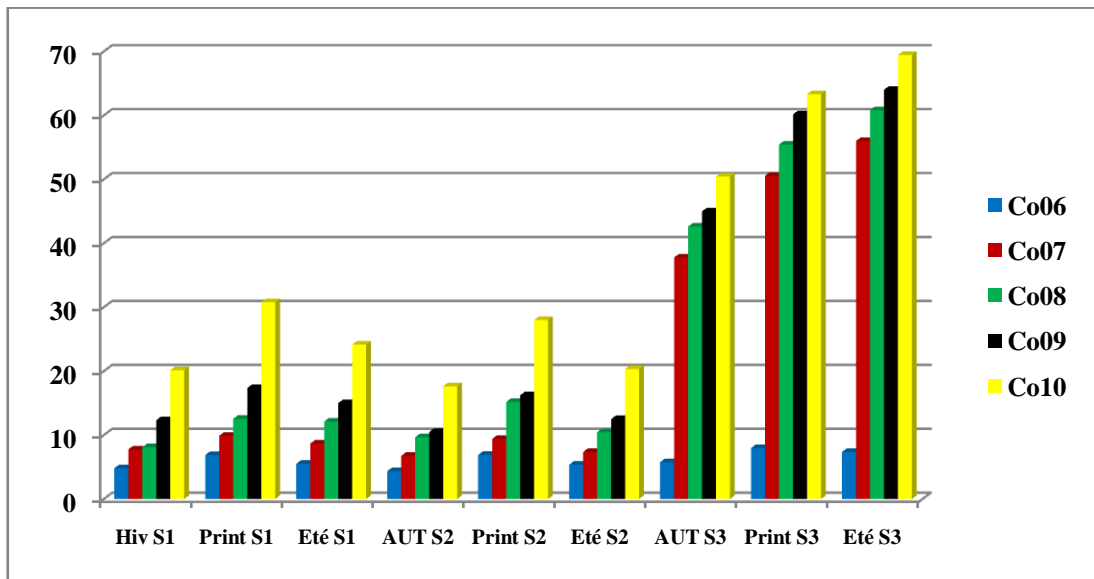


Figure 60: Histogramme illustrant les teneurs en Co (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2006 à 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait à l'eau régale).

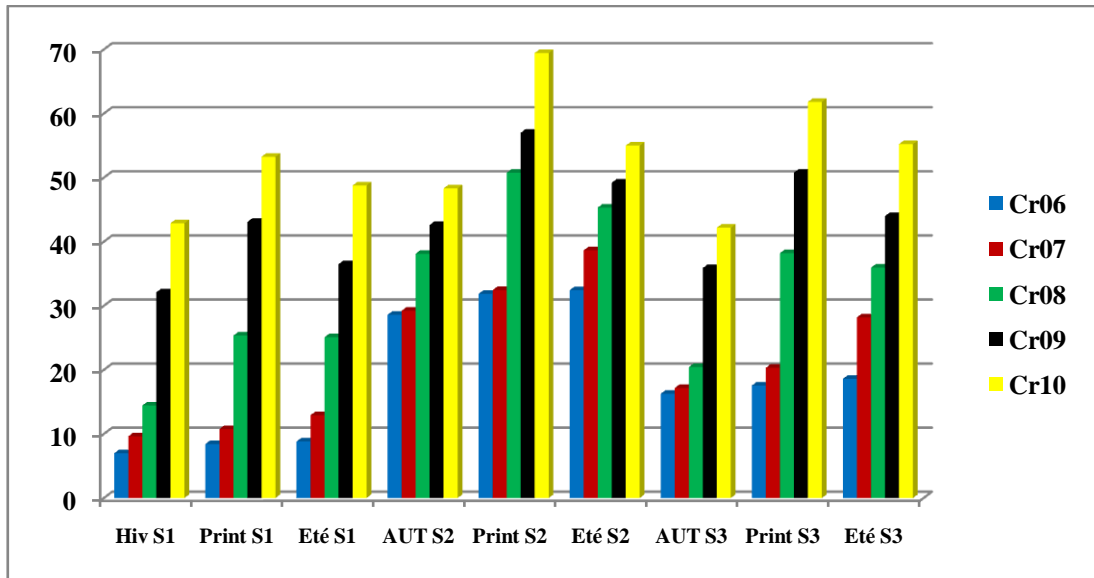


Figure 61: Histogramme illustrant les teneurs en Cr (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2006 à 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait à l'eau régale).

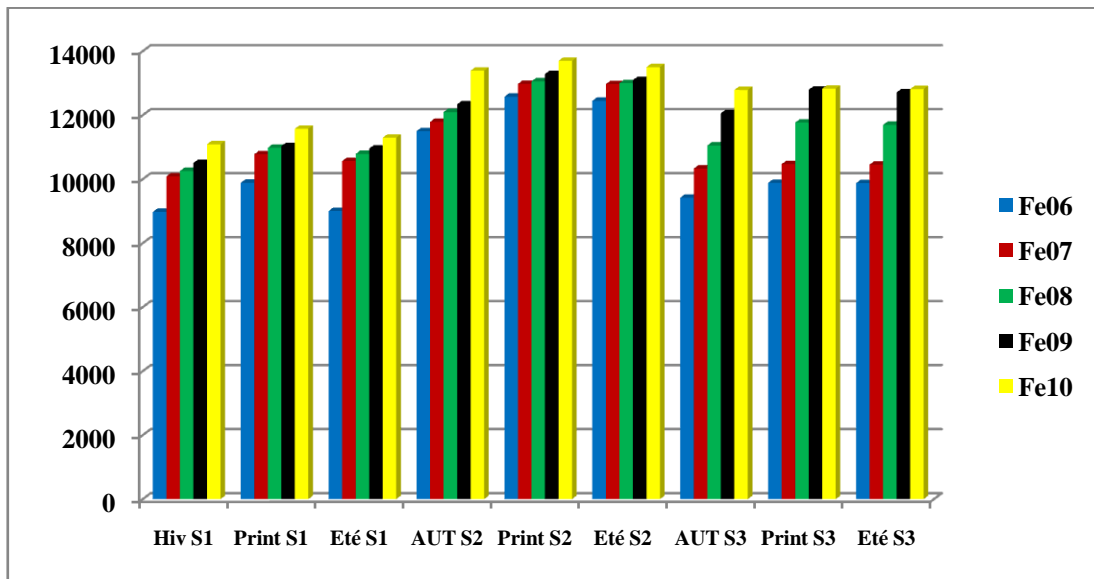


Figure 62: Histogramme illustrant les teneurs en Fe (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2006 à 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait à l'eau régale).

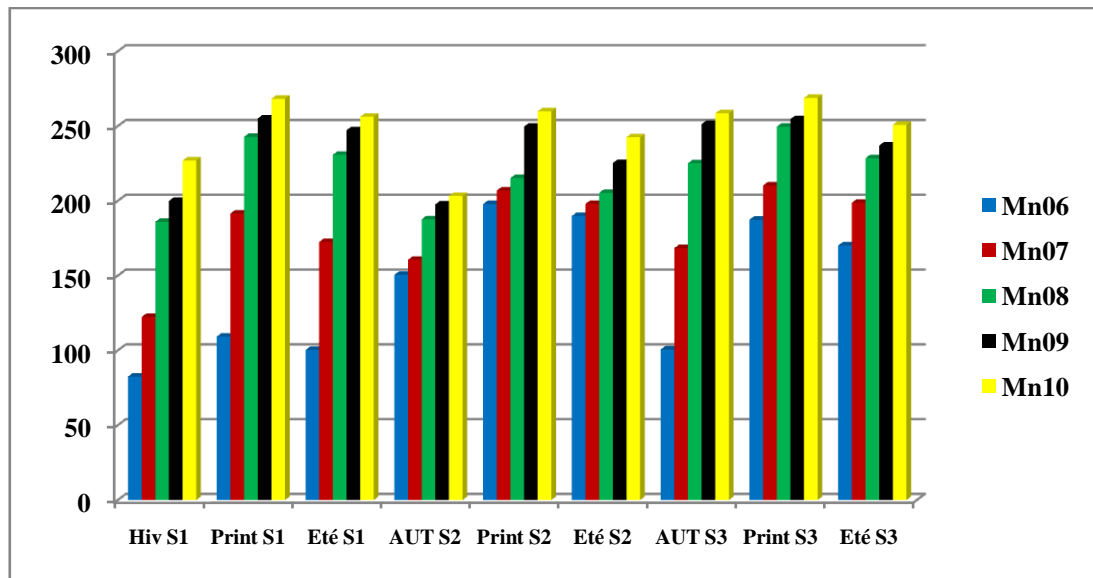


Figure 63: Histogramme illustrant les teneurs en Mn (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2006 à 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait à l'eau régale)

En absence de normes Algériennes relatives aux teneurs de références dans le sol, nous avons adopté une approche comparative par rapports aux références relevées dans la bibliographie et complétées par les normes européennes (voir tableau 2) pour interpréter nos résultats.

I.2.1.1- Le cadmium

Les teneurs totales en Cd se situent entre $(0,7 \pm 0,07)$ mg/kg et $(3 \pm 0,50)$ mg/kg pour le sol S1, entre $(2 \pm 0,20)$ mg/kg et $(4,40 \pm 0,56)$ mg/kg pour le sol S2 et entre $(2,34 \pm 0,40)$ mg/kg et $(5,75 \pm 1,44)$ mg/kg pour le sol S3, ces teneurs en Cd sont légèrement en dessus de seuils limites autorisée pour un sol définie dans le tableau 2, de l'année 2006-2010 pour les sols S2 et S3 et dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010 pour S1. Ceci montre que la contamination des sols est significative, mais ne présente pas de problème majeur, puisque même dans les boues utilisées pour l'épandage agricole de telles teneurs en métal sont tolérées.

I.2.1.2- Le cuivre

Les teneurs totales en Cu varient entre $(13,45 \pm 0,93)$ mg/kg et $(22,90 \pm 1,28)$ mg/kg pour le sol S1, entre $(5 \pm 0,57)$ mg/kg et $(42,81 \pm 1,54)$ mg/kg pour le sol S2 et entre $(15,43 \pm 1,15)$ mg/kg et $(105,67 \pm 1,44)$ mg/kg pour le sol S3.

Ces teneurs totales en Cu observées, dans les sols S1 se situent en dessous des normes définies dans le tableau 2, excepté pour le sol S3 où les valeurs trouvées dépassent légèrement ces normes dans la saison de printemps de l'année 2008 jusqu'à l'année 2010.

I.2.1.3- Le plomb

Les teneurs totales en Pb oscillent entre $(29,66 \pm 1,50)$ mg/kg et $(98,23 \pm 1,98)$ mg/kg pour le sol S1, entre $(84,33 \pm 1,92)$ mg/kg et $(139,11 \pm 2,28)$ mg/kg pour le sol S2 et entre $(55,43 \pm 1,64)$ mg/kg et $(135,66 \pm 1,44)$ mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs sont en dessous des limites définies dans le tableau 2, excepté pour les sols S2 et S3 dont les valeurs trouvées aux cours de l'année 2008-2010 sont élevées, donc on peut signaler une pollution par le plomb des sols S2 et S3.

I.2.1.4- Le zinc

Les teneurs totales en Zn s'échelonnent entre $(60,33 \pm 1,70)$ mg/kg et $(415,29 \pm 4,87)$ mg/kg pour le sol S1, entre $(300,90 \pm 4,03)$ mg/kg et $(718 \pm 6,89)$ mg/kg pour le sol S2 et entre $(83,22 \pm 1,90)$ mg/kg et $(506,25 \pm 1,44)$ mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs sont en dessus des limites définies dans le tableau 2, dans ce cas, on enregistre une pollution par le zinc, excepté pour le sol S1 et S3 qui ont des valeurs inférieures à 300 mg/kg aux cours des années 2006 et 2007.

I.2.1.5- Le nickel

Les teneurs totales en Ni s'échelonnent, entre $(14,85 \pm 1,15)$ mg/kg et $(38,33 \pm 1,52)$ mg/kg pour le sol S1, entre $(17,44 \pm 1,17)$ et $(68,44 \pm 1,76)$ mg/kg pour le sol S2 et entre $(6,79 \pm 0,65)$ et $(69,20 \pm 1,44)$ mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs se situent en dessus des normes limites définies dans le tableau 2.

Elles sont trouvées particulièrement dans:

- le sol S2 dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2009 et dans toutes les saisons de l'année 2010,
- le sol S3 dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010.
- Alors que pour le sol S1, les teneurs en Ni sont dans les normes.
- On constate alors une pollution légère par le nickel dans les sols S2 et S3.

I.2.1.6- Le cobalt

Les teneurs totales en Co varient, entre $(4,82 \pm 0,51)$ et $(30,77 \pm 1,50)$ mg/kg pour le sol S1, entre $(4,35 \pm 0,54)$ et $(28 \pm 1,48)$ mg/kg pour le sol S2 et entre $(5,76 \pm 0,58)$ et $(69,45 \pm 1,44)$ mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs se situent en dessous des normes définies dans le tableau 2, excepté pour le sol S3, où les valeurs trouvées dépassent ces normes dans les années 2007-2010 où les valeurs trouvées dépassent ces normes, donc le sol S3 est légèrement pollué par le Co.

I.2.1.7- Le chrome

Les teneurs totales en Cr oscillent, entre $(7 \pm 0,71)$ mg/kg et $(53,25 \pm 1,62)$ mg/kg pour le sol S1, entre $(28,59 \pm 1,48)$ et $(69,44 \pm 1,76)$ mg/kg pour le sol S2 et entre $(16,28 \pm 1,16)$ et $(61,82 \pm 1,44)$ mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs sont tous en dessous de la limite définie dans le tableau 2, donc les sols ne sont pas contaminés par le Cr.

I.2.1.8- Les éléments majeurs

a- Le manganèse

Les teneurs totales en Mn s'échelonnent, entre $(82,52 \pm 1,90)$ mg/kg et $(268,25 \pm 3,48)$ mg/kg pour le sol S1, entre $(150,54 \pm 2,50)$ mg/kg et $(259,88 \pm 3,43)$ mg/kg pour le sol S2 et entre $(100,66 \pm 2,02)$ mg/kg et $(268,86 \pm 1,44)$ mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs se situent en dessous des normes limites définies dans le tableau 2, donc le Mn ne pose pas un problème de contamination mais présente un problème de carence pour les trois sols.

b- Le fer

Les teneurs totales en Fe varient, entre $(8978,26 \pm 9,88)$ mg/kg et $(11575 \pm 12,20)$ mg/kg pour le sol S1, entre $(11500,70 \pm 12,12)$ mg/kg et $(13700,25 \pm 14,64)$ mg/kg pour le sol S2 et entre $(9421,10 \pm 10,32)$ mg/kg et $(12830 \pm 13,70)$ mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs sont en dessous du seuil normal défini dans le tableau 6 pour les sols S1, S2 et S3, donc le Fe ne pose pas de problème de contamination pour les sols, mais pose un problème de carence.

Comme conclusion, on peut déduire de tous ces résultats que d'importantes variations sont trouvées pour les différents sols qui présentent une évolution annuelle marquée par des variations saisonnières.

En effet des teneurs plus élevées en Cd, en Zn et en Ni sont trouvées en été pour les trois sols, alors que des teneurs en Pb, Mn et Cr sont plus élevées en printemps qu'en été pour les trois sols. Ceci est particulièrement vrai pour le Cr qui est difficilement détectable en été. Il existe donc un effet "saison" de l'année 2006 jusqu'à 2010.

Quels que soient le métal et les espèces, il y a une augmentation en teneurs des métaux lourds aux cours du temps, cette augmentation est significative en Fe, en Zn, en Pb, en Ni et en Co. Ainsi, on remarque l'existence d'une variation temporelle de la teneur en métaux. Il existe une "pollution" très net de:

- Zn et de Cd dans les trois sols,
- Pb et de Ni dans les sols S2 et S3,
- Cu et Co uniquement dans le sol S3.

Suite à ceci, on constate un effet "nature du polluant", avec le classement suivant:

Zn > Cd > Pb > Ni > Co.

Cette pollution trouve probablement son origine par le fait que les sols soient irrigués par les eaux usées, les eaux de oued Tafna et par les eaux de barrage de Hammam Boughrara, ainsi que probablement par l'utilisation des engrais et les pesticides.

La connaissance des teneurs totales en métaux lourds est nécessaire mais elle n'est cependant pas suffisante pour évaluer leur mobilité potentielle et les risques environnementaux qui en découlent. La prévision de ces risques est étroitement liée aux formes physico-chimiques sous lesquelles les métaux sont présents, c'est-à-dire à leur spéciation. L'étude de la spéciation des polluants métalliques apporte des informations sur leurs interactions avec la phase solide, et sur leurs forces de liaison avec cette dernière, donc sur leur mobilité.

I.2.2- Extraction séquentielle

Les résultats obtenus de l'analyse des teneurs totales en Cd, Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn et Cr par la méthode d'extraction séquentielle des sols S1, S2 et S3 dans les différentes saisons, de l'année 2006 jusqu'à 2010 sont classés dans les tableaux 31-75 et sont illustrés également sous forme d'histogrammes dans les figures (64-90):

Tableau 31: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'hiver de l'année 2006 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,11 ± 0,011	1,58 ± 0,03	0,51 ± 0,027	0,08 ± 0,005	1,50 ± 0,02	4,78
Cu	0,20 ± 0,017	1,15 ± 0,025	2,20 ± 0,01	4,31 ± 0,071	3 ± 0,53	11,86
Pb	0	15,25 ± 0,87	26,66 ± 1,52	2,10 ± 0,31	5 ± 0,58	50,01
Zn	1 ± 0,078	17,44 ± 1	375,21 ± 3,84	91,5 ± 2,18	205,33 ± 3,53	690,53
Ni	0,10 ± 0,02	0,33 ± 0,035	9,71 ± 0,50	0,42 ± 0,056	7,88 ± 0,71	18,44
Co	0,001 ± 0,001	0,13 ± 0,021	0,73 ± 0,03	0,11 ± 0,025	1,59 ± 0,20	2,56
Cr	3,16 ± 0,25	7,98 ± 0,64	15,79 ± 0,90	0,66 ± 0,015	2,08 ± 0,20	29,67
Mn	0,86 ± 0,062	10,32 ± 0,78	46,78 ± 1,61	0,18 ± 0,01	12,76 ± 0,82	70,90
Fe	1 ± 0,066	10,44 ± 0,80	10067,33 ± 15,33	189,66 ± 2,82	2123,77 ± 7,41	12392,20

MS: matière sèche

Tableau 32: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2006 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,05 ± 0,01	1,42±0,023	0,3 ± 0,04	0,06±0,004	1,28 ± 0,015	4,11
Cu	0,20 ± 0,0086	1,14 ± 0,11	2,83 ± 0,17	6,77 ± 0,67	4,5 ± 0,64	15,44
Pb	0	19,03±1,22	40 ± 1,78	7,33± 0,73	15,66 ± 0,91	82,02
Zn	1,23 ± 0,12	35,42±1,66	657,24± 4,55	231,97±3,6	478,24 ± 3,90	1404,1
Ni	0,15 ± 0,034	0,68±0,051	12,55 ± 0,80	0,72 ± 0,57	13 ± 0,86	27,10
Co	0,005 ± 0,001	0,51±0,067	1,7 ± 0,20	0,25±0,011	2,9 ± 0,33	5,36
Fe	1,01 ± 0,11	14,66±0,85	15089,23±1 ,4	365,33±3,7	5525,96±9,56	20996,19
Mn	2,66 ± 0,22	29,5 ± 1,60	82,77 ± 2	0,78 ± 0,05	49,46 ± 1,76	165,17
Cr	11,72 ± 0,81	6,26 ± 0,66	17,65 ± 1	2,97 ± 0,37	1,83 ± 0,19	40,43

Tableau 33: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2006 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,08 ± 0,01	1,90±0,19	0,70 ± 0,06	0,09 ± 0,008	1,60 ± 0,018	5,37
Cu	0,30± 0,027	0,25±0,02	0,94 ± 0,68	2 ± 0,20	14,50 ± 0,96	17,99
Pb	0	9,17±0,78	46,2 ± 1,80	8,5 ± 0,77	29,33 ± 1,58	93,20
Zn	1,50 ± 0,15	45 ± 1,55	282± 3,73	255 ± 3,55	933 ± 6,33	1516,50
Ni	0,23 ± 0,02	0,85±0,07	4,5 ± 0,50	0,92 ± 0,09	26,45 ± 1,57	32,95
Co	0,02 ± 0,002	0,50±0,05	2,33 ± 0,15	0,23 ± 0,03	1,81 ± 0,20	4,89
Fe	1,06 ± 0,12	16,02 ± 1	15166,23±18,70	371,14±3,96	5571,44±9,80	21125,89
Mn	1,93 ± 0,18	65,25±1,88	57,66 ± 1,80	0,55 ± 0,02	22,33 ± 1,23	147,72
Cr	19,22 ± 1,12	5,84 ± 0,60	21 ± 1,27	3,78 ± 0,44	2,11 ± 0,20	51,95

Tableau 34: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'hiver de l'année 2007 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,08 ± 0,13	2,72±0,26	0,68 ± 0,05	0,09±0,006	2,06 ± 0,21	6,63
Cu	0,21 ± 0,04	1,18±0,14	5,1 ± 0,56	8,03 ± 0,70	4,33 ± 0,58	18,85
Pb	0,33 ± 0,045	19,44±1,17	30,87 ± 1,60	7,85 ± 0,60	14,87 ± 0,90	73,36
Zn	2,02 ± 0,20	45,77±1,80	400 ± 3,98	202,33±3,48	397,34± 3,92	1047,46
Ni	0,38 ± 0,047	0,69 ± 0,05	16,5 ± 1,11	0,74 ± 0,058	7,04 ± 0,70	25,35
Co	0,08±0,0063	0,55±0,048	1,98 ± 0,19	0,62 ± 0,04	1,83 ± 0,18	5,06
Fe	1,01 ± 0,10	20,14±1,21	13987,22±16,8	342,33±3,50	5518,77±9,77	19869,47
Mn	1,88 ± 0,18	10,5 ± 0,75	68,66 ± 1,90	0,49 ± 0,042	27,89 ± 1,60	109,42
Cr	13,52 ± 0,95	4,44 ± 0,50	14,28 ± 0,98	2,35 ± 0,27	1,97 ± 0,19	36,56

Tableau 35: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2007 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,07 ± 0,13	2,61 ± 0,24	0,52 ± 0,048	0,08±0,0065	1,42 ± 0,15	5,70
Cu	0,21 ± 0,041	2,17 ± 0,20	4,97 ± 0,60	7,02 ± 0,70	4,84± 0,65	19,21
Pb	0,44 ± 0,055	31,27±1,67	43,88 ± 1,75	7,89 ± 0,73	17,66 ± 1,18	101,14
Zn	1,85 ± 0,19	49,77±1,90	721,9 ± 5,66	235,55±3,54	448,88± 4,23	1457,95
Ni	0,33 ± 0,046	0,85 ± 0,08	21,68 ± 1,37	0,79 ± 0,068	10,77 ± 0,78	34,42
Co	0,01 ± 0,001	0,76 ± 0,07	4,53 ± 0,60	0,93 ± 0,10	2,50 ± 0,39	8,73
Fe	1 ± 0,11	22,44±1,40	16987,39±19	486,88±4,66	5558,57±9,82	23056,28
Mn	2,98 ± 0,50	22,33±1,38	115,77± 2,28	0,89 ± 0,086	52,89 ± 1,89	194,86
Cr	19,55 ± 1,17	7,83 ± 0,76	20,37 ± 1,26	3,98 ± 0,55	2,21 ± 0,40	53,94

Tableau 36: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2007 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,076 ± 0,12	2,67±0,45	0,60 ± 0,064	0,089±0,0067	1,89 ± 0,17	6,32
Cu	0,33 ± 0,047	2,24±0,29	5,21 ± 0,65	8,51 ± 0,82	4,78 ± 0,63	21,07
Pb	0,55 ± 0,058	30,34±1,66	50,023± 1,82	8,45 ± 0,78	15,23 ± 0,90	104,59
Zn	2,67 ± 0,47	51,33±1,85	695,22± 4,95	279,11 ± 2,68	561,5 ± 4,77	1589,83
Ni	0,45 ± 0,049	0,97±0,097	23,87 ± 1,45	0,98 ± 0,098	10,33 ± 0,82	36,60
Co	0,011±0,0011	0,64±0,065	3,90 ± 0,50	0,77± 0,067	1,03 ± 0,10	6,35
Fe	1,12 ± 0,12	26,05±1,58	17166,66±20,1	491,17 ± 4,75	5571,31±9,88	23256,31
Mn	2,32 ± 0,35	24,13±1,50	82,44 ± 1,88	0,70 ± 0,068	44,55 ± 1,76	154,14
Cr	20,15 ± 1,20	5,07 ± 0,60	24,95 ± 1,52	4,27 ± 0,55	2,53 ± 0,40	56,97

Tableau 37: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'hiver de l'année 2008 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,45 ± 0,14	1,74 ± 0,17	0,91 ± 0,09	1,73 ± 0,17	1,07 ± 0,10	6,90
Cu	1,08 ± 0,10	1,07 ± 0,10	10 ± 0,79	13,09±0,85	0,25 ± 0,87	24,49
Pb	10 ± 0,70	17,85±1,18	30,24 ± 1,67	8,82 ± 0,65	7 ± 0,67	73,91
Zn	35 ± 1,71	83,67 ± 1,90	1959,44±6,50	45,29 ± 1,76	300,25±3,77	2423,65
Ni	2,50 ± 0,42	6,88 ± 0,62	28,77 ± 1,65	1,58 ± 0,16	10,87 ± 0,80	50,6
Co	1,50 ± 0,15	2,08 ± 0,21	30,47 ± 1,69	1,35 ± 0,13	15,82 ± 0,97	51,22
Fe	7,5 ± 0,68	12,24 ± 0,83	18611,55± 22	108,82±1,96	1178,7± 6	19918,81
Mn	0,25 ± 0,042	14,79 ± 0,94	106,05±1,95	0,29 ± 0,046	34,25 ± 1,73	155,63
Cr	16,5 ± 1	12,5 ± 0,84	9,62 ± 0,69	10,58 ± 0,85	7 ± 0,67	56,23

Tableau 38: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2008 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle)

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,27 ± 0,13	1,94 ± 0,19	1,05 ± 0,10	0,67 ± 0,065	0,53 ± 0,055	5,46
Cu	1,85 ± 0,18	23,68 ± 1,48	22,22 ± 1,41	200 ± 3,44	12,62 ± 0,85	260,37
Pb	10,5 ± 0,72	37,89 ± 1,73	53,33 ± 1,80	0,29 ± 0,043	9,06 ± 0,63	111,07
Zn	6,25 ± 0,61	105 ± 1,98	1965,27 ± 6,54	285 ± 3,64	730,31 ± 5	3091,83
Ni	0,25 ± 0,041	10 ± 0,70	36,66 ± 1,72	10,41 ± 0,71	16,68 ± 1,16	72
Co	4 ± 0,51	7,10 ± 0,67	50,55 ± 1,78	8,52 ± 0,69	20 ± 1,14	90,17
Fe	8,25 ± 0,67	27,36 ± 1,57	20583,33 ± 24	675 ± 4,84	2300 ± 6,90	23593,94
Mn	6,56 ± 0,60	17,10 ± 1,17	112,77 ± 2,18	7,35 ± 0,68	60,15 ± 1,78	203,93
Cr	9 ± 0,68	10,42 ± 0,71	19,05 ± 1,19	0,29 ± 0,043	17,90 ± 1,18	57,66

Tableau 39: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2008 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,95 ± 0,52	1 ± 0,10	0,91 ± 0,09	0,61 ± 0,064	1 ± 0,10	6,41
Cu	2,25 ± 0,27	54,47 ± 1,78	105,55 ± 1,94	219,70 ± 3,48	19,90 ± 1,19	401,87
Pb	8,5 ± 0,68	31,05 ± 1,70	54,72 ± 1,78	17,06 ± 1,10	13,47 ± 0,88	124,80
Zn	7,25 ± 0,67	444,73 ± 4,60	2637,5 ± 6,93	25,58 ± 1,55	1289,21 ± 6,50	4404,27
Ni	2,35 ± 0,35	11,47 ± 0,80	39,44 ± 1,78	12,18 ± 0,81	18,58 ± 1,18	84,02
Co	2,75 ± 0,45	6,50 ± 0,64	40,22 ± 1,74	5,64 ± 0,62	19,63 ± 0,19	74,74
Fe	1,85 ± 0,18	46,05 ± 1,76	27166,66 ± 26	691,17 ± 4,94	8571,31 ± 9,21	36477,04
Mn	3,25 ± 0,45	14,21 ± 0,90	112,5 ± 2,10	0,76 ± 0,06	50,31 ± 1,71	181,03
Cr	23,25 ± 1,44	13,15 ± 0,85	23,61 ± 1,45	4,70 ± 0,55	2,81 ± 0,49	67,52

Tableau 40: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'hiver de l'année 2009 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,95 ± 0,52	2,94 ± 0,51	0,98 ± 0,09	0,08 ± 0,0065	1,97 ± 0,19	8,92
Cu	2,73 ± 0,47	49,78 ± 1,67	137,95 ± 2,28	198,95 ± 3,10	17,9 ± 1,17	407,31
Pb	0,17 ± 0,001	27,39 ± 1,50	30,33 ± 1,62	5,22 ± 0,60	9,55 ± 0,68	72,66
Zn	2,33 ± 0,25	94,88 ± 1,92	2504,66 ± 6,75	15,27 ± 0,95	478,46 ± 4,62	3095,60
Ni	1,93 ± 0,19	10,79 ± 0,73	42,24 ± 1,64	11,33 ± 0,79	19 ± 1,19	85,29
Co	1,05 ± 0,10	13,45 ± 0,83	50 ± 1,68	14,77 ± 0,92	26,27 ± 1,57	105,54
Fe	2,35 ± 0,35	31,77 ± 1,55	23654,25 ± 25,35	700,54 ± 5,18	7675,66 ± 10	32064,57
Mn	0,82 ± 0,08	11,48 ± 0,84	68,15 ± 1,74	0,56 ± 0,05	50 ± 1,70	131,01
Cr	6,44 ± 0,62	9,87 ± 0,70	17,55 ± 1,17	2,33 ± 0,33	11,25 ± 0,82	47,44

Tableau 41: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2009 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,16 ± 0,20	2,55 ± 0,42	0,65 ± 0,062	0,10 ± 0,01	1,03 ± 0,10	6,59
Cu	1,98 ± 0,19	60,66 ± 1,71	141,55 ± 2,32	255,33 ± 3,55	20,21 ± 1,20	479,73
Pb	0,88 ± 0,08	30,77 ± 1,54	51,98 ± 1,72	17,50 ± 1,17	15 ± 0,98	116,13
Zn	3,66 ± 0,56	345,89 ± 3,80	2768,44 ± 6,82	27,96 ± 1,50	1298,77 ± 6,50	4444,72
Ni	1,89 ± 0,18	17 ± 1,17	55 ± 1,73	18,66 ± 1,18	27 ± 1,50	119,55
Co	3,90 ± 0,58	20,33 ± 1,20	83,77 ± 1,87	21,50 ± 1,25	45,45 ± 1,65	174,95
Fe	1,99 ± 0,19	40,77 ± 1,60	28453,55 ± 25,8	467,88 ± 4,60	8654,43 ± 9,50	37618,62
Mn	1,90 ± 0,185	29,65 ± 1,51	147,33 ± 2,34	1,80 ± 0,18	65,78 ± 1,73	246,46
Cr	10,43 ± 0,72	10,37 ± 0,70	20,58 ± 1,21	4,97 ± 0,59	13,38 ± 0,85	59,73

Tableau 42: Les teneurs des métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2009 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,34 ± 0,35	2,79 ± 0,45	0,72 ± 0,071	0,17 ± 0,013	1,20 ± 0,12	7,22
Cu	3,54 ± 0,56	65,76 ± 1,73	150,79 ± 2,35	268,44 ± 3,59	25,11 ± 1,49	513,64
Pb	12,7 ± 0,74	35,33 ± 1,54	50,55 ± 1,70	19 ± 1,19	16,5 ± 1,16	134,08
Zn	4,56 ± 0,57	467,34 ± 4,60	2800,5 ± 6,90	30,11 ± 1,51	1302,33 ± 6,58	4604,84
Ni	2,56 ± 0,43	16,55 ± 1,16	61 ± 1,74	17,23 ± 1,17	27,01 ± 1,48	124,35
Co	3,10 ± 0,49	16,13 ± 1,16	65,45 ± 1,74	17,4 ± 1,17	28,23 ± 1,50	130,31
Fe	2,56 ± 0,43	48 ± 1,66	29000,24 ± 26	773,5 ± 5,31	9003,11 ± 9,9	38827,41
Mn	1,58 ± 0,16	28,67 ± 1,50	120,35 ± 2,21	0,98 ± 0,09	57,89 ± 1,73	209,47
Cr	10 ± 0,70	14,78 ± 0,93	29 ± 1,50	5,89 ± 0,63	13,55 ± 0,78	73,22

Tableau 43: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'hiver de l'année 2010 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,80 ± 0,45	3,44 ± 0,50	0,98 ± 0,09	0,89 ± 0,087	1,33 ± 0,13	9,44
Cu	2,12 ± 0,20	28,77 ± 1,50	102,35 ± 2,10	218,10 ± 3,48	21,55 ± 1,25	372,89
Pb	0,11 ± 0,01	32,64 ± 1,53	36 ± 1,55	7,42 ± 0,64	12,88 ± 0,75	89,05
Zn	2,22 ± 0,21	218,77 ± 3,50	2000 ± 6,55	20,45 ± 1,20	1298,45 ± 6,50	3539,89
Ni	2,32 ± 0,23	19 ± 1,19	62,15 ± 1,76	20,96 ± 1,21	30,48 ± 1,52	134,91
Co	3,63 ± 0,51	25,27 ± 1,45	88,79 ± 1,80	25,52 ± 1,41	39,81 ± 1,60	183,02
Fe	1,52 ± 0,15	50 ± 1,68	20976,28 ± 24	543,80 ± 4,90	6345,33 ± 7,86	27916,93
Mn	1,35 ± 0,13	13,84 ± 0,79	113,21 ± 2,11	1,45 ± 0,14	55,76 ± 1,72	185,61
Cr	7,43 ± 0,64	9,66 ± 0,91	19,25 ± 1,19	5,35 ± 0,55	10 ± 0,70	51,69

Tableau 44: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2010 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg/kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,41 ± 0,28	2,51 ± 0,42	0,61 ± 0,06	0,57 ± 0,05	0,93 ± 0,09	7,03
Cu	3,45 ± 0,50	60,50 ± 1,73	137,72 ± 2,25	234,31 ± 3,2	25,87 ± 1,45	461,85
Pb	10,13 ± 0,71	30,89 ± 1,52	51,52 ± 1,69	18,58 ± 1,18	18,93 ± 1,18	130,05
Zn	4,56 ± 0,53	479,95 ± 4,63	2800,33 ± 6,90	30,47 ± 1,51	1300,72 ± 6,55	4616,03
Ni	2,64 ± 0,43	24,33 ± 1,41	71 ± 1,78	25,66 ± 1,45	36 ± 1,57	159,63
Co	4,26 ± 0,52	22,94 ± 1,22	100,37 ± 2	24,50 ± 1,45	55,77 ± 1,70	208,04
Fe	2,48 ± 0,41	50,67 ± 1,68	28921,26 ± 25,7	700 ± 5,20	8278,65 ± 9,50	37953,06
Mn	1,90 ± 0,19	28,55 ± 1,50	146,36 ± 2,30	1,97 ± 0,19	65,80 ± 1,77	244,58
Cr	15,74 ± 0,97	14,97 ± 0,98	23,49 ± 1,35	6,44 ± 0,60	11,88 ± 0,73	72,52

Tableau 45: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2010 du sol S1 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,90 ± 0,47	2,60 ± 0,43	0,65 ± 0,063	0,75 ± 0,07	1,23 ± 0,22	8,13
Cu	3,61 ± 0,51	68,33 ± 1,73	160,46 ± 2,45	270,25 ± 3,6	31 ± 1,50	533,65
Pb	13,33 ± 0,88	38,77 ± 1,55	55,21 ± 1,70	22,67 ± 1,23	19,45 ± 1,19	149,43
Zn	4,75 ± 0,55	488,55 ± 4,65	2846,11 ± 6,95	32,63 ± 1,50	1318,52 ± 6,56	4690,56
Ni	2,72 ± 0,45	25,24 ± 1,43	88 ± 1,83	28 ± 1,48	42,66 ± 1,62	186,62
Co	3,90 ± 0,54	20,77 ± 1,20	75,55 ± 1,79	21 ± 1,20	30,33 ± 1,50	151,55
Fe	2,66 ± 0,44	54,33 ± 1,69	29785,44 ± 26,3	790,26 ± 5,42	9102,55 ± 9,73	39735,24
Mn	1,72 ± 0,17	20,11 ± 1,20	125,44 ± 2,20	1,66 ± 0,16	69,22 ± 1,76	218,15
Cr	16,5 ± 1,16	15,33 ± 0,90	25,22 ± 1,43	7 ± 0,65	14,95 ± 0,88	79

Tableau 46: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'automne de l'année 2006 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,02 ± 0,10	1,94 ± 0,19	0,57 ± 0,05	0,11 ± 0,01	1,66 ± 0,16	5,30
Cu	0,13 ± 0,01	1,10 ± 0,10	1,72 ± 0,17	4,28 ± 0,53	2,19 ± 0,20	9,42
Pb	0,07 ± 0,007	15,73 ± 0,96	38,88 ± 1,55	7,12 ± 0,65	8,54 ± 0,74	77,27
Zn	9,97 ± 0,68	89,21 ± 1,85	872,50 ± 5,60	30,47 ± 1,50	597,33 ± 5	1599,48
Ni	0,10 ± 0,01	0,41 ± 0,041	10,84 ± 0,70	0,42 ± 0,04	17,66 ± 1,17	29,43
Co	0,001 ± 0,0001	0,44 ± 0,043	1,47 ± 0,14	0,73 ± 0,07	2,89 ± 0,46	5,53
Fe	4,78 ± 0,56	16,49 ± 1,16	17168,58 ± 20,21	161,29 ± 2,40	2000 ± 6,55	19351,14
Mn	5,15 ± 0,60	9,28 ± 0,68	40,77 ± 1,60	1,86 ± 0,18	37,80 ± 1,54	94,86
Cr	3,19 ± 0,48	6,63 ± 0,62	16,25 ± 1,16	0,82 ± 0,08	5,84 ± 0,63	32,73

Tableau 47: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2006 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,68 ± 0,06	1,20 ± 0,12	0,24 ± 0,02	0,01 ± 0,001	1 ± 0,1	3,13
Cu	0,18 ± 0,017	1,14 ± 0,14	1,76 ± 0,17	5,45 ± 0,60	1,66 ± 0,16	10,19
Pb	0,09 ± 0,009	18,54 ± 1,18	47,63 ± 1,49	5,98 ± 0,61	11,95 ± 0,73	84,19
Zn	7,98 ± 0,66	18 ± 1,18	793,22 ± 5,43	18,65 ± 0,18	495,77 ± 4,78	1333,62
Ni	0,25 ± 0,022	1 ± 0,10	15,94 ± 1,15	0,04 ± 0,004	19,66 ± 1,19	36,89
Co	0,01 ± 0,001	0,61 ± 0,06	3,63 ± 0,52	0,03 ± 0,003	2,77 ± 0,44	7,05
Fe	5,25 ± 0,59	27,83 ± 1,4	17298,74 ± 20,30	195,66 ± 3,43	2089,95 ± 6,60	19617,43
Mn	6,89 ± 0,64	19,90 ± 1,19	61,77 ± 1,73	4,43 ± 0,54	56,88 ± 1,69	149,87
Cr	3,27 ± 0,49	6,55 ± 0,62	20 ± 1,20	0,98 ± 0,09	6,44 ± 0,62	37,24

Tableau 48: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2006 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,02 ± 0,002	0,70 ± 0,06	0,50 ± 0,045	0,04 ± 0,003	3,40 ± 0,55	4,66
Cu	0,27 ± 0,02	0,21 ± 0,01	0,93 ± 0,08	1,88 ± 0,15	10,43 ± 0,65	13,72
Pb	0,12 ± 0,01	19,50 ± 1,19	52,34 ± 1,60	6,90 ± 0,64	13,77 ± 0,93	92,63
Zn	9,88 ± 0,83	22,45 ± 1,28	842,11 ± 5,44	22,25 ± 1,28	514,33 ± 4,90	1411,02
Ni	0,23 ± 0,02	0,90 ± 0,09	5,40 ± 0,57	9 ± 0,80	24,66 ± 1,42	40,19
Co	0,01 ± 0,001	0,66 ± 0,06	4,77 ± 0,52	1 ± 0,1	2,21 ± 0,50	8,65
Fe	5 ± 0,58	20,33 ± 1,20	17234,64 ± 20,40	184,44 ± 3,39	2029,88 ± 6,55	19474,29
Mn	5,77 ± 0,59	13,66 ± 0,79	50 ± 1,60	2,17 ± 0,21	42,27 ± 1,55	113,87
Cr	3,55 ± 0,50	6,83 ± 0,63	20,38 ± 0,20	1 ± 0,10	6,61 ± 0,63	38,37

Tableau 49: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'automne de l'année 2007 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,03 ± 0,10	1,92 ± 0,19	0,70 ± 0,07	0,05 ± 0,005	1,78 ± 0,17	5,48
Cu	0,36 ± 0,031	13,93 ± 0,85	22,67 ± 1,24	40,87 ± 1,54	10,44 ± 0,70	88,27
Pb	0,24 ± 0,023	19,34 ± 1,19	45 ± 1,56	4,82 ± 0,55	9,77 ± 0,68	79,17
Zn	10,07 ± 0,65	43,33 ± 1,58	908,86 ± 5,70	40 ± 1,54	601,35 ± 4,60	1603,61
Ni	1,87 ± 0,18	5,45 ± 0,57	35,78 ± 1,53	7,29 ± 0,65	17,43 ± 1,17	67,82
Co	3,10 ± 0,48	5,28 ± 0,57	30 ± 1,50	7,83 ± 0,65	15,28 ± 1	61,49
Fe	4,88 ± 0,55	19,63 ± 1,19	18700,23 ± 21	170,15 ± 3,17	2198,66 ± 6,57	21093,45
Mn	6,23 ± 0,62	10,88 ± 0,70	38,98 ± 1,53	10,52 ± 0,70	28,64 ± 1,48	95,25
Cr	3,90 ± 0,53	9,75 ± 0,68	20,14 ± 1,20	2,56 ± 0,44	8 ± 0,66	44,35

Tableau 50: Les teneurs en métaux lourds dans la saison du printemps de l'année 2007 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg/kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,31 ± 0,03	1,41 ± 0,14	0,40 ± 0,042	0,02 ± 0,002	1,11 ± 0,10	3,25
Cu	0,43 ± 0,04	13,88 ± 0,86	20 ± 1,20	47,44 ± 1,58	8,33 ± 0,66	90,08
Pb	0,29 ± 0,027	27,67 ± 1,47	48,42 ± 1,58	6,77 ± 0,62	5,54 ± 0,59	88,89
Zn	8,65 ± 0,67	20,18 ± 1,2	819,66 ± 5,44	25,27 ± 1,47	534,18 ± 4,45	1407,94
Ni	2,76 ± 0,44	8,44 ± 0,67	41,62 ± 1,54	8,55 ± 0,67	19,87 ± 1,19	81,24
Co	3,89 ± 0,53	6,93 ± 0,65	34,41 ± 1,51	9,77 ± 0,69	16,66 ± 1,16	71,66
Fe	5,87 ± 0,50	28,73 ± 1,49	18794,50 ± 21	210 ± 3,48	2226,93 ± 6,58	21266,03
Mn	7,88 ± 0,65	11,65 ± 0,71	59,75 ± 1,70	18,32 ± 1,18	39,66 ± 1,53	137,26
Cr	5,76 ± 0,59	10,55 ± 0,70	34,90 ± 1,51	4 ± 0,53	10,14 ± 0,70	65,35

Tableau 51: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2007 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,02 ± 0,10	1,65 ± 0,16	0,62 ± 0,06	0,04 ± 0,004	1,44 ± 0,14	4,77
Cu	0,50 ± 0,050	13 ± 0,80	25,33 ± 1,45	51 ± 1,60	10,69 ± 0,70	99,52
Pb	0,32 ± 0,03	25,85 ± 1,45	50,22 ± 1,60	7 ± 0,65	10,37 ± 0,70	93,76
Zn	8,97 ± 0,67	26,66 ± 1,46	820 ± 5,40	26,44 ± 1,45	548,21 ± 4,47	1430,28
Ni	2 ± 0,20	6,77 ± 0,63	37,32 ± 1,52	6,85 ± 0,64	17,89 ± 1,17	70,83
Co	3,94 ± 0,54	7,76 ± 0,65	38,21 ± 1,53	10,44 ± 0,70	18,66 ± 1,18	79,01
Fe	5,28 ± 0,56	22,44 ± 1,23	18754,56 ± 21	195,27 ± 3,47	2214,88 ± 6,58	21192,43
Mn	7 ± 0,65	3,96 ± 0,54	49,18 ± 1,60	10,6 ± 0,70	30,79 ± 1,50	119,65
Cr	4,14 ± 0,54	8,26 ± 0,66	26,22 ± 1,45	2,71 ± 0,20	8,33 ± 0,66	49,66

Tableau 52: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'automne de l'année 2008 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg (ppm) de MS (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,70 ± 0,17	2,32 ± 0,43	0,55 ± 0,05	0,14 ± 0,011	1,30 ± 0,13	6,02
Cu	1,5 ± 0,15	3,94 ± 0,54	20,25 ± 0,20	49,37 ± 1,50	20,70 ± 1,20	95,76
Pb	0,75 ± 0,071	28 ± 1,47	43,25 ± 1,54	0,50 ± 0,05	12 ± 0,81	84,50
Zn	66,25 ± 1,74	14,5 ± 0,96	1083,25 ± 6,50	88 ± 1,83	387,5 ± 3,80	1639,5
Ni	2,50 ± 0,45	10,25 ± 0,70	39,5 ± 1,53	11,75 ± 0,72	16,55 ± 1,16	80,55
Co	6,75 ± 0,63	5,07 ± 0,55	36,75 ± 1,52	7,75 ± 0,65	18,7 ± 1,18	75,02
Fe	4,78 ± 0,55	20,55 ± 1,20	17245,15 ± 20,40	200,25 ± 3,48	2786,12 ± 0,50	20256,85
Mn	14 ± 0,95	12,75 ± 0,83	87 ± 1,83	1,27 ± 0,25	50,15 ± 1,60	165,17
Cr	2,25 ± 0,43	7,65 ± 0,65	28,54 ± 1,48	1,87 ± 0,18	10,13 ± 0,70	50,44

Tableau 53: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2008 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,47 ± 0,04	1,68 ± 0,16	0,39 ± 0,04	0,5 ± 0,05	0,41 ± 0,04	3,45
Cu	0,25 ± 0,02	17,9 ± 1,17	42,77 ± 1,53	71 ± 1,76	26,11 ± 1,47	158,02
Pb	3,25 ± 0,53	30,1 ± 1,50	43,33 ± 1,53	0,42 ± 0,04	18,25 ± 1,18	95,35
Zn	18,8 ± 1,18	26,8 ± 1,46	626,66 ± 4,61	14,5 ± 0,95	456,9 ± 4,61	1143,62
Ni	1,42 ± 0,14	12,4 ± 0,80	45,55 ± 1,54	13,5 ± 0,83	19,6 ± 1,19	92,47
Co	1,42 ± 0,14	8,8 ± 0,66	43,44 ± 1,53	11 ± 0,71	20 ± 1,20	84,66
Fe	5 ± 0,56	28,7 ± 1,48	20333,3 ± 22,5	306,8 ± 3,70	2202 ± 6,58	22875,81
Mn	14 ± 0,95	19,5 ± 1,19	117,77 ± 2,11	7 ± 0,65	35,25 ± 1,52	193,49
Cr	4,75 ± 0,55	10,3 ± 0,70	33,27 ± 1,51	2,75 ± 0,45	18,27 ± 1,18	69,3

Tableau 54: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2008 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,36 ± 0,035	2,73 ± 0,45	0,70 ± 0,065	0,10 ± 0,01	1 ± 0,20	4,89
Cu	1,50 ± 0,15	16,23 ± 1,15	48,41 ± 1,57	83,57 ± 1,80	20,11 ± 1,20	169,82
Pb	0,25 ± 0,02	27,89 ± 1,48	50 ± 1,60	9,12 ± 0,68	12,45 ± 0,81	99,71
Zn	9,05 ± 0,68	30,67 ± 1,50	835,01 ± 5,42	30,22 ± 1,50	565,23 ± 4,63	1470,18
Ni	3,55 ± 0,53	11,33 ± 0,72	40,56 ± 1,52	11,44 ± 0,72	18,68 ± 1,18	85,56
Co	3,65 ± 0,54	13,98 ± 0,85	50,11 ± 1,60	15,45 ± 1	22,67 ± 1,31	105,86
Fe	7,01 ± 0,64	25,45 ± 1,46	20000,67 ± 22,3	200,55 ± 3,48	2309,12 ± 6,59	22542,8
Mn	10,12 ± 0,70	10,23 ± 0,70	64 ± 1,73	3,5 ± 0,53	58,23 ± 1,68	146,08
Cr	4,96 ± 0,55	9,34 ± 0,68	29,33 ± 1,49	2,12 ± 0,20	10,56 ± 0,70	56,31

Tableau 55: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'automne de l'année 2009 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,06 ± 0,10	1,93 ± 0,19	0,95 ± 0,094	0,27 ± 0,025	1,98 ± 0,19	06,19
Cu	1,25 ± 0,12	16,28 ± 1,16	42,77 ± 1,52	72,37 ± 1,77	22,96 ± 1,23	155,63
Pb	0,40 ± 0,04	27,89 ± 1,47	54,33 ± 1,62	8,44 ± 0,67	15,74 ± 1	106,8
Zn	18,63 ± 1,18	59,75 ± 1,68	997 ± 5,60	59,15 ± 1,68	589,39 ± 4,95	1723,92
Ni	3,50 ± 0,52	12,38 ± 0,80	41,46 ± 1,53	13,93 ± 0,87	19 ± 1,19	90,27
Co	3,35 ± 0,52	10 ± 0,70	42,77 ± 1,53	14,48 ± 0,95	20,62 ± 1,20	91,22
Fe	8,14 ± 0,66	20,52 ± 1,20	21000,81 ± 22,40	228,65 ± 3,50	2326 ± 6,60	23584,12
Mn	10,19 ± 0,70	14,28 ± 0,95	80,32 ± 1,81	5,45 ± 0,56	61,87 ± 1,70	172,11
Cr	7,43 ± 0,65	6,55 ± 0,62	23,70 ± 1,37	4,97 ± 0,53	14,14 ± 0,95	56,79

Tableau 56: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2009 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,04 ± 0,10	1,77 ± 0,17	0,70 ± 0,07	0,12 ± 1,011	1,48 ± 0,14	5,11
Cu	1,75 ± 0,17	26,80 ± 1,45	49,55 ± 1,60	88 ± 1,77	20,65 ± 1,20	186,75
Pb	0,50 ± 0,05	29,71 ± 1,50	72,96 ± 1,76	9,89 ± 0,68	12,77 ± 0,80	125,83
Zn	14,84 ± 0,95	40,76 ± 1,53	945,81 ± 5,70	45,33 ± 1,54	516,15 ± 4,40	1562,89
Ni	3,90 ± 0,52	15,85 ± 1	50,18 ± 1,60	16,14 ± 1,16	25,77 ± 1,46	111,84
Co	4,26 ± 0,53	12 ± 0,80	45,28 ± 1,54	15,77 ± 1	23,92 ± 1,33	101,23
Fe	10,96 ± 0,70	38,81 ± 1,52	21094,33 ± 22,50	263,29 ± 3,55	2358,93 ± 6,61	23766,32
Mn	18,92 ± 1,18	25,76 ± 1,42	89,85 ± 1,84	10,64 ± 0,70	78,77 ± 1,79	223,94
Cr	3,42 ± 0,52	10 ± 0,70	31,33 ± 1,50	2,94 ± 0,45	28,81 ± 1,49	76,50

Tableau 57: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2009 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,05 ± 0,10	1,85 ± 0,18	0,82 ± 0,08	0,16 ± 0,016	1,57 ± 0,15	5,45
Cu	1,79 ± 0,17	26,95 ± 1,46	56,32 ± 1,65	90,43 ± 1,80	21 ± 1,20	196,49
Pb	0,53 ± 0,05	29,77 ± 1,50	78,44 ± 1,73	11,50 ± 0,72	15,96 ± 1	136,2
Zn	15 ± 1	147,88 ± 2,31	850,33 ± 5,43	47,55 ± 1,54	520,27 ± 4,40	1581,03
Ni	3,33 ± 0,51	13,66 ± 0,86	45,93 ± 1,54	15,73 ± 1	22 ± 1,20	100,65
Co	5,23 ± 0,55	17,55 ± 1,17	49,95 ± 1,60	19,88 ± 1,19	28,77 ± 1,48	121,38
Fe	9,82 ± 0,68	29,77 ± 1,50	21088,27 ± 22,50	245,77 ± 3,53	2348,85 ± 6,60	23722,48
Mn	11,73 ± 0,72	27,78 ± 1,47	84,44 ± 1,80	6,22 ± 0,62	59,88 ± 1,70	190,05
Cr	6,50 ± 0,63	11,33 ± 0,72	37,91 ± 1,52	4,88 ± 0,55	19,47 ± 1,19	80,09

Tableau 58: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'automne de l'année 2010 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,09 ± 0,10	2,94 ± 0,50	1,18 ± 0,18	0,47 ± 0,046	2,07 ± 0,20	7,75
Cu	1,26 ± 0,27	25,77 ± 1,46	52,84 ± 1,60	88,55 ± 1,77	23,42 ± 1,22	191,84
Pb	0,60 ± 0,06	26,43 ± 1,46	78,25 ± 1,78	10 ± 0,10	10,11 ± 0,70	125,39
Zn	29,87 ± 1,50	89,50 ± 1,77	976,44 ± 5,72	68,33 ± 1,74	600,02 ± 5,20	1764,16
Ni	3,48 ± 0,51	16,24 ± 1,16	47,17 ± 1,55	17,27 ± 1,17	23,59 ± 1,30	107,75
Co	4 ± 0,54	17,44 ± 1,17	48,51 ± 1,55	20,29 ± 1,20	25,96 ± 1,46	116,20
Fe	9,21 ± 0,66	30,66 ± 1,50	21061,19 ± 22,50	232,33 ± 3,52	2340 ± 6,60	23673,39
Mn	10,17 ± 0,70	29,78 ± 1,50	70,55 ± 1,74	6,63 ± 0,63	50,10 ± 1,60	167,23
Cr	6,44 ± 0,63	14,73 ± 0,95	40 ± 1,54	4,16 ± 0,54	18,65 ± 1,18	83,98

Tableau 59: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2010 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,07 ± 0,10	1,85 ± 0,18	0,81 ± 0,08	0,17 ± 0,01	1,80 ± 0,18	5,70
Cu	1,84 ± 0,18	27,04 ± 1,46	64,77 ± 1,72	98,55 ± 1,94	26,83 ± 1,46	219,03
Pb	0,70 ± 0,07	34,78 ± 1,51	82,5 ± 1,79	16,44 ± 1,16	20,16 ± 1,20	154,58
Zn	19,26 ± 1,19	50,77 ± 1,60	958,90 ± 5,70	50,28 ± 1,60	573,50 ± 4,50	1652,71
Ni	5,14 ± 0,55	17,75 ± 1,17	56,33 ± 1,73	19,67 ± 1,19	27,86 ± 1,47	126,75
Co	5,10 ± 0,55	18 ± 1,18	58,77 ± 1,68	22,34 ± 1,20	30,25 ± 1,50	134,46
Fe	11,10 ± 0,72	35,23 ± 1,51	21125,66 ± 22,60	264,77 ± 3,57	2370,48 ± 6,61	23807,24
Mn	30,55 ± 1,50	27,33 ± 1,47	124,68 ± 2,28	14,75 ± 0,95	79,77 ± 1,80	277,08
Cr	6,47 ± 0,63	17,33 ± 1,17	44,15 ± 1,55	5,39 ± 0,56	25 ± 1,40	98,34

Tableau 60: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2010 du sol S2 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,08 ± 0,10	1,98 ± 0,19	0,96 ± 0,095	0,20 ± 0,02	1,94 ± 0,19	6,16
Cu	1,90 ± 0,19	27,16 ± 1,47	67,51 ± 1,74	100,22 ± 2	28 ± 1,48	224,79
Pb	0,78 ± 0,07	38,95 ± 1,52	89,77 ± 1,85	18,33 ± 1,18	20,24 ± 1,20	168,07
Zn	21,18 ± 1,21	56,32 ± 1,63	962,88 ± 5,70	59,28 ± 1,70	591 ± 4,50	1690,66
Ni	4,77 ± 0,54	15,33 ± 1	52,29 ± 1,61	17,55 ± 1,17	24,50 ± 1,39	114,44
Co	6,88 ± 0,63	20,12 ± 1,20	65,38 ± 1,73	24,55 ± 1,39	32,26 ± 1,50	149,19
Fe	10 ± 0,70	34,33 ± 1,50	21095,46 ± 22,5	253,29 ± 3,55	2357,21 ± 6,61	23750,29
Mn	14,28 ± 0,95	26,24 ± 1,46	99,77 ± 2	9,50 ± 0,69	67,33 ± 1,74	217,12
Cr	7,88 ± 0,65	18,56 ± 1,18	46,77 ± 1,53	6,26 ± 0,63	27,33 ± 1,47	106,8

Tableau 61: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'automne de l'année 2006 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,50 ± 0,05	1,59 ± 0,15	0,40 ± 0,04	0,73 ± 0,07	1,07 ± 0,10	4,29
Cu	0,10 ± 0,01	2,13 ± 0,22	2,02 ± 0,20	4,95 ± 0,55	2,33 ± 0,40	11,53
Pb	0,48 ± 0,048	25,86 ± 1,45	49,77 ± 1,60	5,33 ± 0,56	10,64 ± 0,70	92,08
Zn	5,11 ± 0,55	95,66 ± 1,96	350,55 ± 3,70	40 ± 1,54	235,33 ± 3,50	726,65
Ni	0,04 ± 0,004	0,78 ± 0,07	8,87 ± 0,66	0,52 ± 0,05	10,46 ± 0,70	20,67
Co	00	0,23 ± 0,02	0,78 ± 0,07	0,07 ± 0,007	1,98 ± 0,20	3,06
Fe	2 ± 0,20	10,16 ± 0,70	10786,54 ± 15,20	119,66 ± 2,18	1462,33 ± 6,50	11680,69
Mn	3,20 ± 0,51	17,94 ± 1,17	91,77 ± 1,94	2,94 ± 0,48	34,90 ± 1,51	150,75
Cr	1,23 ± 0,24	5,96 ± 0,62	10,62 ± 0,70	0,90 ± 0,09	8,42 ± 0,67	27,13

Tableau 62: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2006 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,42 ± 0,041	1,29 ± 1,34	0,20 ± 0,02	0,15 ± 0,016	0,92 ± 0,091	2,98
Cu	0,20 ± 0,02	3,23 ± 0,51	5,65 ± 0,62	11,51 ± 0,72	3±0,50	23,59
Pb	0,17 ± 0,017	13,82 ± 0,90	34,46 ± 1,51	2,93 ± 0,49	5,95 ± 0,61	57,33
Zn	2,90 ± 0,49	69,78 ± 1,74	325,33± 3,60	30,44 ± 1,50	200,67± 3,47	629,12
Ni	0,20 ± 0,020	1,79 ± 0,17	16,83 ± 1,16	0,78± 0,077	10,67 ± 0,70	30,27
Co	0,55 ± 0,052	0,93 ± 0,09	1,86 ± 0,18	0,094±0,0093	2,85 ± 0,49	6,28
Fe	2,78 ± 0,45	17,52 ± 1,17	11008,45±16	175,44 ± 3,18	1500,33±6,51	12704,52
Mn	3,72 ± 0,51	20,22 ± 1,20	100,33 ± 2	7,50 ± 0,65	50,18 ± 1,60	181,95
Cr	1,44 ± 0,14	5,92 ± 0,62	18,77 ± 1,18	0,98 ± 0,097	10,66 ± 0,70	37,77

Tableau 63: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2006 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,062 ± 0,006	1,43 ± 0,14	0,28 ± 0,027	0,60 ± 0,06	0,70 ± 0,07	3,34
Cu	0,18 ± 0,017	1,16 ± 0,16	3,30 ± 0,50	6,16 ± 0,62	3,5 ± 0,51	14,30
Pb	0,15 ± 0,015	13,75 ± 0,87	34,35 ± 1,50	2,80 ± 0,47	5,8 ± 0,61	56,85
Zn	3,08 ± 0,48	73,17 ± 1,75	332,75± 3,60	34,52 ± 1,50	216,17± 3,49	659,69
Ni	0,10 ± 0,01	1,27 ± 0,30	15,17 ± 1	0,67 ± 0,067	10,97 ± 0,70	28,18
Co	00	0,31 ± 0,03	0,94 ± 0,092	0,086± 0,009	2,11 ± 0,21	3,44
Fe	2,05 ± 0,20	11,23 ± 0,72	10000,33±15	128,78± 2,28	1487,46±6,48	11629,85
Mn	3,11 ± 0,49	17,67 ± 1,17	91,43 ± 1,93	2,89± 0,47	34,77 ± 1,50	149,87
Cr	1 ± 0,010	5,84± 0,62	10,55 ± 0,70	0,82 ± 0,081	8,33 ± 0,66	26,54

Tableau 64: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'automne de l'année 2007 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,07 ± 1,17	1,81 ± 0,18	0,52 ± 0,05	0,89 ± 0,09	1,96 ± 0,19	6,25
Cu	0,12 ± 0,012	1,07 ± 0,10	3,23 ± 0,50	7,52 ± 0,65	2,92 ± 0,42	14,86
Pb	0,30 ± 0,03	31,86 ± 1,50	41,73 ± 1,54	5,77 ± 0,62	20 ± 1,20	99,66
Zn	10,13 ± 0,70	90,47 ± 1,92	363,88± 3,63	52,66 ± 1,61	287,44± 3,57	804,58
Ni	0,10 ± 0,01	1,36 ± 1,51	20 ± 1,20	0,58 ± 0,05	7,33 ± 0,65	29,37
Co	0,01 ± 0,001	0,32 ± 0,031	2,02 ± 0,20	0,86 ± 0,08	1,62 ± 0,16	4,83
Fe	3,25 ± 0,50	20,50 ± 1,20	13341,77±16,5	171,88± 3,20	1600 ± 6,55	15137,40
Mn	4,90 ± 0,57	20,24 ± 1,20	100,97± 2	3,22 ± 0,50	48,85 ± 1,58	178,18
Cr	2,50 ± 0,45	10,66 ± 0,70	25,33 ± 1,45	7,32 ± 0,65	12,48 ± 0,80	58,29

Tableau 65: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2007 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg/kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,75 ± 0,07	1,61 ± 0,16	0,34 ± 0,035	0,35 ± 0,034	1,02 ± 0,01	4,07
Cu	0,36 ± 0,034	2,33 ± 0,30	5,96 ± 0,61	11,70 ± 0,72	10,77 ± 0,70	31,12
Pb	0,44 ± 0,045	20,68 ± 1,20	40 ± 1,54	3,87 ± 0,51	9,66 ± 0,69	74,55
Zn	3,74 ± 0,50	69,50 ± 1,71	352,66 ± 3,62	35,16 ± 1,51	248,95 ± 3,55	710,01
Ni	0,55 ± 0,056	7,87 ± 0,65	26,33 ± 1,46	3,79 ± 0,50	17,48 ± 1,17	56,02
Co	0,07 ± 0,007	1,03 ± 0,10	4,98 ± 0,57	0,55 ± 0,05	2,90 ± 0,47	9,53
Fe	5,33 ± 0,59	20,54 ± 1,20	15198,38 ± 17,58	189,27 ± 3,30	1598,39 ± 6,54	17011,91
Mn	5,77 ± 0,60	22,32 ± 1,25	168,48 ± 3,10	6,79 ± 0,63	67,98 ± 1,72	271,34
Cr	7,66 ± 0,65	12,88 ± 0,80	28,95 ± 1,48	5,76 ± 0,59	21,76 ± 1,21	77,01

Tableau 66: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2007 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,59 ± 0,058	1,68 ± 0,16	0,37 ± 0,036	0,21 ± 0,21	1,55 ± 0,15	4,37
Cu	0,21 ± 0,58	1,18 ± 0,18	4,41 ± 0,54	6,33 ± 0,63	3,09 ± 0,49	15,22
Pb	0,21 ± 0,02	15,23 ± 1	35,11 ± 1,51	2,99 ± 0,48	5,35 ± 0,57	59,89
Zn	3,89 ± 0,50	74,54 ± 1,75	337,23 ± 3,59	39 ± 1,52	219,11 ± 3,48	673,77
Ni	0,31 ± 0,03	1,55 ± 0,15	16,87 ± 1,16	0,98 ± 0,097	10,50 ± 0,70	30,21
Co	0,05 ± 0,05	0,39 ± 0,03	2,12 ± 0,21	0,91 ± 0,09	1,78 ± 0,17	5,34
Fe	2,88 ± 0,46	15 ± 1,15	13120 ± 16,40	150,42 ± 2,90	1586,69 ± 6,52	14874,99
Mn	4,85 ± 0,56	20,11 ± 1,20	100,77 ± 2	3 ± 0,49	48,25 ± 1,55	176,98
Cr	2,06 ± 0,20	6,94 ± 0,63	18,42 ± 1,18	1,57 ± 0,15	10 ± 0,70	38,99

Tableau 67: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2008 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,52 ± 0,15	3,55 ± 0,50	0,42 ± 0,04	0,28 ± 0,32	2,12 ± 0,20	7,89
Cu	1,32 ± 0,13	1,87 ± 0,18	3,05 ± 0,48	10,20 ± 0,70	1,12 ± 0,12	18,57
Pb	3,75 ± 0,51	29,67 ± 1,50	56,5 ± 1,63	19 ± 1,19	14,12 ± 0,94	114,04
Zn	6 ± 0,62	69,125 ± 1,70	1500,5 ± 6,47	88,225 ± 1,83	450 ± 4,55	2113,85
Ni	3,25 ± 0,50	2,22 ± 0,24	24,05 ± 1,45	8 ± 0,66	12,5 ± 0,80	50,02
Co	1,25 ± 0,30	1,87 ± 0,18	11,75 ± 0,72	0,72 ± 0,63	7,7 ± 0,63	21,29
Fe	3,65 ± 0,51	20,33 ± 1,20	16245,66 ± 17,60	200,77 ± 3,48	1040,22 ± 6,44	17510,63
Mn	5 ± 0,58	21,92 ± 1,20	104,92 ± 2	5,87 ± 0,60	72,95 ± 1,73	210,66
Cr	10 ± 0,70	8,25 ± 0,66	29,11 ± 1,50	2,08 ± 0,20	20,44 ± 1,20	69,88

Tableau 68: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2008 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1 ± 0,20	1,59 ± 0,15	0,20 ± 0,02	0,39 ± 0,04	1 ± 0,10	4,18
Cu	1,56 ± 0,15	19,33 ± 1,19	30,67 ± 1,50	55,38 ± 1,63	15,67 ± 1,15	122,61
Pb	0,82 ± 0,08	25,23 ± 1,45	55,22 ± 1,64	15,45 ± 1,15	15,11 ± 1,15	111,83
Zn	7,54 ± 0,64	79,34 ± 1,80	895,35 ± 5,58	68,76 ± 1,74	842,85 ± 5,45	1893,84
Ni	2,89 ± 0,45	6,87 ± 0,61	36,77 ± 1,51	7,24 ± 0,65	15,5 ± 1,15	69,27
Co	5,34 ± 0,58	8,16 ± 0,67	30,34 ± 1,50	9,88 ± 0,69	17,54 ± 1,17	71,26
Fe	4,23 ± 0,53	25,23 ± 1,45	14098,55 ± 16,48	290,43 ± 3,58	2002,75 ± 6,50	16421,19
Mn	7,23 ± 0,63	20,55 ± 1,20	160,22 ± 3	8 ± 0,67	80,15 ± 1,83	276,15
Cr	10,55 ± 0,70	29,23 ± 1,50	20,11 ± 1,20	2,33 ± 0,35	21,11 ± 1,20	83,33

Tableau 69: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2008 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,56 ± 0,055	2 ± 0,20	0,31 ± 0,032	0,42 ± 0,041	1,68 ± 0,16	4,97
Cu	0,56 ± 0,054	11,48 ± 0,72	35,34 ± 1,50	49,57 ± 1,54	10,50 ± 0,70	107,45
Pb	0,55 ± 0,05	18,56 ± 1,18	40,89 ± 1,53	3,44 ± 0,50	5,98 ± 0,62	69,42
Zn	5,42 ± 0,57	87,55 ± 1,86	945,25 ± 5,61	67,33 ± 1,74	855,24 ± 5,47	1960,79
Ni	2,96 ± 0,47	5,63 ± 0,58	35,32 ± 1,51	6,33 ± 0,63	14,22 ± 0,14	64,46
Co	4,66 ± 0,56	7,77 ± 0,65	28,48 ± 1,48	9,5 ± 0,93	16,28 ± 1,16	66,69
Fe	3,11 ± 0,50	18,88 ± 1,18	13000,24 ± 16,41	189,66 ± 3,30	2190,24 ± 6,52	15402,13
Mn	5,33 ± 0,57	23,89 ± 1,35	140,77 ± 2,30	5,55 ± 0,57	34,88 ± 1,50	210,42
Cr	2,09 ± 0,20	7,90 ± 0,65	18,78 ± 1,18	1,97 ± 0,19	10,55 ± 0,70	41,29

Tableau 70: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'automne de l'année 2009 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,41 ± 0,14	4,35 ± 0,55	0,12 ± 0,12	1 ± 0,10	3,08 ± 0,50	9,96
Cu	0,55 ± 0,053	6,34 ± 0,63	33,88 ± 1,50	50,14 ± 1,60	10,33 ± 0,70	101,24
Pb	0,75 ± 0,07	28,83 ± 1,48	64,67 ± 1,72	7,66 ± 0,65	20,64 ± 1,20	122,55
Zn	12,41 ± 0,80	108,33 ± 2,10	1023,21 ± 6,44	81,55 ± 1,84	918,33 ± 5,60	2143,83
Ni	1,24 ± 0,20	10 ± 0,70	37,33 ± 1,51	10,28 ± 0,70	17,39 ± 1,17	76,24
Co	2,41 ± 0,35	9,66 ± 0,68	34,16 ± 1,50	11,77 ± 0,72	19,24 ± 1,20	77,24
Fe	6,22 ± 0,63	28,33 ± 1,48	13989,45 ± 16,43	210,66 ± 3,49	2297,88 ± 6,54	16532,54
Mn	8 ± 0,66	26,33 ± 1,46	154,45 ± 2,38	8,88 ± 0,66	50,79 ± 1,60	248,45
Cr	3,76 ± 0,50	18,33 ± 1,18	28,50 ± 1,48	3,77 ± 0,50	25,81 ± 1,45	80,17

Tableau 71: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2009 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg/kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,06 ± 0,10	2,81 ± 0,45	0,51 ± 0,05	0,95 ± 0,095	1,98 ± 0,19	7,31
Cu	0,93 ± 0,092	12,25 ± 0,80	49,48 ± 1,60	58,12 ± 1,69	16,77 ± 1,16	137,55
Pb	0,70 ± 0,07	33,71 ± 1,50	66,77 ± 1,73	5,25 ± 0,58	10,32 ± 0,70	116,75
Zn	3,24 ± 0,50	79,26 ± 1,83	932,18 ± 5,60	63,66 ± 0,63	810 ± 1,18	1888,34
Ni	3,11 ± 0,50	12,32 ± 0,80	43,55 ± 1,54	13,33 ± 0,84	20,27 ± 1,20	92,58
Co	4,21 ± 0,54	11,33 ± 0,72	43,68 ± 1,54	14,77 ± 0,96	22,44 ± 1,22	96,43
Fe	4,50 ± 0,55	25,22 ± 1,46	13798,77 ± 16,40	213,34 ± 3,49	2595,65 ± 6,57	16637,48
Mn	7,69 ± 0,65	21,86 ± 1,20	163,94 ± 3	10,55 ± 0,70	63,98 ± 1,71	268,02
Cr	3,77 ± 0,51	18,35 ± 1,18	31,44 ± 1,50	6,82 ± 0,63	25,68 ± 1,45	86,06

Tableau 72: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2009 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,37	2,98 ± 0,48	0,68 ± 0,63	0,75 ± 0,076	2,43 ± 0,45	8,21
Cu	0,77	11,90 ± 0,72	42,33 ± 1,53	50,55 ± 1,60	12 ± 0,80	117,55
Pb	0,67	17,55 ± 1,17	45,33 ± 1,58	4 ± 0,53	8,88 ± 0,66	76,43
Zn	5,78	90,22 ± 1,94	995,35 ± 5,61	70,44 ± 1,18	897,33 ± 5,58	2059,12
Ni	3	11,33 ± 0,72	40,44 ± 1,54	12,11 ± 1,18	20,55 ± 1,20	87,43
Co	4,12	10,65 ± 0,65	40,77 ± 1,54	13,33 ± 1,18	20,87 ± 1,20	89,74
Fe	4 ± 0,53	24,15 ± 1,24	13720,01 ± 16,40	191,50 ± 3,42	2219,22 ± 6,54	16158,88
Mn	7,51 ± 0,65	20 ± 1,20	151,21 ± 2,35	8,30 ± 0,66	48,53 ± 1,58	235,55
Cr	3,15 ± 0,50	12,25 ± 0,80	27,35 ± 1,47	3,66 ± 0,51	18,22 ± 1,18	64,63

Tableau 73: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'automne de l'année 2010 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg/kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,09	4,43	0,98	0,96	3,06	11,52
Cu	0,80	12,31	43,67	65,22	15,95	137,95
Pb	0,98	39,44	68,59	13,66	19,32	141,99
Zn	7,96	139,22	1098,66	87,88	998,76	2332,48
Ni	4,11	13,18	43,90	15,44	22,56	99,19
Co	5,76	15,33	44,77	18,36	24,65	108,87
Fe	5,75	28,66	13987,55	210,38	233,32	14465,66
Mn	9,30	22,42	157,44	12,66	64,78	266,6
Cr	5,27	15,82	27,53	4,90	26,89	80,41

Tableau 74: Les teneurs en métaux lourds dans la saison de printemps de l'année 2010 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg/kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,27	3,83	0,77	0,81	2,03	8,71
Cu	1,02	22,88	55,31	79,87	22,95	182,03
Pb	0,80	45,90	64,77	14,66	19,87	146
Zn	7	90,33	1034,12	72,88	974,78	2179,11
Ni	5,92	15,23	57,94	17,55	27,97	124,61
Co	7,28	17,44	63,77	21,39	30,28	140,16
Fe	5,89	27,21	14002,33	205,66	2589,51	16830,6
Mn	10,36	30,50	169,64	19,88	73,29	303,67
Cr	5,67	20,44	35,88	10,22	30,96	103,17

Tableau 75: Les teneurs en métaux lourds dans la saison d'été de l'année 2010 du sol S3 (fraction 0,2mm) en mg /kg de MS (ppm) (extraction séquentielle).

PHASES ETM	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,78	4	0,43	1,03	2,25	9,49
Cu	0,92	12,55	47	71,30	20,27	152,04
Pb	0,79	30	50,44	8,33	10,17	99,73
Zn	7,18	100,63	1085,92	81	989,42	2264,15
Ni	5,66	14,50	56,02	16,47	28,84	121,49
Co	6	16,16	57,84	19,40	28	127,4
Fe	5,64	26,41	13971,10	198,35	2300,18	16501,68
Mn	9,26	21,38	141,45	11,77	67	250,86
Cr	5,20	15,71	27,34	4,58	21,75	74,58

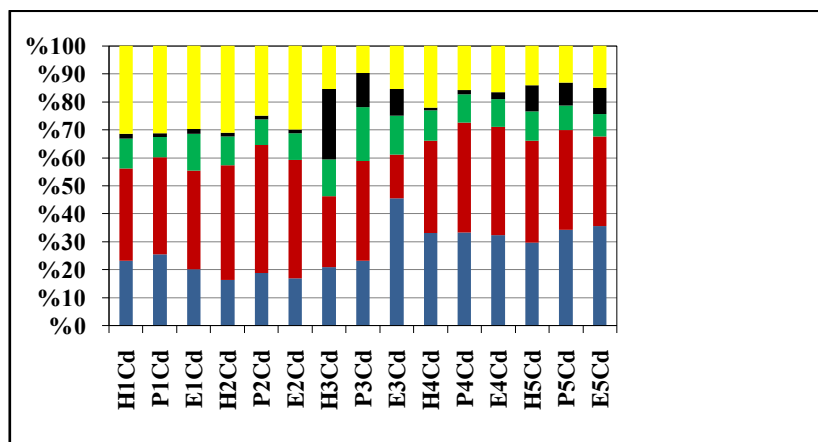


Figure 64: Histogramme illustrant la répartition du Cd (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S1.

1, 2, 3, 4 et 5 représentent respectivement les années 2006, 2007, 2008, 2009 et 2010.

H: la saison d'hiver, A: la saison d'automne, P: la saison de printemps et E: la saison d'été.

■ Phase échangeable ■ Phase acido-soluble ■ Phase réductible
 ■ Phase oxydable ■ Phase résiduelle

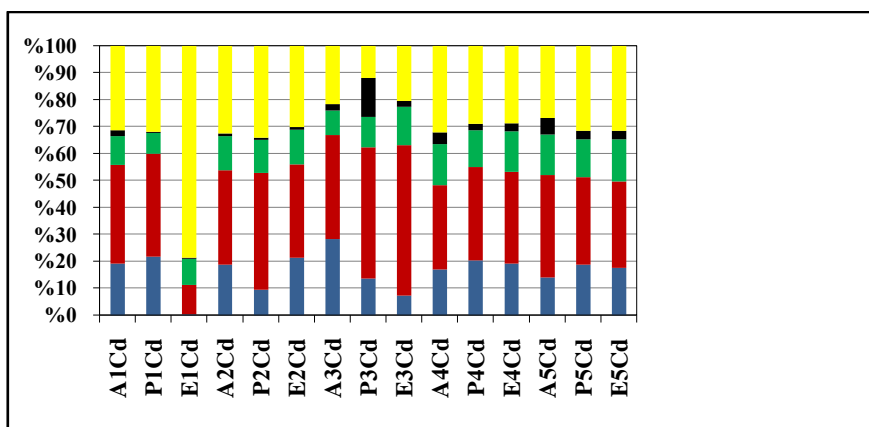


Figure 65: Histogramme illustrant la répartition du Cd (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S2.

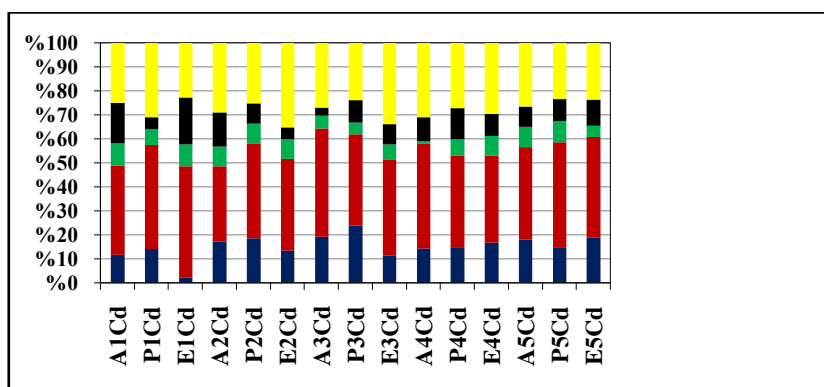


Figure 66: Histogramme illustrant la répartition du Cd (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S3.

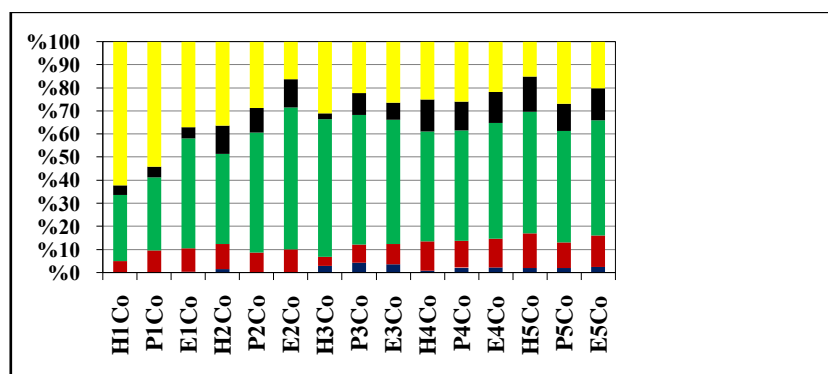


Figure 67: Histogramme illustrant la répartition du Co (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S1.

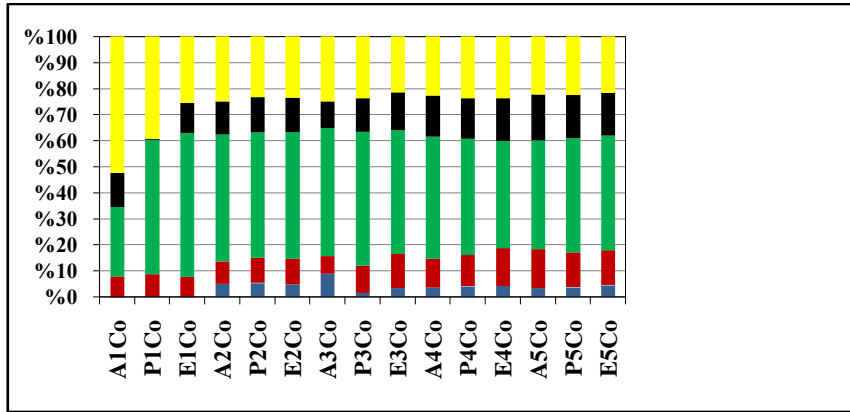


Figure 68: Histogramme illustrant la répartition du Co (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S2.

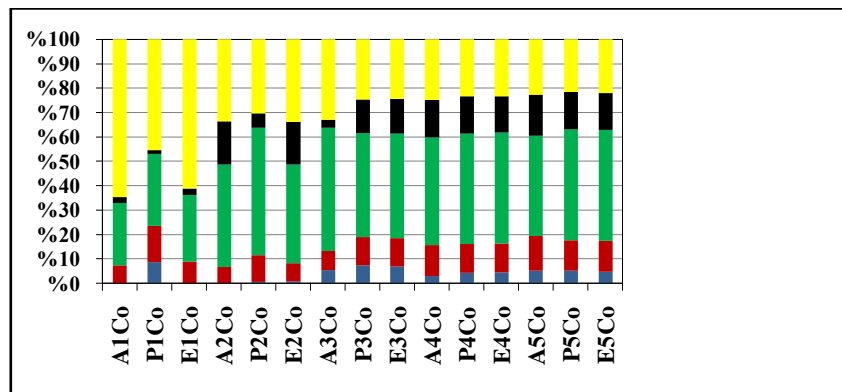


Figure 69: Histogramme illustrant la répartition du Co (en % du contenu total) dans les différentes phases(extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S3.

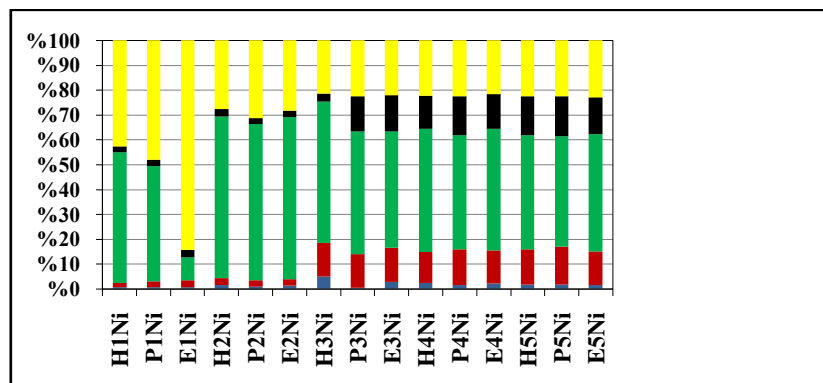


Figure 70: Histogramme illustrant la répartition du Ni (en % du contenu total) dans les différentes phases(extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S1.

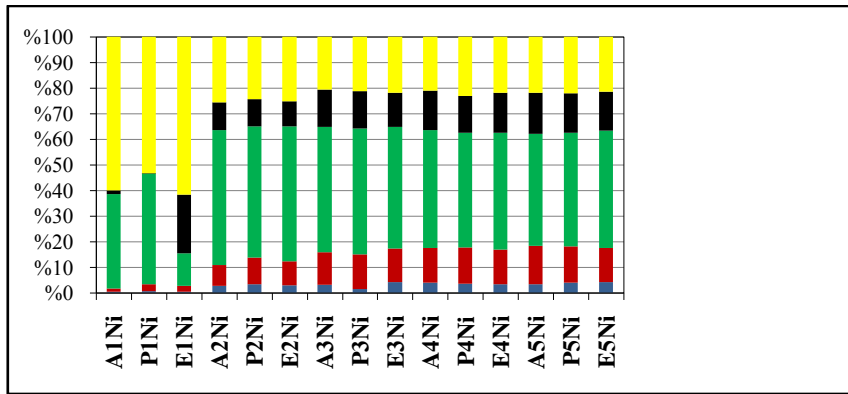


Figure 71: Histogramme illustrant la répartition du Ni (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S2.

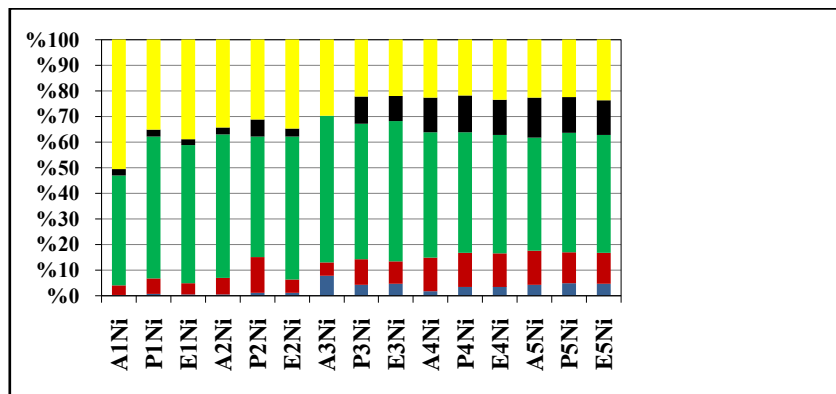


Figure 72: Histogramme illustrant la répartition du Ni (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S3.

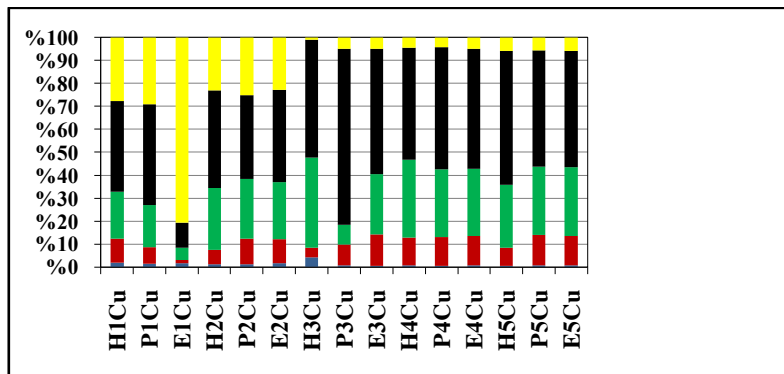


Figure 73: Histogramme illustrant la répartition du Cu (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S1.

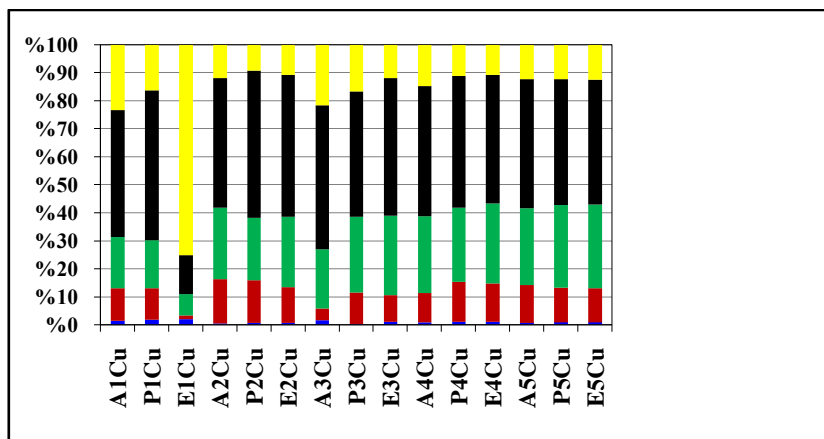


Figure 74: Histogramme illustrant la répartition du Cu (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S2.

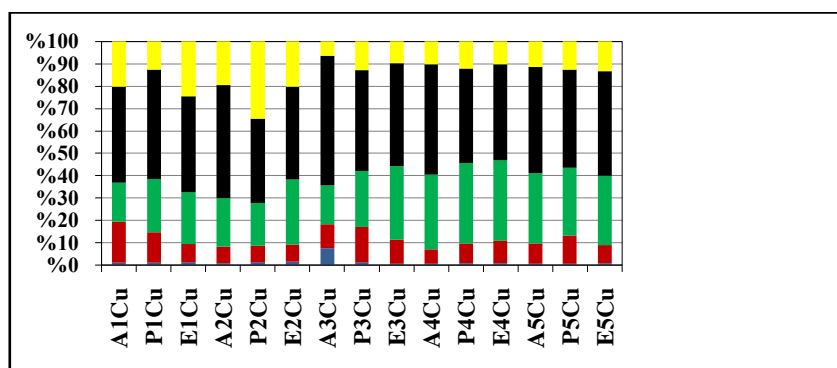


Figure 75: Histogramme illustrant la répartition du Cu (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S3.

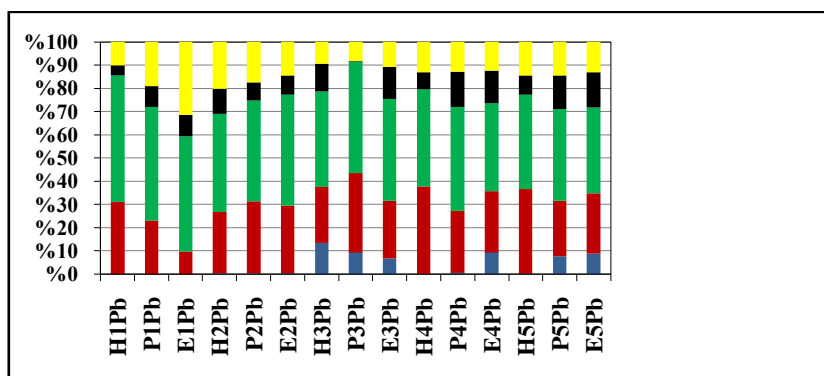


Figure 76: Histogramme illustrant la répartition du Pb (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S1.

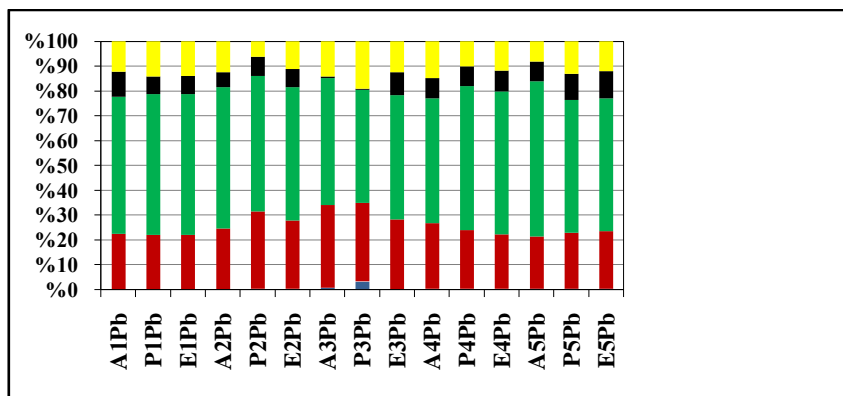


Figure 77: Histogramme illustrant la répartition du Pb (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S2.

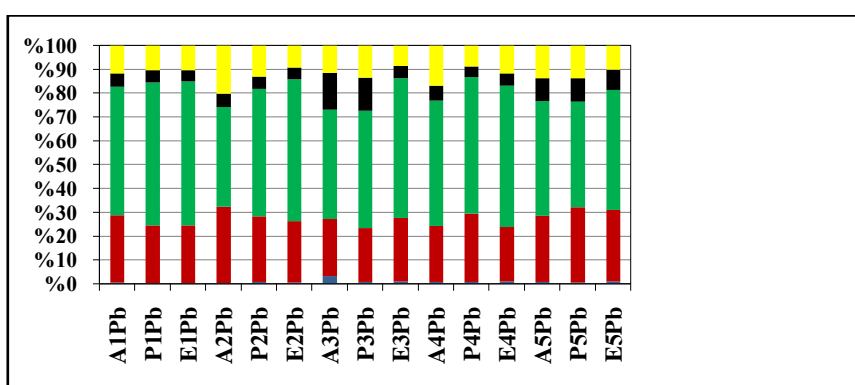


Figure 78: Histogramme illustrant la répartition du Pb (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S3.

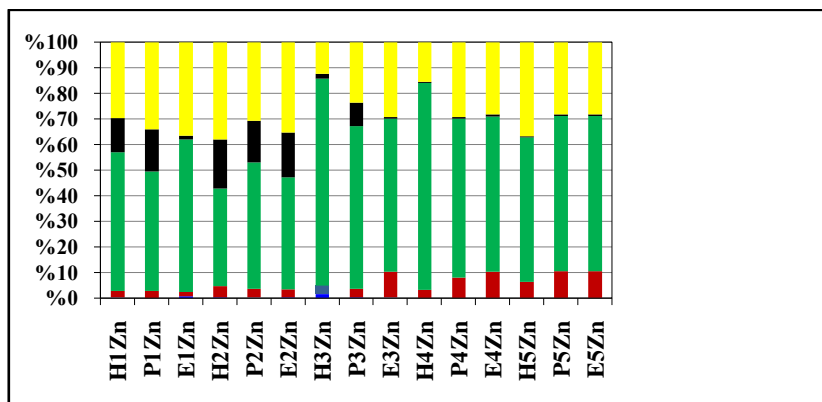


Figure 79: Histogramme illustrant la répartition du Zn (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S1.

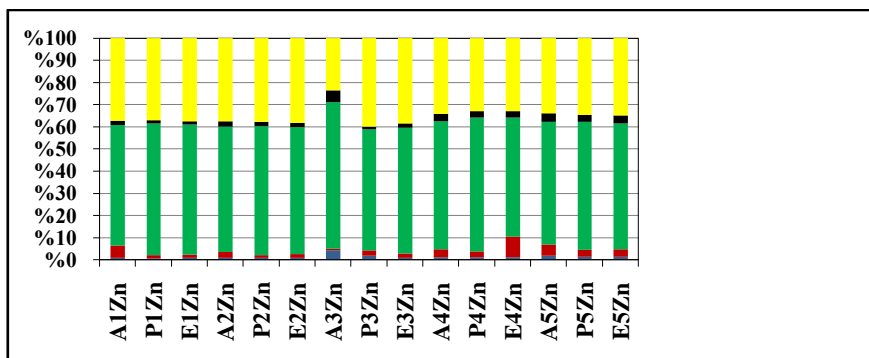


Figure 80: Histogramme illustrant la répartition du Zn (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S2.

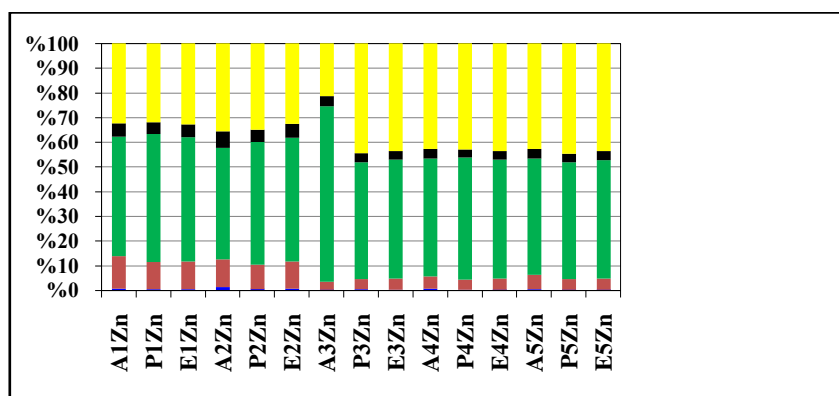


Figure 81: Histogramme illustrant la répartition du Zn (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S3.

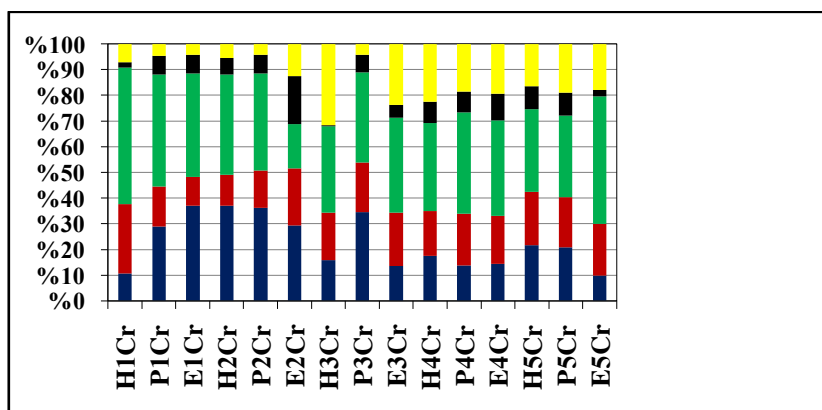


Figure 82: Histogramme illustrant la répartition du Cr (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S1.

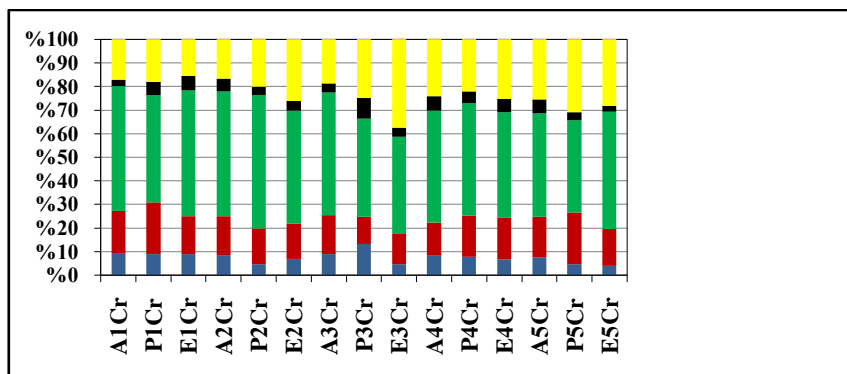


Figure 83: Histogramme illustrant la répartition du Cr (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S2.

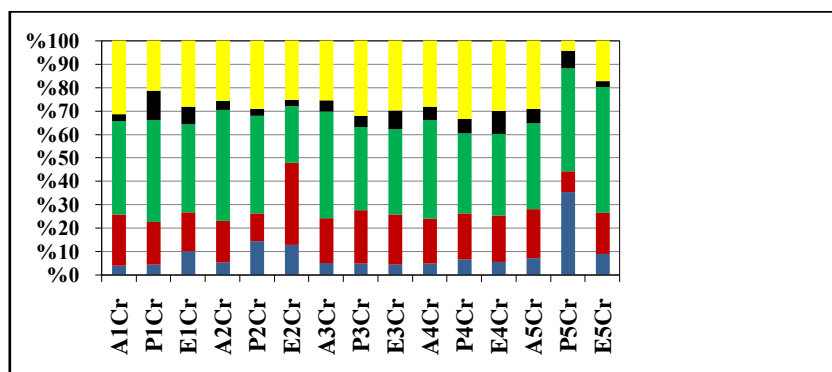


Figure 84: Histogramme illustrant la répartition du Cr (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S3.

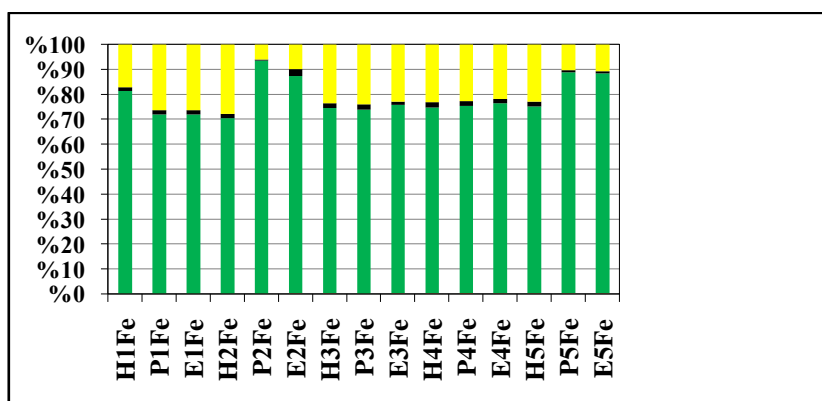


Figure 85: Histogramme illustrant la répartition du Fe (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S1.

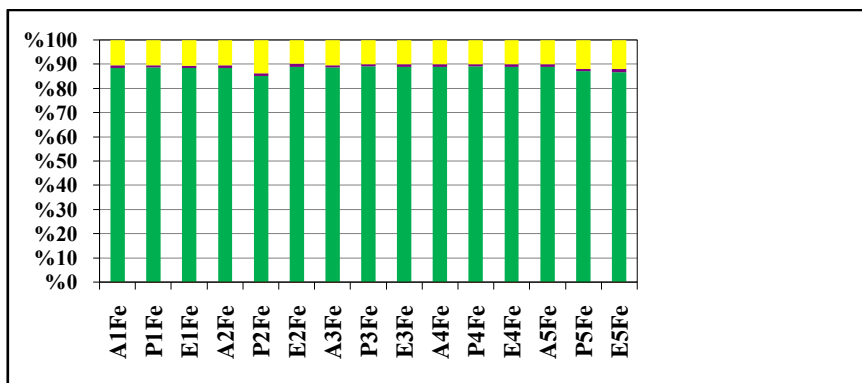


Figure 86: Histogramme illustrant la répartition du Fe (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S2.

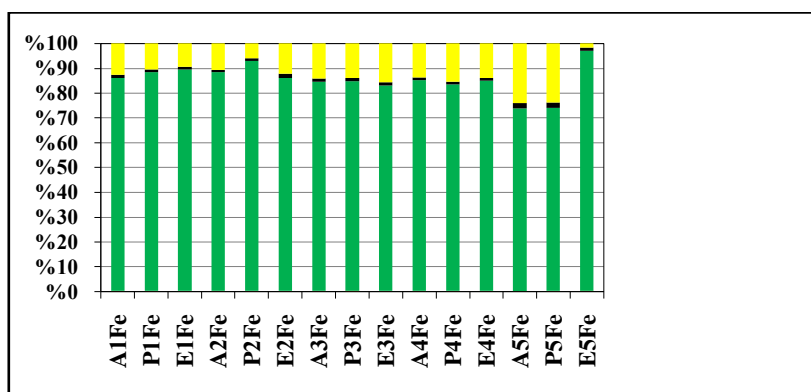


Figure 87: Histogramme illustrant la répartition du Fe (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S3.

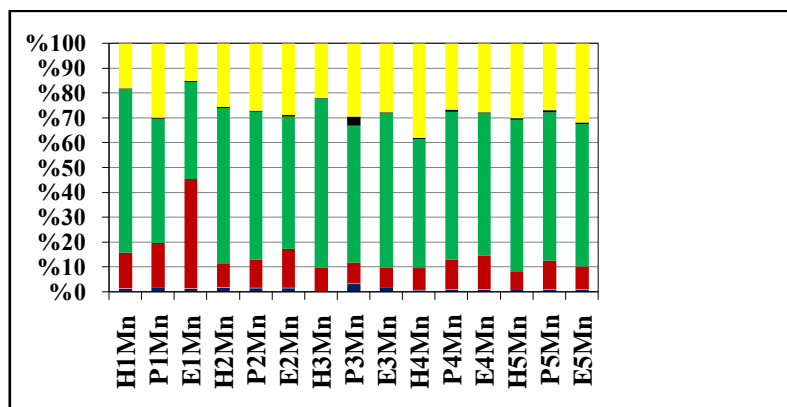


Figure 88: Histogramme illustrant la répartition du Mn (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S1.

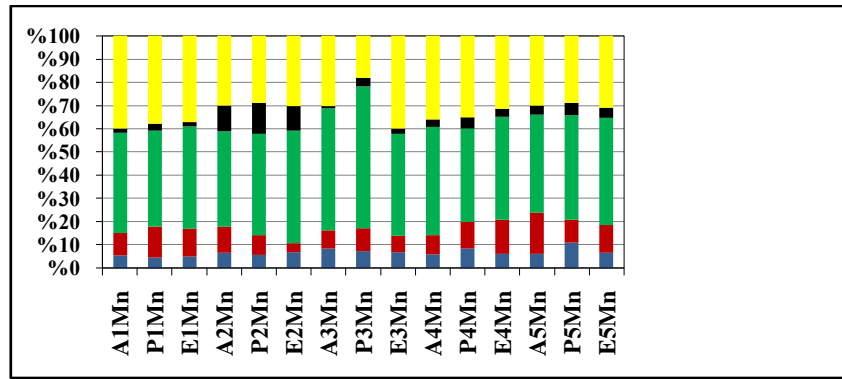


Figure 89: Histogramme illustrant la répartition du Mn (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S2.

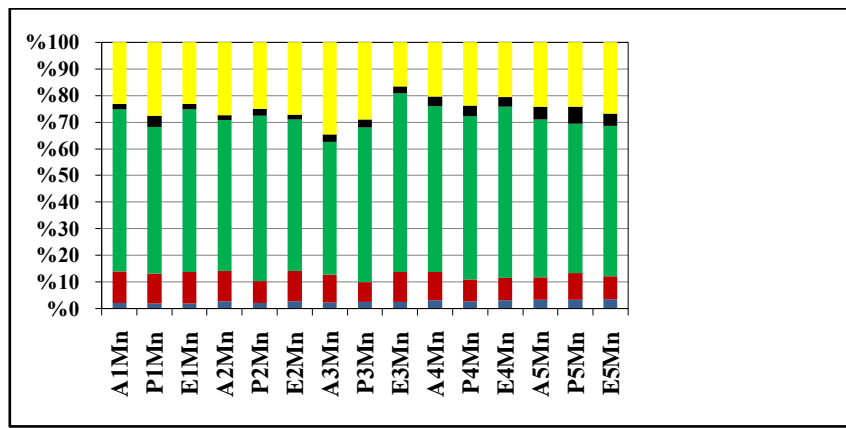


Figure 90: Histogramme illustrant la répartition du Mn (en % du contenu total) dans les différentes phases (extraction séquentielle) des différentes saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 du sol S3.

1.2.2.1- Variation saisonnière de la teneur en métaux des sols S1, S2 et S3

Le sol S1 se caractérise par des teneurs en Cu, Fe, Pb, Zn, Ni et Cr élevées dans la saison d'été, d'autre part on a constaté que les teneurs en Mn et Co se concentrent plus dans la saison de printemps et les teneurs en Cd sont trouvées plus élevées dans la saison d'hiver. Pour le sol S2, les plus fortes teneurs en Ni, Co, Fe et Mn sont enregistrées dans la saison de printemps, cependant les teneurs en Cu, Pb et Cr sont plus élevés dans la saison d'automne.

Quant au sol S3, les teneurs en Cu, Pb, Ni, Co, Fe, Mn et Cr sont plus élevés dans la saison de printemps, alors que les teneurs en Cd, Zn augmentent dans la saison d'automne et ceci durant toutes les années d'étude.

1.2.2.2- Variation annuelle de la teneur en métaux des sols S1, de S2 et de S3

Ces résultats mettent en évidence l'existence d'une plus forte variabilité temporelle des teneurs en métaux lourds dans les trois sols.

Il y a augmentation de la teneur des métaux lourds dans les trois sols et il n'y a pas de

changement significatif sur la répartition des métaux lourds dans les différentes phases à travers le temps.

Comme le montre les tableaux ci-dessus, les teneurs en métaux lourds varient d'une fraction à l'autre et sont répartis comme suit:

I.2.2.3- Le cadmium

Les résultats ont montré que le Cd se trouve essentiellement lié aux carbonates avec un maximum de 45,78% pour le sol S1, de 55,82% pour le sol S2, de 48,24% pour le sol S3 et se concentre plus dans le sol S1, puis dans le sol S2. Ces résultats indiquent aussi qu'une part importante de cadmium est fixée par la phase résiduelle (de 9,70% à 31,98% pour le sol S1, de 11,88% à 78,77% pour le sol S2 et de 20,95% à 35,46% pour le sol S3) et échangeable (de 16,28% à 46,02% pour le sol S1, de 0,37% à 28,38% pour le sol S2, de 1,85% à 23,92% pour le sol S3), ce qui représente plus de 50% dans les phases échangeable + acido-soluble de cadmium potentiellement mobilisable.

En revanche, sa teneur augmente dans la saison d'hiver pour le sol S1 et dans la saison d'automne pour les sols S2 et S3 avec la diminution de pH et ceci dans les années 2006-2010.

Le classement des différentes fractions de Cd par ordre de prédominance peut être comme suit:

Carbonates > Résiduelle > Échangeable > Réductible > Oxydable pour le sol S1 et S2, est dans l'ordre décroissant suivant pour le sol S3:

Carbonates > Résiduelle > Échangeable > Réductible > Oxydable

Les nombreuses études présentes dans la littérature associent préférentiellement le Cadmium à la fraction carbonatée^[90], la fraction échangeable et la phase résiduelle^[91].

Le total des teneurs en cadmium contenues dans les différentes phases (S1 (entre 4,11 et 9,44mg/kg), S2 (entre 3,13 et 7,75mg/kg) et S3 (entre 2,98 et 11,52mg/kg)) dépassent légèrement les limites définies dans le tableau 2, il ya donc une légère pollution métallique en Cd des sols, il apparait qu'une proportion importante de cette pollution est théoriquement relargable, car elle est non associée à la phase résiduelle.

I.2.2.4- Le cuivre

Les résultats des extractions séquentielles montrent que le Cu est très peu échangeable et localisé surtout dans les matières organiques (avec un maximum de 76,81% pour le sol S1, de 53,48% pour le sol S2 et de 54,92% pour S3) et dans la fraction liée aux oxydes de fer et de manganèse (de 5,22% à 40,83% pour le sol S1, de 6,77% à 30,03% pour le sol S2 et de 16,42% à 36,01% pour le sol S3). Ceci se manifeste dans toutes les saisons de l'année 2006 jusqu'à l'année 2010 pour les trois sols. En effet sa teneur est élevée dans la saison d'été avec augmentation du pH.

A partir de ces résultats obtenus, l'échelle de prédominance de Cu en fonction des phases chimiques peut être comme suit:

Matière organique > Oxydes de manganèse et de fer > Carbonates > Résiduelle > Echangeable pour le sol S1 et S2, est dans l'ordre décroissant suivant pour le sol S3:

Matière organique > Oxydes de manganèse et de fer > Résiduelle > Carbonates > Echangeable

Nos résultats confirment une mobilité du Cu presque similaire à celui du Cd.

Cette affinité envers la fraction oxydable a été enregistrée par plusieurs auteurs qui associent le Cu préférentiellement à la matière organique, aux oxydes de fer et de manganèse ainsi qu'aux carbonates ^[91].

Les deux premières fractions (la fraction oxydable et la fraction réductible) ont globalement des valeurs élevées, atteignant (270,25± 3,6) mg/kg et (160,46± 2,45) mg/kg pour le sol S1, (100,22± 2) mg/kg et (67,51 ± 1,74) mg/kg pour le sol S2 et (79,87 ± 1,84) mg/kg et (55,31 ± 1,64)mg/kg pour le sol S3.

Le total des teneurs en Cu contenues dans les différentes phases (S1 (11,86 et 533,65 mg/kg), S2 (entre 9,42 et 224,79 mg/kg) et S3 (11,53 et 182,03 mg/kg)) dépassent les limites des normes définies dans le tableau 2, dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010. Ces sols sont contaminés par le Cu.

I.2.2.5- Le plomb

L'analyse des résultats montre d'une part, que le Pb est préférentiellement lié aux oxydes de Fe et de Mn (avec un maximum de 74,98% pour le sol S1, de 62,40% pour le sol S2 et de 60,42% pour le sol S3), suivi par les carbonates (de 9,83% à 49,76% pour le sol S1, de 20,35% à 33,13% pour le sol S2 et de 22,56% à 31,96% pour le sol S3). D'autre part, il est très faiblement adsorbé par la fraction échangeable durant les saisons, de l'année 2006 jusqu'à 2010 pour les trois sols.

D'après ses résultats le plomb est potentiellement peu mobile.

Le classement des phases par ordre d'importance peut être présenté comme suit:

Oxydes de fer et de manganèse > Carbonates > Résiduelle > Matières organiques > Echangeable.

Cette répartition est en accord avec les nombreuses études présentes dans la littérature qui associent préférentiellement le plomb à la fraction réductible ^[92], puis à la fraction acido-soluble.

Le total des teneurs en Pb dans les différentes phases des sols S1, S2 et S3, la plus élevée est signalée dans la saison d'été avec une augmentation du pH. En effet les teneurs en Pb pour les deux premières fractions (réductible et carbonates) sont plus fortes que les autres fractions.

Pour la fraction réductible, le sol S1 et S2 atteignent des valeurs maximales respectivement de (55,21 ± 1,70) mg/kg et de (89,77 ± 1,85) mg/kg dans la saison d'été de l'année 2010 et (68,59 ± 1,75) mg/kg pour le sol S3 dans la saison d'hiver de l'année 2010.

Pour la fraction carbonate, les sols S1 et S2 ont des teneurs extrêmes voisines respectivement de $(38,77 \pm 1,55)$ mg/kg et $(38,95 \pm 1,52)$ mg/kg, mis à part le sol S3 qui a une teneur maximale plus élevée $(45,90 \pm 1,54)$ mg/kg.

Le total des teneurs en Pb contenues dans les différents phases (S1 (entre 50,01 et 149,43mg/kg), S2 (entre 77,27 et 168,07mg/kg) et S3 (entre 56,85 et 146mg/kg)) dépassent légèrement les limites données dans le tableau 2 particulièrement dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2007 et dans toutes les saisons de l'année 2008 à 2010 pour le sol S1, dans toutes les saisons des années 2009 et 2010 pour le sol S2 et dans les saisons d'automne et de printemps de l'année 2008 et dans toutes les saisons de l'année 2009 et 2010 pour le sol S3, donc on observe une pollution des sols par le Pb.

1.2.2.6- Le zinc

Les résultats des extractions séquentielles montrent que le zinc est très peu échangeables. Le zinc montre une distribution marquée pour la fraction d'oxydes de Fe et de Mn (atteignant des maximaux de 80,84% pour le sol S1, de 66,07% pour le sol S2 et de 70,98% pour le sol S3) et une fraction importante de Zinc est également lié à la fraction résiduelle (de 12,38% à 61,58% pour le sol S1, de 23,63% à 39,94% pour le sol S2 et de 21,28% à 44,95% pour le sol S3) dans les trois saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 .

En effet, le classement des phases par ordre d'importance est comme suit:

Oxydes de fer et de manganèse > Résiduelle > Carbonates > Matières organiques > Echangeable. Des associations similaires ont été mises en évidence par plusieurs travaux dont on peut citer ceux de Aboubaker et Algan et al ^[93,94].

Le Zn est parmi les métaux étudiés, celui qui a les plus fortes teneurs dans la phase réductible atteignant des maximaux de $(2846,11 \pm 6,95)$ mg/kg pour le sol S1, de $(1083,25 \pm 6,50)$ mg/kg pour le sol S2 et de $(1500,5 \pm 6,47)$ mg/kg pour le sol S3 et on notera également des teneurs élevées en Zn dans la fraction résiduelle (avec un maximum de $(1318,52 \pm 6,56)$ mg/kg pour le sol S1, $(601,35 \pm 4,60)$ mg/kg pour le sol S2 et $(998,76 \pm 5,61)$ mg/kg pour le sol S3), ce qui induit une faible mobilité.

Le total des teneurs en Zn contenues dans les différents phases [S1 (690,53 et 4690,56mg/kg), S2 (entre 1333,62 et 1764,16mg/kg) et S3 (entre 629,12 et 2332,48mg/kg)] dépassent largement les limites définies dans le tableau 2, ce qui correspond à des contaminations importantes des sols à travers le temps par le zinc.

1.2.2.6- Le nickel

Le Ni est majoritairement lié à la phase réductible avec un maximum de 65,21% pour le sol S1, 52,68% pour le sol S2 et 68,09% pour le sol S3. Il est également présent dans la phase résiduelle

mais son pourcentage varie d'un sol à l'autre, entre 21,48% et 84,98% pour le sol S1, entre 10% et 61,35% pour le sol S2 et entre 21,89% et 50,60% pour le sol S3, donc le nickel est considéré comme un élément peu mobile. Le Ni est très faiblement échangeable atteignant des valeurs maximaux de $(2,72 \pm 0,45)$ mg/kg pour le sol S1, de $(5,14 \pm 0,55)$ mg/kg pour le sol S2 et de $(5,92 \pm 0,63)$ mg/kg pour le sol S3.

Le classement des phases par ordre d'importance est comme suit:

Oxydes de fer et de manganèse > Résiduelle > Matières organiques > Carbonates > Echangeable.

Des associations similaires ont été mises en évidence par plusieurs travaux dont on peut citer ceux de Aboubaker et Algan et al ^[93,94].

Le total des teneurs en Ni contenues dans les différents phases [S1 (entre 18,44 et 186,62mg/kg), S2(entre 29,43 et 126,75) et S3 (entre 20,67 et 124,61mg/kg) dépassent les limites des normes définies dans le tableau 2, durant les années 2008-2010 pour le sol S1, durant les années 2007-2010 pour le sol S2, particulièrement dans la saison de printemps de l'année 2007 et dans toutes les saisons de l'année 2008 jusqu'à l'année 2010 pour le sol S3.

Une contamination légère due particulièrement aux teneurs élevées en Ni dans la phase réductible des sols est trouvée. Elle est comme suit:

- dans le sol S1 de l'année 2008 jusqu'à l'année 2010,
- dans le sol S2 de l'année 2007 jusqu'à l'année 2010,
- et dans le sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2007 et dans toutes les saisons

de l'année 2008 jusqu'à l'année 2010.

I.2.2.7- Le cobalt

Le cobalt montre un comportement similaire à celui du Ni (réductible), avec des proportions différentes, de 28,51% à 59,48% pour le sol S1, de 25,40% à 55,14% pour le sol S2 et de 25,49% à 55,71% pour le sol S3. Sa part relative est moindre dans la phase résiduelle s'échelonnant de 16,22% à 62,10% pour le sol S1, de 21,41% à 52,26% pour le sol S2 et de 21,60% à 64,70% pour le sol S3.

Les teneurs en cobalt dans la phase échangeable sont négligeables atteignant des maximaux de $(4,26 \pm 0,52)$ mg/kg pour le sol S1, de $(6,88 \pm 0,63)$ mg/kg pour le sol S2 et de $(7,28 \pm 0,65)$ mg/kg pour le sol S3. Ces résultats confirment la faible mobilité du cobalt. Le classement des phases par ordre décroissant est comme suit:

Oxydes de fer et de manganèse > Résiduelle > Matières organiques > Carbonates > Echangeable.

Cette association a été soulignée par plusieurs auteurs ^[91].

Le total des teneurs en Co contenues dans les différentes phases (S1 (entre 2,56 et 208,04 mg/kg), S2 (entre 5,53 et 149,19 mg/kg) et S3 (entre 3,06 et 140,16 mg/kg)) dépassent

les limites des normes définie dans le tableau 2. On signale une contamination des sols comme suit:

- Pour le sol S1 de l'année 2008 à 2010,
- Pour le sol S2 de l'année 2007 à 2010,
- et pour le sol S3 dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010.

I.2.2.8- Le chrome

Le Cr est concentré principalement dans la phase réductible de 17,10% à 53,21% pour le sol S1, de 40,95% à 56,58% pour le sol S2 et 26,58% à 49,69% pour le sol.

Pour le sol S1, le Cr est équitablement réparti entre la phase échangeable (de 13,7% à 37%) et la phase acido-soluble (de 8,90% à 26,89%), le reste est dans la phase résiduelle (de 4,06% à 31,04%), les teneurs dans la phase oxydable sont négligeables.

Contrairement au cas précédent, dans les sols S2 et S3 les teneurs en Cr dans la fraction échangeable sont négligeables, alors que dans leur phase résiduelle elles sont plus importantes, de 15,51 à 37,66% pour le sol S2 et de 21,41% à 33,44% pour le sol S3. Ces résultats reflètent une mobilité moyenne du Cr.

Le classement par ordre décroissant des phases est comme suit:

- dans les sols S2 et S3: Oxydes de fer et de manganèse > Résiduelle > Carbonates > Echangeable > Matières organiques,
- dans le sol S1: Oxydes de fer et de manganèse > Echangeable > Carbonates > Résiduelle > Matières organiques.

Cette répartition est en accord avec les nombreuses études présentes dans la littérature qui associent préférentiellement le Cr à la fraction réductible ^[92]. Le total des teneurs en Cr contenues dans les différentes phases (S1 (entre 29,67 et 79mg/kg), S2 (entre 32,73 et 106,8mg/kg) et S3 (entre 26,54 et 103,17mg/kg)) sont en dessous des limites définies dans le tableau 2, on peut dire que les sols étudiés ne présente pas une contamination par le chrome.

Ce résultat est due peut être à sa mobilité dans un sol basique.

I.2.2.9- Les éléments majeurs

a- Le fer

Comme dans le cas du Co la majorité du Fe est dans la fraction réductible (de 70,39% à 93,43% pour le sol S1, de 85,13% à 89,04% pour le sol S2 et 82,93% à 96,69% pour le sol S3), le reste est dans la phase résiduelle avec des proportions plus importantes dans le sol S1, de 9,74% à 27,77%, de 9,26% à 13,75% pour le sol S2 et de 1,61% à 15,60% pour le sol S3.

Le taux de Fe dans les phases échangeable, acido-soluble et oxydable est négligeable. Le Fe se trouve dans des fractions peu disponibles, ce qui le rend peu mobile. Le total des teneurs en Fe contenues dans les différentes phases [S1 (12392,20 et 39735,24 mg/kg), S2 (19351,14 et 23807,24 mg/kg) et S3 (entre 11629,85 et 16830,6 mg/kg)] sont en dessous des normes limites définie dans le tableau 6. Ces valeurs ne causent pas de problème environnemental majeur.

D'après ces résultats obtenus, le classement par ordre décroissant des phases est:

Oxydes de fer et de manganèse > Résiduelle > Matières organiques > Carbonates > Echangeable, dans les trois saisons de l'année 2006 jusqu'à 2010 pour les trois sols.

Des associations similaires ont été mises en évidence par plusieurs travaux dont on peut citer ceux de Aboubaker et Algan et al^[93,94].

b- Le manganèse

Le Mn n'est pas échangeable et dans une moindre mesure les oxydes de Fe et Mn, représentent la phase de complexation dominante (de 39,33% à 68,14% pour le sol S1, de 40,14% à 60,86% pour le sol S2 et de 49,80% à 66,89% pour le sol S3), la phase résiduelle vient en deuxième position (de 15,11% à 38,16% pour le sol S1, de 18,21% à 39,84% pour le sol S2 et de 16,57% à 27,41% pour le sol S3) et les fractions qui restent acido-soluble et oxydable ont globalement des teneurs en Mn très faibles. On constate d'après ces résultats que le Mn est considérée comme un élément de mobilité faible.

Le classement par ordre décroissant des phases est comme suit:

Oxydes de fer et de manganèse > Résiduelle > Carbonates > Matières organiques > Echangeable.

Des associations similaires ont été mises en évidence par plusieurs travaux dont on peut citer ceux de Aboubaker et Algan et al^[93,94].

Le total des teneurs en Mn contenues dans les différentes phases (S1 (70,90 et 244,58mg/kg), S2 (94,86 et 277,08mg/kg) et S3 (149,87 et 303,67mg/kg)) sont très inférieures aux normes limites définies dans le tableau 2, donc le manganèse ne pose aucune pollution des sols mais au contraire présente des carences.

Ainsi, suite à ces résultats, on peut signaler une contamination élevée par le Zn, suivi par celle du Co, du Ni, du Cd, du Pb et enfin par celle du Cu des trois sols. Cette contamination varie au fur et à mesure des saisons et des années et d'un métal à un autre.

Par le Pb:

- dans le sol S1 dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2007 jusqu'à 2010,
- dans le sol S2 dans toutes les saisons des années 2009 et 2010,
- dans le sol S3 dans les saisons d'automne et de printemps de l'année 2008 jusqu'à 2010.

Par le Ni et le Co:

- dans les sols S1 et S3 dans toutes les saisons de l'année 2008 jusqu'à 2010,
- dans le sol S2 dans toutes les saisons de l'année 2007 jusqu'à 2010.

Par le Cu:

• dans les sols S1, S2 et S3 dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010.

L'irrigation par les eaux du barrage, les eaux usées et les eaux du fleuve Tafna, Les retombées atmosphériques (apport de Pb) sont une des causes de la pollution trouvée dans les sols agricoles. A cela il faut ajouter les engrais (d'apport de Zn, de Cu et de Pb) des pratiques agricoles, au travers des traitements phytosanitaires (fongicides et insecticides).

On détecte également des carences:

- en Cu dans les sols S1 et S2 au cours de l'année 2006 et dans le sol S3 dans les années 2006 et 2007,
- en Ni et en Co dans les trois sols au cours de l'année 2006,
- en Fe dans la saison d'hiver de l'année 2006 pour le sol S1 et de l'année 2006-2010 pour le sol S3 et enfin en Mn dans les trois sols de l'année 2006 jusqu'à 2010.

Les causes des carences sont dues probablement à la nature des sols, sableux limoneux et calcaires.

Tous ces résultats ont montré que le Pb, Zn, le Ni, le Co, le Mn et le Fe sont principalement concentrés dans la fraction réductible, quant au Cu, il se trouve essentiellement lié à la matière organique. Pour le Cd, il est plus concentré dans les fractions carbonates (à plus de 40%), échangeable et résiduelle.

Enfin le Cr est concentré dans les fractions réductible et résiduelle.

De tels résultats sont concordants avec les résultats selon Tessier d'une part, d'autre part, les teneurs totales selon Afnor indique que 70% à 80% sont liés principalement aux silicates et nommée fraction résiduelle. 12-29 % sont sous des formes stables, et seulement moins de 2 % des métaux pourrait être biodisponible.

La variation saisonnière des teneurs métalliques a fait l'objet de plusieurs travaux; notre étude a montré que la contamination en métaux lourds dans l'ensemble était plus élevée en printemps qu'en été.

En fin, l'étude de la localisation des éléments métalliques a permis, aussi de suivre l'évolution de ces éléments métalliques en fonction des saisons et des années. Ce qui pourrait nous renseigner sur les risques éventuels liés à la contamination du sol.

I.3- Répartition des métaux lourds au sein des différentes fractions granulométriques

D'après la littérature la pollution est essentiellement concentrée dans les fractions les plus fines (fraction du fond). Nous avons ainsi pensé à compléter notre étude par l'évaluation des teneurs des métaux lourds au sein des autres fractions granulométriques: le fond (<0,02mm) et la fraction 2mm.

Les teneurs en métaux lourds de ces fractions granulométriques (le fond et 2mm) dans les sols S1, S2 et S3 sont données dans les tableaux (annexe I:76-165).

- Le total le plus élevé des teneurs en métaux lourds contenues dans les différentes phases se trouve en été et en printemps durant les années 2006 à 2010 pour les trois sols S1, S2 et S3. On observe de grandes variations entre les différentes fractions.

- De même que dans la fraction 0,2mm, on note généralement une augmentation des teneurs totales en métaux lourds dans les sols de l'année 2006 jusqu'à 2010 et on note également une répartition séquentielle similaire en métaux lourds dans les fractions granulométrique (le fond, 2mm) des sols S1, S2 et S3 que celle trouvée dans la fraction 0,2mm.

I.3.1- Le cadmium

Pour la fraction du fond, le total des teneurs en Cd trouvées contenues dans les différentes phases, atteignent des maximaux de 16,23mg/kg pour le sol S1, de 10,86mg/kg pour le sol S2 et de 14,19 mg/kg pour le sol S3.

Quant à la fraction 2mm, le total des teneurs en Cd contenues dans les différentes phases, atteignent des extrêmes de 6,33mg/kg pour le sol S1, de 5,55mg/kg pour le sol S2 et de 8,04mg/kg pour le sol S3.

En outre, le total des teneurs en Cd trouvées contenues dans les différentes phases des sols S1, S2 et S3 de l'année 2006 à 2010 dans les fractions du fond et 2mm, dépasse le seuil limite des normes définies dans le tableau 2. Donc nous constatons une pollution par le cadmium fortement élevée dans la fraction du fond que celle trouvée dans les fractions granulométrique 0,2mm et 2mm.

I.3.2- Le cuivre

Pour la fraction du fond, le total des teneurs en Cu contenues dans les différentes phases, varient avec des maximaux de 593,12 mg/kg pour le sol S1, de 285,36 mg/kg pour le sol S2 et de 244,56mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs dépassent le seuil limite des normes définie dans le tableau 2 dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons de l'année 2009 et 2010, pour les sols S1 et S3, dans toutes les saisons des années 2007 à 2010 pour le sol S2.

Concernant la fraction 2mm, le total des teneurs en Cu contenues dans les différents phases, atteint des maximaux de 359,53mg/kg pour le sol S1, de 140,99mg/kg pour le sol S2 et de 90,97 mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs dépassent le seuil limite des normes définies dans le tableau 2 dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010 pour les sols S1 et S3 et dans les saisons de printemps et d'été durant l'année 2010 pour le sol S2.

Ainsi donc ces résultats nous indiquent une pollution en Cu des sols S1 et S3 de la fraction du fond et celle de 2mm dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010.

Quant au sol S2, il présente d'une part une pollution en Cu dans la fraction du fond dans toutes les saisons des années 2007 à 2010 et d'autre part une pollution dans la fraction granulométrique 2mm dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2010. Toutefois cette pollution est plus marquée dans les fractions du fond et 0,2mm que la fraction 2mm.

I.3.3- Le plomb

Pour la fraction du fond, le total des teneurs en Pb contenues dans les différentes phases, allant avec un maximum de 191,01mg/kg pour le sol S1, de 198,21 mg/kg pour le sol S2 et de 197,25mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs dépassent le seuil limite des normes définies dans le tableau 2 dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2006 et dans toutes les saisons des années 2008 à 2010 pour le sol S1, dans toutes les saisons des années 2006 à 2010 pour le sol S2 et pour le sol S3, dans la saison d'automne de l'année 2006, dans les saisons d'automne et de printemps de l'année 2007 et dans toutes les saisons des années 2008 à 2010.

Pour ce qui est de la fraction 2mm, le total des teneurs en Pb contenues dans les différentes phases, atteint des maximaux de 99,87mg/kg pour le sol S1, de 98,85mg/kg pour le sol S2 et de 90,70mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs sont en dessous du seuil limite des normes définies dans le tableau 2, dans toutes les saisons des années 2006 à 2010 pour les sols S1, S2 et S3.

Ces résultats mettent en évidence l'existence d'une pollution légère en Pb dans la fraction du fond, dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2006 et dans toutes les saisons des années 2007 à 2010 pour le sol S1, dans toutes les saisons des années 2006 à 2010 pour le sol S2 et pour le sol S3, dans la saison d'automne de l'année 2006, dans les saisons d'automne et de printemps de l'année 2007 et dans toutes les saisons des années 2008 à 2010.

Cette pollution est moins significative dans la fraction 0,2mm. En revanche, les teneurs dans la fraction 2mm sont dans les normes.

I.3.4- Le zinc

Pour la fraction du fond, le total des teneurs en Zn contenues dans les différents phases, atteint des maximaux de 4867,67mg/kg pour le sol S1, de 1859,34 mg/kg pour le sol S2 et de 2456,55mg/kg pour le sol S3.

Ce qui concerne la fraction 2mm, le total des teneurs en Zn contenues dans les différentes phases, atteint des maximaux de 3633,11mg/kg pour le sol S1, de 1419,78mg/kg pour le sol S2 et de 1631,86mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs dépassent le seuil limite des normes définies dans le tableau 2 dans les fractions du fond et 2mm des sols S1, S2 et S3 dans toutes les saisons des années 2006 à 2010.

Donc les fractions du fond et 0,2mm sont fortement polluées par le zinc dans toutes les saisons de l'année 2006 à 2010.

Par ailleurs, cette pollution est nettement plus importante dans la fraction du fond que celle trouvée dans les fractions 0,2mm et 2mm.

I.3.5- Le nickel

Pour la fraction du fond, le total des teneurs en Ni contenues dans les différents phases, atteint des maximaux de 291,98mg/kg pour le sol S1, de 180,58mg/kg pour le sol S2 et de 149,82mg/kg pour le sol S3. Ces valeurs dépassent le seuil limite des normes définies dans le tableau 2 dans la saison de printemps de l'année 2006 et dans toutes les saisons des années 2007 à 2010 pour le sol S1, dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2006 et dans toutes les saisons des années 2007 à 2010 pour le sol S2 et pour le sol S3, dans la saison de printemps de l'année 2006, dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2007 et dans toutes les saisons des années 2008 à 2010. Pour la fraction 2mm, le total des teneurs en Ni contenues dans les différentes phases, allant avec des maximaux de 120,77mg/kg pour le sol S1, de 72,37mg/kg pour le sol S2 et de 69,76mg/kg pour le sol S3. Ces valeurs dépassent le seuil limite des normes définie dans le tableau 2 dans la saison d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010 pour le sol S1, dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010 pour le sol S2 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010 pour le sol S3. D'après ces résultats, nous constatons une pollution par le Ni bien plus grande dans la fraction du fond que celle trouvée dans les fractions 0,2mm et 2mm.

I.3.6- Le cobalt

Pour la fraction du fond, le total des teneurs en Co contenues dans les différentes phases, varient avec des maximaux de 318,34mg/kg pour le sol S1, de 201,19mg/kg pour le sol S2 et de 146,86mg/kg pour le sol S3. Ces valeurs dépassent le seuil limite des normes définies dans le tableau 2 dans toutes les saisons des années 2008 à 2010 pour le sol S1, dans toutes les saisons des

années 2007 à 2010 pour le sol S2 et dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010 pour le sol S3.

Quant à la fraction 2mm, le total des teneurs en Co contenues dans les différentes phases, varient avec des maximaux de 152,92mg/kg pour le sol S1, de 103,83mg/kg pour le sol S2 et de 91,61mg/kg pour le sol S3. Ces valeurs dépassent le seuil limite des normes définies dans le tableau 2 dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010 pour les sols S1 et S3 et dans toutes les saisons des années 2007 à 2010 pour le sol S2.

Ces résultats nous montrent l'existence d'une pollution par le Co dans les fractions du fond et 2mm. Cette pollution est plus élevée dans la fraction du fond que celle trouvée dans les fractions 0,2mm et 2mm.

I.3.7- Le chrome

Pour la fraction du fond, le total des teneurs en Cr contenues dans les différentes phases, atteint un maximum de 157,71mg/kg pour le sol S1, de 162,33/kg pour le sol S2 et de 154,66mg/kg pour le sol S3. Ces valeurs dépassent le seuil limite des normes définies dans le tableau 2 dans la saison d'été de l'année 2010 pour le sol S1, dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2010 pour le sol S2 et durant la saison de printemps de l'année 2010 pour le sol S3.

Ainsi pour la fraction 2mm, le total des teneurs en Cr contenues dans les différentes phases, atteint des maximaux de 56,85mg/kg pour le sol S1, de 54,31/kg pour le sol S2 et de 67,96mg/kg pour le sol S3. Dans ce cas ces valeurs sont dans les normes.

On enregistre une très faible pollution par le Cr uniquement dans la fraction du fond des sols S1, S2 et S3.

I.3.8- Le éléments majeurs

a- Le manganèse

Pour la fraction du fond, le total des teneurs en Mn contenues dans les différents phases, allant avec des maximaux de 316,54mg/kg pour le sol S1, de 324,64mg/kg pour le sol S2 et de 371,88mg/kg pour le sol S3. Ces valeurs dépassent le seuil limite des normes définies dans le tableau 2 dans la saison de printemps de l'année 2008 et dans les saisons d'hiver et de printemps des année 2009 et 2010 pour le sol S1, dans la saison de printemps des années 2009 et 2010 pour le sol S2 et dans la saison de printemps de l'année 2007 à 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010 pour le sol S3.

Concernant la fraction 2mm, le total des teneurs en Mn contenues dans les différentes phases, atteint des maximaux de 169,94mg/kg pour le sol S1, de 121,53mg/kg pour le sol S2 et de 183,49mg/kg pour le sol S3.

Par conséquent, on observe une pollution par le Mn seulement dans la fraction du fond.

b- Le fer

Pour la fraction du fond, le total des teneurs en Fe contenues dans les différentes phases, allant avec des maximaux de 39877,45mg/kg pour le sol S1, de 24730,84mg/kg pour le sol S2 et de 20085,29mg/kg pour le sol S3.

Quant à la fraction 2mm, le total des teneurs en Fe contenues dans les différentes phases, atteint des maximaux de 30768,11 mg/kg pour le sol S1, de 20226,76mg/kg pour le sol S2 et de 13188,63 mg/kg pour le sol S3.

Ces valeurs sont en dessous du seuil limite des normes définies dans le tableau 6 dans la fraction du fond dans la saison d'hiver de l'année 2006 pour le sol S1 et dans le sol S3, pour la fraction 2mm dans toutes les saisons des années 2006 à 2010 des sols S1, S2 et S3, donc le fer ne pose pas de problème de toxicité mais de carences.

Conclusion

Pour conclure, on peut dire qu'il y a une différence de concentrations observables entre les diverses fractions. Ces résultats montrent un enrichissement en polluants dans la fraction fine <20µm (le fond).

Cette étude des métaux lourds au sein de diverses fractions granulométriques confirme les résultats obtenus jusqu'à présent dans la littérature et selon lesquels la pollution est essentiellement concentrée dans les fractions les plus fines ^[95].

- Autrement dit, les matières organiques sont d'autant plus riches en métaux que le gradient métallique augmente dans les sols.

- Nous avons ici une autre traduction de cette différence à travers la répartition des métaux dans les fractions granulométriques et qui pourrait traduire un fonctionnement biogéochimique légèrement différent.

Cette réactivité inversement proportionnelle à la taille des particules pourrait aller dans le sens de facteurs abiotiques contrôlant la fixation de métaux lourds sur des particules organiques réactives, et d'autant plus réactives qu'elles sont plus fines.

A ce titre, les matières organiques peuvent être considérées comme des phases de retient d'ETM dans les sols.

- La fraction du sol la plus fine, de granulométrie inférieure à 20µm (le fond), contient les argiles dont la propriété est d'échanger facilement les cations, et notamment les cations métalliques, ainsi que les oxydes de fer et de manganèse, suivi par la fraction du sol, de granulométrie 0,2mm comprend les constituants parmi les plus réactifs des sols, tels que les argiles, un mélange de

matières organiques à différents degrés d'évolutions ainsi que des constituants minéraux (oxyhydroxydes), dont la teneurs en métaux lourds est importantes.

- Le Cobalt accompagne étroitement le chrome et le fer, et se trouve donc, en conséquence, fortement corrélé à l'argile, au cuivre et au nickel. Il semble tout à fait indifférent aux matières organiques.

La fraction du sol de granulométrie 2mm, est la fraction présentant les concentrations les moins élevées, donc la moins pollué en métaux lourds.

Par contre, l'accroissement des teneurs en métaux dans les fractions les plus grossières (2mm) peut s'interpréter au moins par deux phénomènes. La relation avec le C organique semblerait indiquer la présence de débris organiques grossiers riches en métaux. Cependant on ne peut exclure la présence de C«fossile», dont les teneurs en métaux peuvent être importantes.

I.4- Extraction des métaux lourds avec les solutions salines (NH₄OAC, NaNO₃, CaCl₂ et NH₄NO₃, le complexe (EDTA) et l'acide (HCl dilué)

I.4.1- Variation des teneurs des métaux lourds de l'année 2006 jusqu'à l'année 2010.

On désigne par métaux biodisponibles la fraction de métaux facilement assimilables par les plantes. Ici, cette fraction est approchée par la fraction de métaux extraits par les solutions salines (NH₄OAC, NaNO₃, CaCl₂ et NH₄NO₃), l'acide HCl dilué et le complexe EDTA.

Les résultats ces extractions de l'année 2006 jusqu'à l'année 2010 sont classées dans les tableaux (166-210) et illustré sous forme d'histogrammes dans les figures (91-99):

Tableau 166: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'hiver de l'année 2006 du sol S1.

ETM Extractant	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,50 ±0,05	6,93 ±0,64	9,74 ±0,85	49,55 ±1,60	0,085 ±0,009	1,50 ±0,15	12,33 ±0,90	60 ±0,05	2,95 ±0,50
HCl	00	0,27 ±0,025	3,55 ±0,50	14,21 ±1,14	0,026 ±0,027	0,09 ±0,009	3 ±0,50	22 ±1,20	1 ±0,10
CaCl₂	0,35 ±0,035	4,30 ±0,55	7,53 ±0,73	43,11 ±1,55	0,078 ±0,008	1,66 ±0,17	9,55 ±0,80	77 ±1,85	2,17 ±0,25
NH₄OAC	0,21 ±0,021	5,58 0,58±	7,98 ±0,77	18,50 ±1,18	0,058 ±0,006	0,61 ±0,06	7,90 ±0,74	67 ±0,75	2,88 ±0,48
NH₄NO₃	0,11 ±0,011	4,95 ±0,56	8,48 ±0,78	16,47 ±1,16	0,048 ±0,005	0,88 ±0,087	8,86 ±0,78	20 ±1,20	2,11 ±0,23
Na NO₃	0,09 ±0,009	5 ±0,57	8,90 ±0,79	43,10 ±1,55	0,10 ±0,01	0,70 ±0,072	6,50 ±0,64	70 ±1,79	1,55 ±0,15

MS: matière sèche

Tableau 167: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps de l'année 2006 du sol S1.

ETM Extractant	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,46 ±0,05	7,11 ±0,73	10,14 ±0,85	49,77 ±1,60	0,094 ±0,009	1,68 ±0,16	13,50 ±0,94	79 ±1,88	3,41 ±0,51
HCl	00	0,29 ±0,50	3,57 ±0,52	14,66 ±0,97	0,03 ±0,03	0,11 ±0,01	3,44 ±0,52	43 ±1,54	1,34 ±0,13
CaCl₂	0,30 ±0,03	4,35 ±0,55	7,59 ±0,73	43,90 ±1,54	0,08 ±0,008	1,77 ±0,17	10,55 ±0,85	90 ±1,96	2,48 ±0,46
NH₄OAC	0,19 ±0,19	5,64 ±0,57	8,06 ±0,78	18,84 ±1,18	0,06 ±0,006	0,63 ±0,06	8 ±0,77	70 ±1,78	3,12 ±0,50
NH₄NO₃	0,09 ±0,009	5,06 ±0,10	8,77 ±0,78	16,86 ±1,16	0,05 ±0,005	0,92 ±0,09	9,33 ±0,83	56 ±1,63	2,52 ±0,46
Na NO₃	0,07 ±0,007	5,10 ±0,57	9,43 ±0,83	43,55 ±1,54	0,15 ±0,014	0,75 ±0,074	6,94 ±0,70	88 ±1,93	2 ±0,20

Tableau 168: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2006 du sol S1

ETM Extractant	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,48 ±0,05	7,31 ±0,73	10,76 ±0,86	52,25 ±1,60	0,97 ±0,093	1,72 ±0,17	14,33 ±1	90 ±1,96	3,88 ±0,52
HCl	00	0,33 ±0,50	3,83 ±0,55	16 ±1,16	0,04 ±0,04	0,13 ±0,92	4,10 ±0,55	45 ±1,57	1,77 ±0,17
CaCl₂	0,34 ±0,05	4,51 ±0,55	7,88 ±0,74	49,67 ±1,60	0,09 ±0,009	1,90 ±0,19	11,66 ±0,88	100 ±2	2,63 ±0,47
NH₄OAC	0,20 ±0,05	5,75 ±0,58	8,50 ±0,78	20,25 ±1,20	0,07 ±0,007	0,67 ±0,64	8,82 ±0,78	80 ±1,90	3,44 ±0,51
NH₄NO₃	0,10 ±0,05	5,15 ±0,57	8,93 ±0,80	18,22 ±1,18	0,06 ±0,006	0,98 ±0,84	10 ±0,85	67 ±1,75	2,95 ±0,50
Na NO₃	0,08 ±0,05	5,20 ±0,57	9,76 ±0,83	49,33 ±1,60	0,21 ±0,02	0,79 ±0,075	7,15 ±0,72	96 ±1,98	2,33 ±0,40

Tableau 169: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'hiver de l'année 2007 du sol S1.

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,54 ±0,56	7,50 ±0,73	11,38 ±0,89	60,11 ±1,68	0,10 ±0,01	1,96 ±0,19	15,64 ±0,15	65 ±0,05	4 ±0,56
HCl	00	0,35 ±0,03	3,86 ±0,53	17,32 ±1,17	0,051 ±0,05	0,15 ±0,15	4,54 ±0,56	28 ±0,05	1,87 ±0,18
CaCl₂	0,37 ±0,04	4,55 ±0,53	7,91 ±0,76	56,66 ±1,64	0,094 ±0,009	2,11 ±0,28	12,22 ±0,80	79 ±0,05	3,10 ±0,50
NH₄OAC	0,23 ±0,024	5,90 ±0,59	8,64 ±0,78	18,44 ±1,18	0,076 ±0,007	0,75 ±0,071	9,11 ±0,81	70 ±1,78	3,90 ±0,52
NH₄NO₃	0,16 ±0,16	5,19 ±0,57	9,11 ±0,80	15,77 ±1,15	0,065 ±0,06	1 ±0,10	10,59 ±0,85	35 ±1,51	3,20 ±0,50
Na NO₃	0,12 ±0,90	5,22 ±0,58	9,92 ±0,84	54,88 ±1,63	0,26 ±0,35	0,86 ±0,78	7,88 ±0,75	76 ±1,84	2,77 ±0,48

Tableau 170: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps 2007 du sol S1.

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,51 ±0,05	7,78 ±0,76	11,87 ±0,88	67,44 ±1,75	0,15 ±0,014	2 ±0,20	16,28 ±1,16	84 ±1,90	4,66 ±1,90
HCl	00	0,39 ±0,55	3,89 ±0,53	20,88 ±1,20	0,061 ±0,06	0,18 ±0,017	5,18 ±0,57	47 ±1,58	2,12 ±1,90
CaCl₂	0,34 ±0,033	4,58 ±0,56	8 ±0,77	63,65 ±1,71	0,12 ±0,01	2,53 ±0,40	13,22 ±0,94	95 ±1,98	3,42 ±1,90
NH₄OAC	0,21 ±0,02	6,08 ±0,61	8,91 ±0,79	21,77 ±1,25	0,08 ±0,08	0,81 ±0,08	9,78 ±0,83	74 ±1,82	4,24 ±1,90
NH₄NO₃	0,13 ±0,012	5,24 ±0,57	9,54 ±0,83	19,88 ±1,19	0,072 ±0,007	1,13 ±0,10	11,44 ±0,88	60 ±1,70	3,55 ±1,90
Na NO₃	0,10 ±0,01	5,30 ±0,57	10,11 ±0,85	63 ±1,71	0,30 ±0,50	0,90 ±0,09	8,30 ±0,77	91 ±1,97	3 ±1,90

Tableau 171: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2007 du sol S1

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,52 ±0,05	7,93 ±0,79	12,03 ±0,90	72,10 ±1,79	0,20 ±0,02	2,08 ±0,20	16,70 ±1,16	94 ±1,97	4,85 ±0,57
HCl	00	0,42 ±0,04	3,92 ±0,55	25,77 ±1,45	0,068 ±0,07	0,21 ±0,02	5,66 ±0,57	50 ±1,60	2,48 ±0,48
CaCl₂	0,35 ±0,035	4,63 ±0,56	8,32 ±0,78	70 ±1,78	0,17 ±0,01	2,74 ±0,42	13,73 ±0,94	103 ±2	3,77 ±0,51
NH₄OAC	0,22 ±0,021	6,20 ±0,62	9,13 ±0,82	30,44 ±1,50	0,086 ±0,085	0,85 ±0,08	10 ±0,85	82 ±1,90	4,67 ±0,56
NH₄NO₃	0,14 ±0,014	5,31 ±0,57	9,79 ±0,84	28,55 ±1,48	0,08 ±0,0076	1,17 ±0,10	11,85 ±0,88	70 ±1,80	3,96 ±0,54
Na NO₃	0,11 ±0,01	5,37 ±0,58	10,77 ±0,86	67,23 ±1,75	0,35 ±0,52	0,95 ±0,09	8,90 ±0,80	98 ±1,97	3,27 ±0,50

Tableau 172: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'hiver de l'année 2008 du sol S1

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	NI	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,56 ±0,055	8,23 ±0,77	12,40 ±0,90	90,50 ±1,97	0,24 ±0,023	2,34 ±0,30	17,28 ±1,17	68 ±1,77	5 ±0,56
HCl	00	0,47 ±0,05	3,94 ±0,54	2,55 ±0,45	0,075 ±0,007	0,25 ±0,02	5,87 ±0,59	30 ±1,50	1,90 ±0,19
CaCl₂	0,40 ±0,04	4,74 ±0,55	8,79 ±0,78	88,33 ±1,94	0,20 ±0,02	3,21 ±0,51	14,14 ±1	85 ±1,91	3,55 ±0,52
NH₄OAC	0,27 ±0,47	6,50 ±0,63	9,51 ±0,83	42,11 ±1,55	0,09 ±0,01	0,90 ±0,09	10,55 ±0,86	73 ±1,81	1 ±0,10
NH₄NO₃	0,18 ±0,018	5,39 ±0,57	10 ±0,85	40,44 ±1,54	0,088 ±0,009	1,42 ±0,14	12,06 ±0,90	40 ±1,54	3,95 ±0,55
Na NO₃	0,15 ±0,015	5,40 ±0,57	11,15 ±0,90	82,61 ±1,90	0,38 ±0,04	1,04 ±0,10	9 ±0,80	80 ±1,90	3,29 ±0,50

Tableau 173: Les teneurs en des métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps de l'année 2008 du sol S1

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,53 ±0,054	8,48 ±0,77	12,78 ±0,92	110 ±2,12	0,29 ±0,03	2,56 ±0,41	18,50 ±1,18	88 ±1,93	5,26 ±0,58
HCl	00	0,50 ±0,05	4,22 ±0,55	3,88 ±0,52	0,08 ±0,008	0,29 ±0,33	5,90 ±0,60	50 ±1,60	2,19 ±0,19
CaCl₂	0,37 ±0,038	4,93 ±0,56	9,77 ±0,84	100,33 ±2	0,24 ±0,023	3,51 ±0,51	14,77 ±1,14	100 ±2	4 ±0,56
NH₄OAC	0,24 ±0,025	6,84 ±0,67	9,90 ±0,85	60,41 ±1,68	0,10 ±0,01	1 ±0,10	11,11 ±0,88	80 ±1,90	1,10 ±0,10
NH₄NO₃	0,14 ±0,014	5,44 ±0,57	10,33 ±0,85	59,77 ±1,69	0,088 ±0,009	1,48 ±0,14	12,88 ±0,92	66 ±1,74	4,22 ±0,56
Na NO₃	0,12 ±0,012	5,48 ±0,57	11,90 ±0,89	97,66 ±1,98	0,40 ±0,04	1,23 ±0,12	9,28 ±0,81	96 ±1,98	3,80 ±0,53

Tableau 174: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2008 du sol S1

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,54 ±0,58	8,77 ±0,77	12,90 ±0,92	125,25 ±2,30	0,33 ±0,03	2,88 ±0,48	18,94 ±1,18	98 ±1,98	5,75 ±0,56
HCl	00	0,54 ±0,05	4,30 ±0,56	4,5 ±0,56	0,087 ±0,009	0,32 ±0,50	5,98 ±0,60	56 ±1,63	2,5 ±0,45
CaCl₂	0,39 ±0,54	5 ±0,05	9,95 ±0,85	118,45 ±2,20	0,28 ±0,03	3,66 ±0,53	15,33 ±1,15	110 ±2,11	4,33 ±0,56
NH₄OAC	0,26 ±0,025	6,96 ±0,70	10 ±0,85	69,33 ±1,78	0,15 ±0,014	1,11 ±0,10	11,53 ±0,88	88 ±1,94	1,48 ±0,14
NH₄NO₃	0,16 ±0,017	5,49 ±0,57	10,50 ±0,86	68,73 ±1,78	0,10 ±0,01	1,52 ±0,15	13,08 ±0,93	73 ±1,82	4,88 ±0,56
Na NO₃	0,14 ±0,015	5,53 ±0,52	11,96 ±0,52	110,59 ±2,11	0,44 ±0,043	1,32 ±0,13	9,50 ±0,83	104 ±2	4,13 ±0,56

Tableau 175: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'hiver de l'année 2009 du sol S1.

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,60 ±0,06	8,96 ±0,79	13,23 ±0,93	150,25 ±2,50	0,38 ±0,035	3,20 ±0,51	19,42 ±1,19	75 ±1,83	6 ±0,60
HCl	00	0,58 ±0,06	4,36 ±0,56	3,11 ±0,50	0,095 ±0,0092	0,35 ±0,52	6,08 ±0,60	40 ±1,54	2,55 ±0,40
CaCl₂	0,45 ±0,045	5,55 ±0,57	10,14 ±0,85	120,53 ±2,20	0,30 ±0,03	3,80 ±0,53	15,90 ±1,15	90 ±1,97	4,69 ±0,55
NH₄OAC	0,33 ±0,033	7,13 ±0,72	10,25 ±0,85	29,55 ±1,50	0,20 ±0,02	1,14 ±0,14	11,77 ±0,89	75 ±1,83	5,80 ±0,58
NH₄NO₃	0,22 ±0,022	5,79 ±0,58	10,90 ±0,86	30,44 ±1,50	0,17 ±0,016	1,60 ±0,16	13,84 ±0,93	44 ±1,56	5,03 ±0,57
Na NO₃	0,18 ±0,018	5,83 ±0,58	12 ±0,90	108,77 ±2	0,49 ±0,05	1,38 ±0,13	9,71 ±0,83	85 ±1,93	4,40 ±0,56

Tableau 176: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps de l'année 2009 du sol S1

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,56 ±0,055	9,22 ±0,81	13,55 ±0,94	157,33 ±2,55	0,40 ±0,04	3,38 ±0,53	19,87 ±1,19	93 ±1,98	6,10 ±0,61
HCl	00	0,60 ±0,06	4,40 ±0,55	4,66 ±0,56	0,1 ±0,01	0,41 ±0,04	6,44 ±0,64	54 ±1,62	2,58 ±0,40
CaCl₂	0,40 ±0,04	5,59 ±0,60	10,53 ±0,85	128 ±2,27	0,33 ±0,03	4,11 ±0,55	16,21 ±1,16	106 ±2	4,77 ±0,55
NH₄OAC	0,30 ±0,03	7,33 ±0,72	10,33 ±0,85	42,77 ±1,54	0,25 ±0,03	1,20 ±0,12	11,90 ±0,89	84 ±1,92	5,89 ±0,58
NH₄NO₃	0,18 ±0,018	5,84 ±0,58	10,98 ±0,86	40,85 ±1,54	0,20 ±0,02	1,68 ±0,16	14,14 ±1	70 ±1,78	5,13 ±0,57
Na NO₃	0,14 ±0,014	5,96 ±0,60	12,24 ±0,90	118,88 ±2,17	0,52 ±0,05	1,45 ±0,14	9,87 ±0,83	100 ±2	4,55 ±0,55

Tableau 177 : Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2009 du sol S1

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,58 ±0,06	9,52 ±0,83	13,79 ±0,93	170,50 ±2,70	0,43 ±0,04	3,87 ±0,53	20 ±1,20	100 ±2	6,33 ±0,63
HCl	00	0,64 ±0,63	4,44 ±0,55	5,39 ±0,57	0,11 ±0,01	0,43 ±0,55	6,82 ±0,68	60 ±1,68	2,62 ±0,40
CaCl₂	0,43 ±0,042	5,63 ±0,57	10,60 ±0,85	160,45 ±2,60	0,37 ±0,04	4,68 ±0,55	16,55 ±1,16	116 ±2,16	4,90 ±0,56
NH₄OAC	0,31 ±0,03	7,51 ±0,73	10,37 ±0,85	78,55 ±1,86	0,29 ±0,03	1,27 ±0,12	12 ±0,90	90 ±1,97	5,97 ±0,60
NH₄NO₃	0,19 ±0,019	5,90 ±0,60	11,09 ±0,88	77,33 ±1,85	0,23 ±0,023	1,79 ±0,17	14,50 ±1	75 ±1,84	5,23 ±0,57
Na NO₃	0,16 ±0,016	6 ±0,60	12,45 ±0,91	150,90 ±2,50	0,54 ±0,05	1,66 ±0,16	10,33 ±0,85	108 ±2	4,66 ±0,56

Tableau 178: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'hiver de l'année 2010 du sol S1

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,75 ±0,07	9,78 ±0,83	13,90± 0,93	160,66 ±2,60	0,45 ±0,05	4,23 ±0,54	20,66 ±1,20	80 ±1,90	6,68 ±0,64
HCl	00	0,68 ±0,07	4,49 ±0,55	4,55 ±0,56	0,13 ±0,01	0,46 ±0,05	6,91 ±0,69	45 ±1,56	2,70 ±0,33
CaCl₂	0,58 ±0,06	5,69 ±0,57	10,68± 0,85	151,80 ±2,50	0,40 ±0,04	4,83 ±0,56	17,24 ±1,17	96 ±1,98	5 ±0,57
NH₄OAC	0,39 ±0,04	7,57 ±0,73	10,42± 0,85	62,54 ±1,70	0,32 ±0,03	1,40 ±0,14	12,65 ±0,90	80 ±1,90	6,07 ±0,60
NH₄NO₃	0,27 ±0,026	5,95 ±0,60	11,18± 0,87	50,28 ±1,60	0,28 ±0,03	1,90 ±0,20	14,95 ±1	48 ±1,58	5,46 ±0,57
Na NO₃	0,24 ±0,023	6,18 ±0,61	12,69± 0,90	120,73 ±2,20	0,56 ±0,06	1,85 ±0,18	10,77 ±0,85	90 ±1,97	4,76 ±0,55

Tableau 179 : Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps 2010 du sol S1.

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,70 ±0,07	9,87 ±0,83	14,11 ±1	182,44 ±2,80	0,48 ±0,05	4,88 ±0,55	20,74 ±1,20	100 ±2	6,80 ±0,64
HCl	00	0,71 ±0,07	4,53 ±0,55	5,33 ±0,57	0,18 ±0,018	0,51 ±0,05	6,97 ±0,69	58 ±1,67	2,73 ±0,40
CaCl₂	0,54 ±0,055	5,74 ±0,57	10,88 ±0,85	160,19 ±2,70	0,44 ±0,55	5,86 ±0,58	18,65 ±1,18	110 ±2,10	5,22 ±0,57
NH₄OAC	0,35 ±0,034	7,63 ±0,75	10,56 ±0,85	70,93 ±1,76	0,35 ±0,034	1,52 ±0,15	12,92 ±0,90	90 ±1,97	6,41 ±0,64
NH₄NO₃	0,24 ±0,025	6,04 ±0,60	11,45 ±0,87	61,50 ±1,70	0,30 ±0,03	2 ±0,20	15,27 ±1,15	74 ±1,82	5,74 ±0,57
Na NO₃	0,20 ±0,02	6,22 ±0,62	12,80 ±0,90	149,77 ±2,50	0,59 ±0,06	1,94 ±0,19	11 ±0,87	107 ±2	4,93 ±0,56

Tableau 180: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2010 du sol S1

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,80 ±0,08	9,95 ±0,64	15 ±1,15	190 ±2,95	0,50 ±0,05	5,77 ±0,57	21,50 ±1,23	104 ±2	6,94 ±0,70
HCl	00	0,76 ±0,64	4,58 ±0,55	6,74 ±0,64	0,20 ±0,02	0,55 ±0,055	7,05 ±0,70	64 ±1,71	2,77 ±0,40
CaCl₂	0,55 ±0,056	5,80 ±0,64	11 ±0,87	183,21 ±2,80	0,48 ±0,05	6,90 ±0,70	19,44 ±1,19	119 ±2,19	5,38 ±0,57
NH₄OAC	0,37 ±0,03	7,69 ±0,64	10,89 ±0,85	89,67 ±1,96	0,40 ±0,04	1,64 ±0,16	13,10 ±0,93	93 ±1,98	6,50 ±0,64
NH₄NO₃	0,26 ±0,025	6,20 ±0,64	11,76 ±0,88	85 ±1,93	0,34 ±0,03	2,59 ±0,39	16,88 ±1,16	79 ±1,87	5,90 ±0,60
Na NO₃	0,22 ±0,020	6,28 ±0,64	13,12 ±0,94	166,90 ±2,63	0,62 ±0,06	2,22 ±0,25	11,19 ±0,87	110 ±2,10	5 ±0,57

Tableau 181: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'automne de l'année 2006 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,40 ±0,04	1,55 ±0,15	9,75 ±0,84	94,55 ±1,98	0,083 ±0,84	1,55 ±0,84	8,66 ±0,78	52,88 ±1,70	4,77 ±0,55
HCl	0,21 ±0,020	3,23 ±0,51	4,21 ±0,55	13,65 ±0,93	0,01 ±0,84	0,042 ±0,84	3,55 ±0,53	42,55 ±1,70	2,34 ±0,37
CaCl₂	0,30 ±0,03	1 ±0,10	7,77 ±0,75	90,43 ±1,97	0,05 ±0,84	1,88 ±0,84	7,75 ±0,75	79,89 ±1,88	3,55 ±0,53
NH₄OAC	0,25 ±0,024	0,92 ±0,09	6,42 ±0,64	62,77 ±1,70	0,031 ±0,84	0,77 ±0,84	6,80 ±0,67	54,77 ±1,62	3,70 ±0,54
NH₄NO₃	0,20 ±0,02	1,11 ±0,10	6,62 ±0,65	63,88 ±1,71	0,024 ±0,84	0,46 ±0,84	7,23 ±0,72	60,66 ±1,70	2,90 ±0,49
Na NO₃	0,23 ±0,021	1,50 ±0,15	8,55 ±0,78	89,78 ±1,94	0,092 ±0,84	0,90 ±0,84	5,60 ±0,57	76,10 ±1,83	3 ±0,50

Tableau 182: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps de l'année 2006 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,48 ±0,05	1,70 ±0,18	10,10 ±0,85	104,55 ±2	0,088 ±0,009	1,76 ±0,17	8,90 ±0,79	54,33 ±1,62	4,90 ±0,56
HCl	0,21 ±0,02	3,31 ±0,51	4,24 ±0,56	13,65 ±0,93	0,012 ±0,001	0,045 ±0,004	3,57 ±0,53	46,70 ±1,57	2,37 ±0,30
CaCl₂	0,33 ±0,032	1,15 ±0,15	7,80 ±0,73	93,43 ±1,98	0,054 ±0,005	2,04 ±0,20	7,83 ±0,75	82,45 ±1,90	3,75 ±0,53
NH₄OAC	0,32 ±0,03	1,10 ±0,10	6,44 ±0,64	62,77 ±1,72	0,033 ±0,003	0,90 ±0,09	6,88 ±0,65	56,55 ±1,64	3,96 ±0,55
NH₄NO₃	0,22 ±0,02	1,21 ±0,23	6,70 ±0,65	63,88 ±1,73	0,026 ±0,002	0,49 ±0,05	7,25 ±0,73	64,80 ±1,73	2,97 ±0,49
Na NO₃	0,30 ±0,03	1,63 ±0,16	9,16 ±0,80	90,78 ±1,97	0,097 ±0,001	0,97 ±0,01	5,68 ±0,57	80,46 ±1,90	3,22 ±0,51

Tableau 183: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2006 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,50 ±0,05	1,75 ±0,17	10,90 ±0,85	110 ±2,10	0,091 ±0,009	1,81 ±0,18	9,18 ±0,82	57,70 ±1,65	5,09 ±0,57
HCl	0,22 ±0,021	3,50 ±0,50	4,28 ±0,56	33,5 ±1,50	0,013 ±0,001	0,048 ±0,005	3,60 ±0,53	48,45 ±1,58	2,40 ±0,40
CaCl₂	0,36 ±0,035	1,23 ±0,12	7,92 ±0,73	102,11 ±2	0,058 ±0,006	2,38 ±0,30	7,90 ±0,77	86,55 ±1,93	3,88 ±0,54
NH₄OAC	0,33 ±0,031	1,22 ±0,12	6,50 ±0,63	75,55 ±1,84	0,037 ±0,004	0,95 ±0,09	6,95 ±0,70	60,83 ±1,70	4 ±0,56
NH₄NO₃	0,24 ±0,023	1,33 ±0,13	6,75 ±0,64	64,66 ±1,73	0,028 ±0,003	0,55 ±0,05	7,90 ±0,76	66,77 ±1,75	3,11 ±0,51
Na NO₃	0,34 ±0,033	1,72 ±0,17	9,66 ±0,83	100,35 ±2	0,10 ±0,01	1 ±0,10	5,77 ±0,57	84,90 ±1,94	3,50 ±0,52

Tableau 184: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'automne de l'année 2007 du sol S2.

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,65 ±0,06	3,88 ±0,55	11,88 ±0,88	117,73 ±2,16	0,098 ±0,009	2,11 ±0,23	9,50 ±0,83	60,44 ±1,70	5,41 ±0,57
HCl	0,25 ±0,02	2,62 ±0,41	4,30 ±0,56	37,88± 1,52	0,016 ±0,001	0,050 ±0,005	3,65 ±0,55	50,11 ±1,60	2,45 ±0,40
CaCl₂	0,40 ±0,04	3,15 ±0,50	7,98 ±0,77	105,90 ±2	0,062 ±0,006	2,88 ±0,40	8 ±0,77	89,60 ±1,96	3,93 ±0,55
NH₄OAC	0,39 ±0,04	3,30 ±0,51	6,53 ±0,64	79,56± 1,90	0,040 ±0,004	1,03 ±0,10	7,06 ±0,70	62,15 ±1,70	4,35 ±0,56
NH₄NO₃	0,30 ±0,03	2,66 ±0,42	6,80 ±0,65	70,77± 1,80	0,033 ±0,003	0,59 ±0,06	7,97 ±0,77	68,80 ±1,77	3,50 ±0,53
Na NO₃	0,34 ±0,03	2,33 ±0,44	10,17 ±1,85	103,11 ±2	0,15 ±0,014	1,22 ±0,12	5,88 ±0,58	87,26 ±1,95	3,77 ±0,54

Tableau 185: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps de l'année 2007 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,70 ±0,07	7 ±0,71	12,60 ±0,90	120,62 ±2,20	0,10 ±0,01	2,50 ±0,41	9,86 ±0,82	62,50 ±1,70	5,88 ±0,58
HCl	0,26 ±0,026	2,80 ±0,48	4,44 ±0,56	45,90 ±1,56	0,02 ±0,002	0,054 ±0,005	3,78 ±0,54	52,30 ±1,60	2,60 ±0,43
CaCl₂	0,45 ±0,043	5,85 ±0,58	8,13 ±0,77	110,69 ±2,10	0,071 ±0,007	3,10 ±0,50	8,33 ±0,77	94,55 ±1,98	4 ±0,55
NH₄OAC	0,42 ±0,04	6,10 ±0,63	6,56 ±0,64	85,88 ±1,95	0,043 ±0,004	1,24 ±0,12	7,27 ±0,72	65,90 ±1,74	4,54 ±0,56
NH₄NO₃	0,33 ±0,03	4,70 ±0,56	6,84 ±0,66	74,80 ±1,82	0,038 ±0,004	0,66 ±0,065	8,11 ±0,77	70,89 ±1,80	3,71 ±0,54
Na NO₃	0,36 ±0,035	4,80 ±0,56	11,16 ±0,87	106,50 ±2	0,21 ±0,02	1,45 ±0,14	6,26 ±0,62	90,66 ±1,97	3,84 ±0,56

Tableau 186: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2007 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,77 ±0,076	7,50 ±0,73	13,15 ±0,94	124,33 ±2,20	0,16 ±0,015	2,85 ±0,42	10,37 ±0,85	65,85 ±1,73	6,05 ±0,60
HCl	0,27 ±0,026	2,85 ±0,48	4,47 ±0,56	46,77 ±1,56	0,028 ±0,003	0,057 ±0,006	3,89 ±0,54	58,77 ±1,65	2,64 ±0,45
CaCl₂	0,48 ±0,045	6 ±0,62	8,25 ±0,77	115,45 ±2,15	0,078 ±0,008	3,42 ±0,54	8,84 ±0,78	100,22 ±2	4,20 ±0,55
NH₄OAC	0,44 ±0,043	6,40 ±1,63	6,60 ±0,66	88,23 ±1,95	0,049 ±0,005	1,50 ±0,15	7,55 ±0,74	68,50 ±1,76	4,80 ±0,56
NH₄NO₃	0,35 ±0,033	5,55 ±0,57	6,84 ±0,68	78,90 ±1,87	0,040 ±0,004	0,73 ±0,07	8,48 ±0,78	77,44 ±1,84	3,85 ±0,54
Na NO₃	0,38 ±0,035	5,90 ±0,60	11,55 ±0,88	109,32 ±2	0,28 ±0,03	1,80 ±0,18	6,35 ±0,64	95,88 ±1,98	3,90 ±0,55

Tableau 187: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'automne de l'année 2008 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,80 ±0,08	8,34 ±0,77	13,84 ±0,94	130,67 ±2,26	0,20 ±0,02	3 ±0,50	10,88 ±0,85	67,90 ±1,74	6,66 ±0,63
HCl	0,29 ±0,03	2,90 ±0,49	4,50 ±0,55	48,80 ±1,58	0,031 ±0,003	0,06 ±0,006	3,92 ±0,55	60,44 ±1,70	2,69 ±0,41
CaCl₂	0,50 ±0,05	7,30 ±0,72	8,66 ±0,78	120,11 ±2,18	0,08 ±0,008	3,86 ±0,55	9 ±0,80	107,21 ±2	4,77 ±0,55
NH₄OAC	0,48 ±0,046	7,80 ±0,74	6,76 ±0,65	90,44 ±1,97	0,053 ±0,005	1,55 ±0,15	7,78 ±0,75	70,78 ±1,77	5,05 ±0,57
NH₄NO₃	0,38 ±0,034	5,80 ±0,58	7,15 ±0,71	80,55 ±1,90	0,044 ±0,004	0,79 ±0,08	8,68 ±0,77	80,33 ±1,90	3,97 ±0,55
Na NO₃	0,40 ±0,037	6 ±0,56	11,80 ±0,88	113,66 ±2,10	0,33 ±0,032	1,88 ±0,18	6,50 ±0,64	98,86 ±2	4 ±0,56

Tableau 188: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps de l'année 2008 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,85 ±0,79	10 ±0,85	13,94 ±1	136,33 ±2,33	0,25 ±0,024	3,14 ±0,50	11,44 ±0,87	70,56 ±1,78	6,75 ±0,65
HCl	0,30 ±0,03	3,10 ±0,50	4,55 ±0,56	50,28 ±2,60	0,036 ±0,004	0,063 ±0,06	3,97 ±0,56	64,28 ±1,72	2,71 ±0,42
CaCl₂	0,55 ±0,052	8,50 ±0,77	8,70 ±0,77	125,28 ±2,20	0,083 ±0,008	4,05 ±0,55	9,55 ±0,82	110,66 ±2,10	4,90 ±0,56
NH₄OAC	0,52 ±0,05	8,76 ±0,78	6,81 ±0,64	94,62 ±1,98	0,058 ±0,006	1,60 ±0,16	7,90 ±0,75	74,77 ±1,81	5,45 ±0,57
NH₄NO₃	0,40 ±0,037	5,86 ±0,58	7,60 ±0,73	85,88 ±1,92	0,049 ±0,005	0,84 ±0,08	8,87 ±0,77	85,33 ±1,92	4,06 ±0,55
Na NO₃	0,44 ±0,04	6,16 ±0,62	12,11 ±0,90	117,66 ±2,10	0,39 ±0,04	1,94 ±0,19	7 ±0,70	100,28 ±2	4,18 ±0,55

Tableau 189: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2008 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Mn	Zn	Co	Ni	Fe	Cr
EDTA	0,88 ±0,09	11,78 ±0,87	14,06 ±1	12,78 ±0,90	140,75 ±2,35	0,30 ±0,90	3,52 ±0,54	74,88 ±1,80	6,94 ±0,70
HCl	0,33 ±0,03	3,70 ±0,51	4,61 ±0,56	4 ±0,55	52,78 ±1,60	0,039 ±0,90	0,068 ±0,007	67,43 ±1,74	2,75 ±0,43
CaCl₂	0,58 ±0,055	8,80 ±0,79	8,79 ±0,78	9,89 ±0,83	130,45 ±2,27	0,088 ±0,90	4,33 ±0,55	118,66 ±2,13	5 ±0,57
NH₄OAC	0,52 ±0,05	9,70 ±0,93	6,90 ±0,63	8 ±0,77	98,77 ±1,98	0,063 ±0,90	1,68 ±0,16	78,50 ±1,86	5,88 ±0,58
NH₄NO₃	0,42 ±0,04	5,90 ±0,60	7,66 ±0,72	9,10 ±0,80	89,50 ±1,96	0,055 ±0,90	0,90 ±0,09	89,21 ±1,96	4,34 ±0,55
Na NO₃	0,47 ±0,04	6,43 ±0,63	12,85 ±0,92	7,83 ±0,76	120,65 ±2,18	0,44 ±0,90	2 ±0,20	105,11 ±2	4,50 ±0,56

Tableau 190: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'automne de l'année 2009 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,90 ±0,80	12,90 ±0,91	14,60 ±1	145,44 ±2,40	0,34 ±0,033	3,89 ±0,54	13,10 ±0,93	77,66 ±1,86	7,04 ±0,70
HCl	0,35 ±0,03	3,74 ±0,51	4,65 ±0,56	54,55 ±1,62	0,04 ±0,004	0,07 ±0,007	4,15 ±0,56	69,50 ±1,75	2,80 ±0,47
CaCl₂	0,60 ±0,06	9 ±0,80	8,80 ±0,78	135,78 ±2,30	0,092 ±0,009	4,78 ±0,56	10,15 ±0,85	121,55 ±2,20	5,21 ±0,57
NH₄OAC	0,55 ±0,05	10,78 ±0,85	7,10 ±0,71	100,48 ±2	0,066 ±0,007	1,72 ±0,17	8,55 ±0,78	80,32 ±1,90	5,97 ±0,59
NH₄NO₃	0,46 ±0,04	6,12 ±0,62	7,70 ±0,73	94,88 ±1,97	0,06 ±0,006	0,98 ±0,097	9,50 ±0,83	91,56± 1,97	4,66 ±0,55
Na NO₃	0,50 ±0,05	6,50 ±0,64	13,14 ±0,93	124,90 ±52,20	0,50 ±0,05	2,11 ±0,28	7,90 ±0,77	110,16 ±2,10	4,83 ±0,55

Tableau 191 : Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps de l'année 2009 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,92 ±0,09	14,55 ±1,14	14,93 ±1	150,13 ±2,50	0,38 ±0,56	4,02 ±0,55	13,80 ±0,94	79,43 ±1,88	7,20 ±0,72
HCl	0,36 ±0,035	3,78 ±0,52	4,72 ±0,56	56,33 ±1,62	0,042 ±0,56	0,074 ±0,007	4,18 ±0,55	70,66 ±1,80	2,85 ±0,42
CaCl₂	0,64 ±0,06	9,63 ±0,82	8,92 ±0,79	140,21 ±2,40	0,096 ±0,56	5,23 ±0,57	10,73 ±0,86	129,44 ±2,23	5,28 ±0,57
NH₄OAC	0,58 ±0,055	11,85 ±0,87	7,44 ±0,73	110,28 ±2,10	0,07 ±0,56	1,80 ±0,18	8,82 ±0,78	85,22 ±1,93	6 ±0,60
NH₄NO₃	0,47 ±0,045	6,50 ±0,63	7,82 ±0,74	96,74 ±2	0,065 ±0,56	1 ±0,10	9,94 ±0,84	95,33 ±1,98	4,82 ±0,55
Na NO₃	0,50 ±0,05	6,88 ±0,64	13,50 ±0,94	128,55 ±0,20	0,53 ±0,56	2,27 ±0,33	8 ±0,77	116,12 ±2,10	4,90 ±0,56

Tableau 192: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2009 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,97 ±0,09	15,16 ±1,15	15,21 ±1,15	154,28 ±2,50	0,41 ±0,04	4,55 ±0,54	14,20 ±1	80,55 ±1,90	7,33 ±0,73
HCl	0,37 ±0,036	3,80 ±0,53	4,91 ±0,57	58,75 ±1,65	0,046 ±0,005	0,078 ±0,007	4,24 ±0,55	74,77 ±1,82	2,89 ±0,44
CaCl₂	0,68 ±0,065	10,19 ±0,85	8,94 ±0,80	145,66 ±2,40	0,10 ±0,01	5,90 ±0,59	11 ±0,87	132,80 ±2,30	5,52 ±0,57
NH₄OAC	0,62 ±0,06	12,50 ±0,90	9,87 ±0,83	115,32 ±2,10	0,075 ±0,007	1,84 ±0,18	8,92 ±0,79	89,10 ±1,94	6,12 ±0,62
NH₄NO₃	0,49 ±0,045	6,76 ±0,64	9,33 ±0,81	100,22 ±2	0,071 ±0,007	1,23 ±0,12	10,08 ±0,85	98,44 ±2	4,94 ±0,50
Na NO₃	0,53 ±0,05	6,98 ±0,70	13,95 ±1	130,33 ±2,30	0,55 ±0,053	2,40 ±0,39	8,33 ±0,77	120,22 ±2,20	5 ±0,50

Tableau 193: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'automne de l'année 2010 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	1 ±0,10	16,24 ±1,16	15,77 ±1,15	158,30 ±2,52	0,44 ±0,54	4,90 ±0,53	15 ±1,15	82,11 ±1,90	7,49 ±0,74
HCl	0,38 ±0,03	3,84 ±0,53	5,11 ±0,57	62,52 ±1,70	0,05 ±0,005	0,08 ±0,008	4,28 ±0,53	76 ±1,83	2,93 ±0,50
CaCl₂	0,75 ±0,073	10,78 ±0,85	9,44 ±0,80	148,55 ±2,45	0,13 ±0,01	6,10 ±0,60	11,50 ±0,87	138,90 ±2,30	5,70 ±0,57
NH₄OAC	0,67 ±0,067	13,43 ±0,93	10,96 ±0,85	120,44 ±2,17	0,08 ±0,008	1,90 ±0,19	9,11 ±0,80	94,55 ±1,97	6,34 ±0,64
NH₄NO₃	0,53 ±0,05	6,80 ±0,71	11,11 ±0,87	105,33 ±2	0,075 ±0,007	1,55 ±0,15	10,66 ±0,86	100,33 ±2	5,05 ±0,57
Na NO₃	0,55 ±0,05	7,28 ±0,71	14,10 ±1,14	134,80 ±2,29	0,57 ±0,06	2,88 ±0,47	8,61 ±0,78	125 ±2,20	5,19 ±0,57

Tableau 194 : Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison de printemps de l'année 2010 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	1,10 ±0,010	17,55 ±1,17	15,86 ±1,15	162,65 ±2,55	0,48 ±0,55	5,10 ±0,57	15,69 ±1,15	84,33 ±1,94	7,68 ±0,75
HCl	0,39 ±0,035	3,90 ±0,53	5,20 ±0,57	65,78 ±1,74	0,055 ±0,005	0,083 ±0,008	4,32 ±0,53	76,54 ±1,85	2,98 ±0,50
CaCl₂	0,78 ±1,074	11,90 ±0,89	11,50 ±0,88	155,34 ±2,50	0,18 ±0,018	6,76 ±0,65	11,92 ±0,87	140,58 ±2,37	5,80 ±0,58
NH₄OAC	0,70 ±0,07	14,53 ±1,14	12,26 ±0,90	125,70 ±2,20	0,09 ±0,009	2 ±0,20	9,38 ±0,83	95,66 ±1,98	6,50 ±0,65
NH₄NO₃	0,56 ±0,055	7,10 ±0,71	13,29 ±0,93	110,66 ±2,10	0,08 ±0,008	1,73 ±0,17	10,78 ±0,85	103,17 ±2	5,15 ±0,57
Na NO₃	0,58 ±0,055	7,65 ±0,73	14,69 ±1,14	138,90 ±2,30	0,60 ±0,06	3,11 ±0,51	9 ±0,80	128,67 ±2,20	5,29 ±0,557

Tableau 195 : Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2010 du sol S2

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Mn	Zn	Co	Ni	Fe	Cr
EDTA	1,15 ±0,10	20 ±1,20	16 ±1,16	16,41 ±1,16	168,70 ±2,54	0,50 ±0,05	5,43 ±0,57	86 ±1,94	7,87 ±0,76
HCl	0,40 ±0,04	4,12 ±0,56	5,28 ±0,56	4,38 ±0,55	69,50 ±1,76	0,058 ±0,006	0,086 ±0,009	76,60 ±1,84	3,05 ±0,50
CaCl₂	0,80 ±0,08	13,50 ±0,93	13,23 ±0,93	12 ±0,90	160,41 ±2,50	0,21 ±0,02	6,90 ±0,70	145,33 ±2,40	6,11 ±0,61
NH₄OAC	0,74 ±0,07	15,80 ±1,15	14,41 ±1,14	9,68 ±0,83	130,85 ±2,25	0,11 ±0,01	2,22 ±0,28	97,11 ±2	6,79 ±0,65
NH₄NO₃	0,58 ±0,055	7,45 ±0,74	14,12 ±1,14	10,95 ±0,85	115,78 ±2,10	0,096 ±0,009	1,88 ±0,18	108,50 ±2,05	5,39 ±0,57
Na NO₃	0,60 ±0,06	7,90 ±0,75	15,20 ±1,15	9,27 ±0,81	140,45 ±2,38	0,62 ±0,06	3,50 ±0,54	130,19 ±2,27	5,71 ±0,58

Tableau 196: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'automne de l'année 2006 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,52 ±0,05	6,32 ±0,063	10,85 ±0,85	73,87 ±1,80	0,072 ±0,007	1 ±0,10	8,87 ±0,78	50,77 ±1,60	4,86 ±0,56
HCl	0,18 ±0,018	2,10 ±0,21	2,88 ±0,48	19,20 ±1,19	0,02 ±0,002	0,02 ±0,002	3,36 ±0,52	30 ±1,50	2,22 ±0,28
CaCl₂	0,30 ±0,03	4,05 ±0,55	8,76 ±0,80	69,44 ±1,76	0,05 ±0,005	1,27 ±0,12	7,55 ±0,74	69,55 ±1,78	3,20 ±0,51
NH₄OAC	0,28 ±0,027	4,87 ±0,56	8,67 ±0,77	47,88 ±1,57	0,033 ±0,003	0,45 ±0,045	5,12 ±0,50	50,66 ±1,60	3,55 ±0,54
NH₄NO₃	0,25 ±0,026	3,97 ±0,54	8,55 ±0,77	48,79 ±1,48	0,03 ±0,003	0,35 ±0,033	6,76 ±0,65	40,33 ±1,54	2,66 ±0,46
Na NO₃	0,20 ±0,02	3,30 ±0,50	8,90 ±0,79	56,44 ±1,62	0,08 ±0,008	0,70 ±0,07	4,22 ±0,56	64,21 ±1,72	2,90 ±0,50

Tableau 197: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps de l'année 2006 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,55 ±0,05	7,88 ±0,74	10,90 ±0,86	76,77 ±1,84	0,077 ±0,007	1,23 ±0,12	9,17 ±0,80	53,90 ±1,60	4,97 ±0,57
HCl	0,20 ±0,02	2,60 ±0,46	2,93 ±0,50	20,56 ±1,20	0,022 ±0,002	0,024 ±0,002	3,39 ±0,52	31,53 ±1,50	2,30 ±0,29
CaCl₂	0,33 ±1,14	4,55 ±0,45	8,88 ±0,83	74,33 ±1,81	0,055 ±0,005	1,40 ±0,14	7,77 ±0,76	73,74 ±1,80	3,38 ±0,53
NH₄OAC	0,30 ±0,03	5,34 ±0,57	8,78 ±0,78	50,20 ±1,60	0,037 ±0,004	0,49 ±0,05	5,33 ±0,57	55,90 ±1,65	3,86 ±0,54
NH₄NO₃	0,27 ±0,027	4,48 ±0,56	8,68 ±0,77	51,23 ±1,60	0,033 ±0,003	0,38 ±0,04	6,90 ±0,70	44,85 ±1,46	2,75 ±0,46
Na NO₃	0,23 ±0,023	3,80 ±0,53	9,94 ±0,85	60,22 ±1,70	0,089 ±0,009	0,78 ±0,08	4,55 ±0,56	69,66 ±1,77	3 ±0,50

Tableau 198: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2006 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,61 ±0,06	8,93 ±0,80	11,10 ±0,87	80,55 ±1,90	0,085 ±0,008	1,41 ±0,14	9,66 ±0,84	60,33 ±1,70	5,15 ±0,57
HCl	0,22 ±0,02	5,64 ±0,57	3,12 ±0,50	21,42 ±1,24	0,03 ±0,003	0,028 ±0,003	3,42 ±0,52	35,44 ±1,52	2,33 ±0,40
CaCl₂	0,35 ±0,035	5,50 ±0,57	9,16 ±0,80	78,17 ±1,88	0,06 ±0,006	1,88 ±0,18	7,86 ±0,76	80,55 ±1,90	3,50 ±0,53
NH₄OAC	0,32 ±0,03	6,33 ±0,63	8,96 ±0,80	54,66 ±1,61	0,044 ±0,004	0,62 ±0,06	5,51 ±0,57	58,62 ±1,67	3,97 ±0,56
NH₄NO₃	0,29 ±0,03	5,44 ±0,57	8,79 ±0,78	53,77 ±1,61	0,04 ±0,004	0,45 ±0,05	6,97 ±0,70	50,66 ±1,60	2,86 ±0,46
Na NO₃	0,26 ±0,025	5,90 ±0,60	10,22 ±0,85	65,43 ±1,73	0,10 ±0,01	0,91 ±0,09	4,74 ±0,55	74,90 ±1,81	3,19 ±0,50

Tableau 199: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'automne de l'année 2007 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,65 ±0,065	9,34 ±0,82	11,87 ±0,88	84,77 ±1,91	0,088 ±0,009	1,76 ±0,17	9,89 ±0,84	64,77 ±1,73	5,38 ±0,57
HCl	0,25 ±0,024	5,16 ±0,57	3,55 ±0,52	24,50 ±1,44	0,031 ±0,003	0,03 ±0,003	3,45 ±0,52	38,67 ±1,52	2,39 ±0,88
CaCl₂	0,40 ±0,04	6,22 ±0,61	9,90 ±0,84	80,23 ±1,90	0,061 ±0,006	2 ±0,20	7,96 ±0,77	83,78 ±1,93	3,81 ±0,54
NH₄OAC	0,36 ±0,035	6,88 ±0,64	9,11 ±0,81	60,43 ±1,70	0,048 ±0,004	0,69 ±0,07	5,67 ±0,57	60,45 ±1,70	4,11 ±0,55
NH₄NO₃	0,31 ±0,03	6 ±0,60	9,44 ±0,83	58,65 ±1,72	0,043 ±0,004	0,48 ±0,05	7 ±0,70	55,56 ±1,66	3,05 ±0,50
Na NO₃	0,29 ±0,029	6,44 ±0,64	10,90 ±0,86	70,21 ±1,80	0,12 ±0,012	0,96 ±0,09	4,86 ±0,55	78,18 ±1,90	3,42 ±0,52

Tableau 200: Les teneurs des métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps de l'année 2007 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,71 ±0,72	9,77 ±0,83	11,98 ±0,90	87,90 ±1,94	0,09 ±0,009	1,90 ±0,19	10,11 ±0,85	66,90 ±1,73	5,87 ±0,57
HCl	0,27 ±0,027	5,88 ±0,58	3,89 ±0,52	27,85 ±1,47	0,033 ±0,003	0,034 ±0,003	3,49 ±0,52	40,33 ±1,54	2,45 ±0,37
CaCl₂	0,45 ±0,045	7,60 ±0,74	10,20 ±0,85	85,33 ±1,93	0,063 ±0,006	2,33 ±0,30	8,04 ±0,77	90,11 ±1,98	3,95 ±0,55
NH₄OAC	0,39 ±0,04	7,70 ±0,74	9,50 ±0,83	64,43 ±1,73	0,05 ±0,005	0,74 ±0,07	5,78 ±0,58	67,42 ±1,76	4,33 ±0,56
NH₄NO₃	0,36 ±0,036	7,50 ±0,74	9,90 ±0,84	60,77 ±1,70	0,045 ±0,004	0,56 ±0,05	7,30 ±0,73	60,42 ±1,70	3,24 ±0,50
Na NO₃	0,33 ±0,03	6,88 ±0,64	11,10 ±0,87	74,33 ±1,85	0,14 ±0,01	1 ±0,10	5 ±0,57	80,20 ±1,90	3,60 ±0,53

Tableau 201: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2007 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,75 ±0,074	10,93 ±0,86	12,55 ±0,91	90,67 ±1,97	0,095 ±0,009	2,14 ±0,23	10,44 ±0,85	70,11 ±1,80	6,07 ±0,60
HCl	0,29 ±0,028	7,70 ±0,73	3,33 ±0,52	30,55 ±1,50	0,033 ±0,003	0,038 ±0,004	3,53 ±0,52	44,50 ±1,45	2,50 ±0,40
CaCl₂	0,50 ±0,05	8,35 ±0,77	11,90 ±0,88	87,21 ±1,95	0,067 ±0,0067	2,95 ±0,49	8,28 ±0,77	95,73 ±2	4,08 ±0,56
NH₄OAC	0,43 ±0,043	8,39 ±0,77	10,11 ±0,85	70,54 ±1,80	0,055 ±0,0054	0,80 ±0,08	5,98 ±0,60	70,28 ±1,80	4,55 ±0,56
NH₄NO₃	0,39 ±0,04	7,50 ±0,73	10,20 ±0,85	65,80 ±1,74	0,05 ±0,005	0,63 ±0,06	7,55 ±0,73	65,38 ±1,74	3,34 ±0,52
Na NO₃	0,36 ±0,035	7,06 ±0,72	11,44 ±0,81	78,25 ±1,86	0,19 ±0,02	1,18 ±0,18	5,66 ±0,57	84,55 ±1,95	3,78 ±0,58

Tableau 202: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'automne de l'année 2008 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,80 ±0,08	12,40 ±0,90	13,22 ±0,93	93,66 ±1,98	0,11 ±0,01	2,75 ±0,45	10,79 ±0,85	73,42 ±1,82	6,20 ±0,62
HCl	0,30 ±0,03	7,20 ±0,72	3,56 ±0,53	35,23 ±1,51	0,035 ±0,003	0,04 ±0,004	3,60 ±0,53	50,88 ±1,60	2,56 ±0,41
CaCl₂	0,54 ±0,053	8,26 ±0,77	11,45 ±0,87	89,17 ±1,97	0,071 ±0,007	3,15 ±0,50	8,58 ±0,77	100,11 ±2	4,31 ±0,55
NH₄OAC	0,46 ±0,045	8,90 ±0,78	11,11 ±0,87	73,88 ±1,82	0,059 ±0,006	0,94 ±0,09	6,26 ±0,62	74,78 ±1,86	4,86 ±0,56
NH₄NO₃	0,41 ±0,04	8,77 ±0,78	10,80 ±0,86	69,67 ±1,70	0,054 ±0,005	0,68 ±0,07	7,90 ±0,76	70,22 ±1,80	3,66 ±0,53
Na NO₃	0,38 ±0,04	8,50 ±0,87	12,76 ±0,92	80,48 ±1,90	0,25 ±0,026	1,50 ±0,15	5,95 ±0,60	89,66 ±1,93	3,90 ±0,55

Tableau 203: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps de l'année 2008 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,84 ±0,08	13,80 ±0,94	13,92 ±0,95	96,81 ±1,98	0,14 ±0,95	3,07 ±0,50	11,21 ±0,87	77,31 ±1,85	6,58 ±0,64
HCl	0,31 ±0,03	7,89 ±0,74	3,90 ±0,55	38,11 ±1,52	0,038 ±0,95	0,043 ±0,004	3,64 ±0,54	53,21 ±1,62	2,60 ±0,41
CaCl₂	0,57 ±0,057	9,67 ±0,83	11,82 ±0,88	92,66 ±1,97	0,075 ±0,95	3,70 ±0,53	8,85 ±0,78	105,88 ±2	4,77 ±0,55
NH₄OAC	0,50 ±0,05	9,80 ±0,84	11,88 ±0,88	75,90 ±1,84	0,062 ±0,95	1 ±0,10	6,47 ±0,64	80,44 ±1,90	5,03 ±0,57
NH₄NO₃	0,43 ±0,04	9,66 ±0,84	10,90 ±0,86	71,70 ±1,80	0,058 ±0,95	0,77 ±0,07	8,11 ±0,77	73,65 ±1,82	3,80 ±0,53
Na NO₃	0,40 ±0,04	8,90 ±0,79	12,90 ±0,92	83,67 ±1,93	0,29 ±0,95	1,83 ±0,18	6,15 ±0,61	94,21 ±2	4 ±0,54

Tableau 204: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2008 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,88 ±0,085	14,44 ±1,14	14,22 ±1	100,56 ±2	0,16 ±0,015	3,47 ±0,52	11,87 ±0,87	80,50 ±1,90	6,84 ±0,67
HCl	0,34 ±0,033	9,67 ±0,83	4,11 ±0,56	40,11 ±1,44	0,040 ±0,004	0,048 ±0,005	3,73 ±0,53	55,41 ±1,62	2,63 ±0,41
CaCl₂	0,60 ±0,06	10,66 ±0,85	12,90 ±0,92	98,55 ±2	0,078 ±0,008	4,11 ±0,55	9 ±0,80	110,33 ±2,10	4,92 ±0,57
NH₄OAC	0,55 ±0,055	10,90 ±0,85	12,55 ±0,91	80,43 ±1,90	0,066 ±0,006	1,30 ±0,13	6,84 ±0,68	85,78 ±1,95	5,20 ±0,57
NH₄NO₃	0,45 ±0,045	10,60 ±0,85	11,33 ±0,87	76,56 ±1,86	0,06 ±0,006	0,91 ±0,09	8,55 ±0,77	78,31 ±1,86	3,89 ±0,53
Na NO₃	0,43 ±0,043	10,11 ±0,84	13,16 ±0,94	90,34 ±1,97	0,33 ±0,03	2,07 ±0,20	6,30 ±0,63	98,15 ±2	4,33 ±0,55

Tableau 205: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'automne de l'année 2009 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,90 ±0,09	15,43 ±1,15	14,90 ±1	106,44 ±2	0,20 ±0,02	3,82 ±0,54	12,14 ±0,90	84,25 ±1,93	7,02 ±0,70
HCl	0,37 ±0,036	9,30 ±0,82	4,77 ±0,57	45,66 ±1,46	0,041 ±0,004	0,05 ±0,005	3,78 ±0,54	59,21 ±1,70	2,70 ±0,30
CaCl₂	0,65 ±0,064	11,33 ±0,87	13,12 ±0,94	102,45 ±2	0,08 ±0,008	4,56 ±0,54	9,41 ±0,82	113,77 ±2,12	5 ±0,57
NH₄OAC	0,64 ±0,06	11,45 ±0,88	12,90 ±0,92	91,57 ±1,97	0,068 ±0,007	1,39 ±0,13	6,97 ±0,70	89,66 ±1,95	5,67 ±0,58
NH₄NO₃	0,50 ±0,05	11,12 ±0,87	11,88 ±0,88	79,73 ±1,90	0,064 ±0,006	0,96 ±0,09	8,74 ±0,77	80,50 ±1,90	3,98 ±0,56
Na NO₃	0,48 ±0,046	10,60 ±0,85	13,77 ±0,95	96,22 ±1,98	0,40 ±0,04	2,44 ±0,40	6,78 ±0,68	100,15 ±2	4,68 ±0,55

Tableau 206: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps de l'année 2009 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	0,97 ±0,094	13,77 ±0,93	15,23 ±1,15	110,80 ±2,11	0,23 ±0,93	4,11 ±0,93	12,66 ±0,90	89,66 ±1,96	7,36 ±0,72
HCl	0,39 ±0,04	9,90 ±0,84	4,90 ±0,57	48,73 ±1,48	0,043 ±0,93	0,053 ±0,93	3,82 ±0,54	60,44 ±1,70	2,75 ±0,41
CaCl₂	0,70 ±0,07	11,70 ±0,87	13,78 ±1	105,44 ±2	0,084 ±0,93	4,88 ±0,93	9,76 ±0,83	116,90 ±2,16	5,28 ±0,57
NH₄OAC	0,68 ±0,067	11,73 ±0,88	13,13 ±0,93	95,87 ±1,97	0,07 ±0,93	1,52 ±0,93	7,35 ±0,72	92,73 ±1,94	5,80 ±0,58
NH₄NO₃	0,53 ±0,054	11,68 ±0,88	12,11 ±0,90	82,67 ±1,90	0,068 ±0,93	1,11 ±0,93	8,98 ±0,80	85,67 ±1,96	4,09 ±0,56
Na NO₃	0,50 ±0,05	11 ±0,87	14,16 ±0,87	100,16 ±2	0,44 ±0,93	2,53 ±0,93	6,90 ±0,70	104,33 ±2	4,79 ±0,57

Tableau 207: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2009 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	1,06 ±0,10	16,55 ±1,16	15,55 ±1,15	113,65 ±2,11	0,28 ±0,48	4,66 ±0,56	13,50 ±0,93	94,70 ±1,98	7,55 ±0,74
HCl	0,41 ±0,04	11,70 ±0,87	5,13 ±0,57	50,43 ±1,60	0,045 ±0,004	0,061 ±0,006	3,90 ±0,94	62,50 ±1,70	2,81 ±0,48
CaCl₂	0,75 ±0,076	13,70 ±0,94	14,33 ±1	109,28 ±2,11	0,09 ±0,009	5,21 ±0,56	10,22 ±0,85	118,32 ±2,10	5,50 ±0,57
NH₄OAC	0,70 ±0,07	14,43 ±1	13,90 ±0,94	100,90 ±2	0,075 ±0,007	1,75 ±0,17	7,88 ±0,76	95,16 ±1,98	5,98 ±0,60
NH₄NO₃	0,55 ±0,055	13,68 ±0,93	12,55 ±0,91	85,46 ±1,96	0,07 ±0,007	1,30 ±0,13	9 ±0,80	89,89 ±1,96	4,24 ±0,56
Na NO₃	0,53 ±0,051	13,20 ±0,93	14,56 ±1	104,78 ±2	0,48 ±0,05	2,70 ±0,45	7,10 ±0,71	109,55 ±2	4,90 ±0,50

Tableau 208: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'automne de l'année 2010 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	1,10 ±0,10	17,44 ±1,17	16,15 ±1,16	118,44 ±2,18	0,32 ±0,03	4,83 ±0,56	13,77 ±0,94	96,90 ±1,98	7,77 ±0,75
HCl	0,43 ±0,042	11,33 ±0,87	5,48 ±0,57	51,77 ±1,60	0,047 ±0,004	0,065 ±0,006	3,95 ±0,96	63,21 ±1,72	2,93 ±0,50
CaCl₂	0,80 ±0,08	12,37 ±0,90	14,78 ±1,15	111,55 ±2,11	0,095 ±0,009	5,90 ±0,60	10,69 ±0,85	120,76 ±2,18	5,66 ±0,57
NH₄OAC	0,75 ±0,076	12,80 ±0,92	14,10 ±1	104,80 ±2	0,079 ±0,008	1,86 ±0,18	7,96 ±0,76	100,43 ±2	6,11 ±0,60
NH₄NO₃	0,58 ±0,059	12,60 ±0,91	13,15 ±0,94	90,55 ±1,97	0,073 ±0,007	1,44 ±0,14	9,35 ±0,82	93,15 ±1,98	4,50 ±0,55
Na NO₃	0,55 ±0,055	12,57 ±0,90	14,94 ±1,15	104,78 ±2	0,50 ±0,05	2,92 ±0,50	7,57 ±0,74	115,11 ±2,10	5 ±0,57

Tableau 209: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison du printemps de l'année 2010 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	1,18 ±0,18	18,80 ±1,18	16,79 ±1,16	120,50 ±1,20	0,34 ±0,03	5,32 ±0,88	14,11 ±1	100,11 ±2	7,90 ±0,76
HCl	0,46 ±0,04	11,94 ±0,88	5,90 ±0,59	54,80 ±1,61	0,05 ±0,005	0,07 ±0,88	4,23 ±0,56	64,33 ±1,72	2,98 ±0,50
CaCl₂	0,87 ±0,086	13,65 ±0,93	15,05 ±1,15	114,77 ±2,12	0,12 ±0,01	6,32 ±0,88	10,80 ±0,85	123,78 ±2,20	5,88 ±0,58
NH₄OAC	0,80 ±0,08	13,70 ±0,94	15 ±1,15	108,90 ±2	0,085 ±0,008	1,93 ±0,88	8,04 ±0,77	105,28 ±2,02	6,43 ±0,64
NH₄NO₃	0,60 ±0,06	13,60 ±0,93	13,90 ±0,96	95,55 ±1,98	0,077 ±0,007	1,60 ±0,88	9,58 ±0,84	98,50 ±2	4,67 ±0,56
Na NO₃	0,57 ±0,057	13,11 ±0,92	15,17 ±1,15	110,80 ±2,10	0,53 ±0,05	3,12 ±0,88	7,93 ±0,77	119,41 ±2,17	5,26 ±0,57

Tableau 210: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) extrait par les solutions salines, HCl et EDTA dans la saison d'été de l'année 2010 du sol S3

ETM Extractants	Cd	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
EDTA	1,23 ±0,11	16,95 ±1,18	19,11 ±1,19	135 ±2,30	0,39 ±0,04	5,87 ±0,58	15,24 ±1,15	100,11 ±2	7,98 ±0,76
HCl	0,48 ±0,05	13,77 ±0,93	6,24 ±0,62	57,15 ±1,65	0,052 ±0,005	0,074 ±0,007	4,76 ±0,55	64,33 ±1,73	3,34 ±0,53
CaCl₂	0,90 ±0,09	15,75 ±1,15	15,19 ±1,15	120,66 ±2,20	0,18 ±0,02	6,86 ±0,67	11,59 ±0,87	123,78 ±2,20	6 ±0,60
NH₄OAC	0,84 ±0,083	16,50 ±1,16	15,10 ±1,15	110,14 ±2,10	0,09 ±0,009	2 ±0,20	8,63 ±0,77	105,28 ±2	6,55 ±0,64
NH₄NO₃	0,65 ±0,066	15,70 ±1,15	14,22 ±1	100,33 ±2	0,079 ±0,008	1,77 ±0,17	9,94 ±0,84	98,50 ±1,98	4,89 ±0,55
Na NO₃	0,60 ±0,06	15,27 ±1,15	15,28 ±1,15	115,89 ±2,10	0,56 ±0,05	3,48 ±0,54	8 ±0,77	119,41 ±1,19	5,45 ±0,57

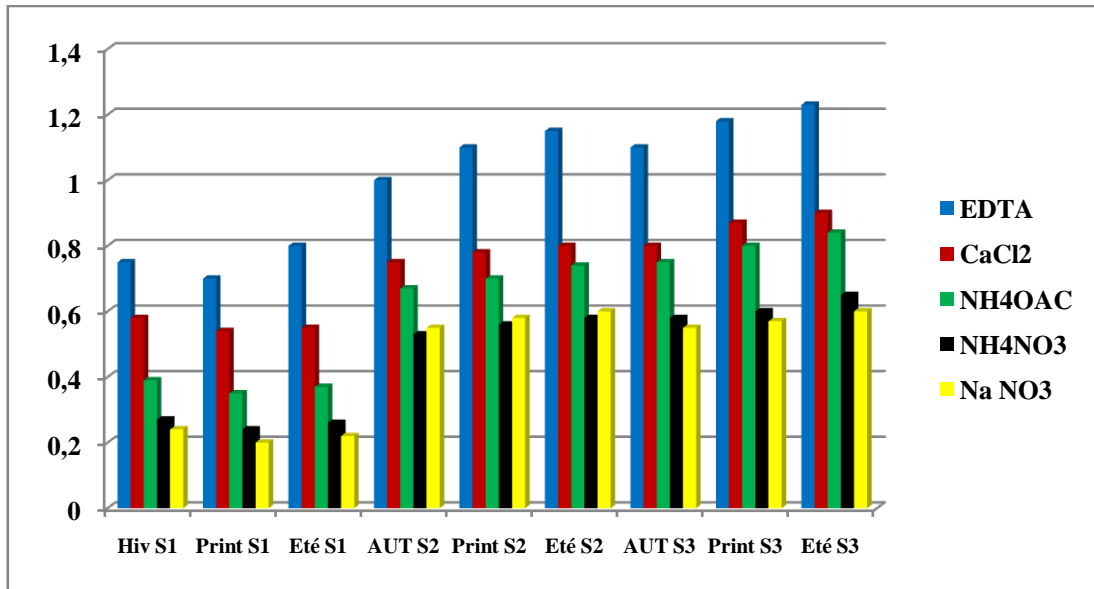


Figure 91: Histogramme illustrant les teneurs en Cd (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait par les solutions salines et EDTA)

Hiv: la saison d'hiver, **Print:** la saison de printemps, **AUT:** la saison d'automne

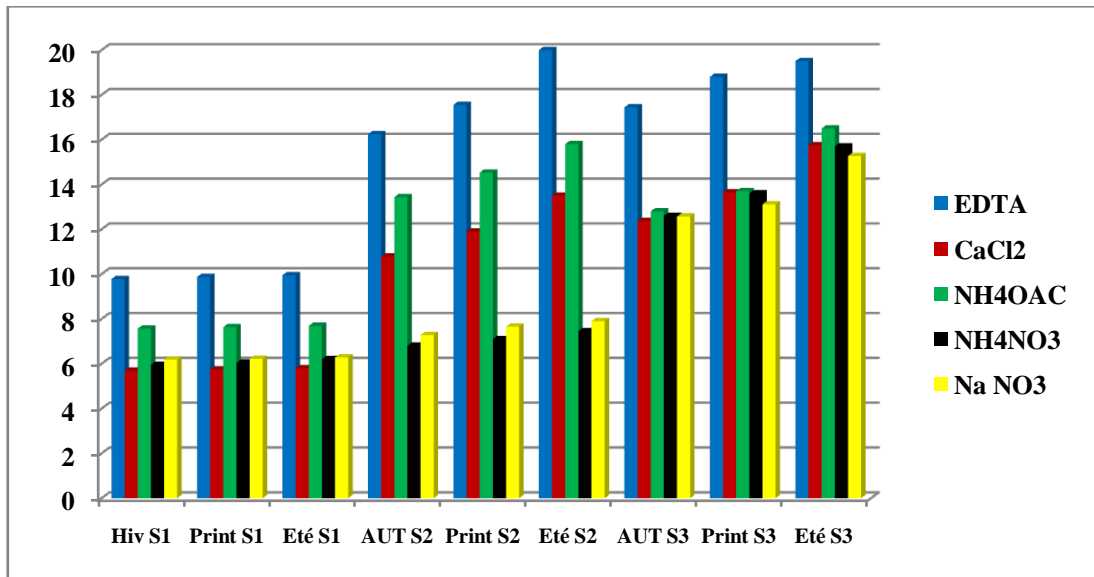


Figure 92: Histogramme illustrant les teneurs en Cu (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait par les solutions salines et EDTA)

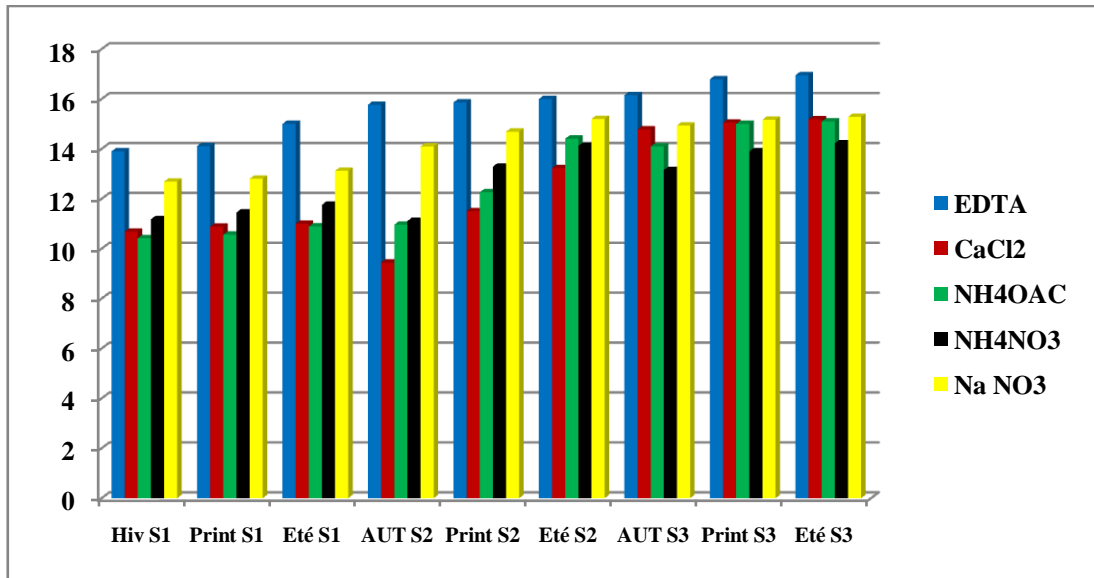


Figure 93: Histogramme illustrant les teneurs en Pb (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait par les solutions salines et EDTA)

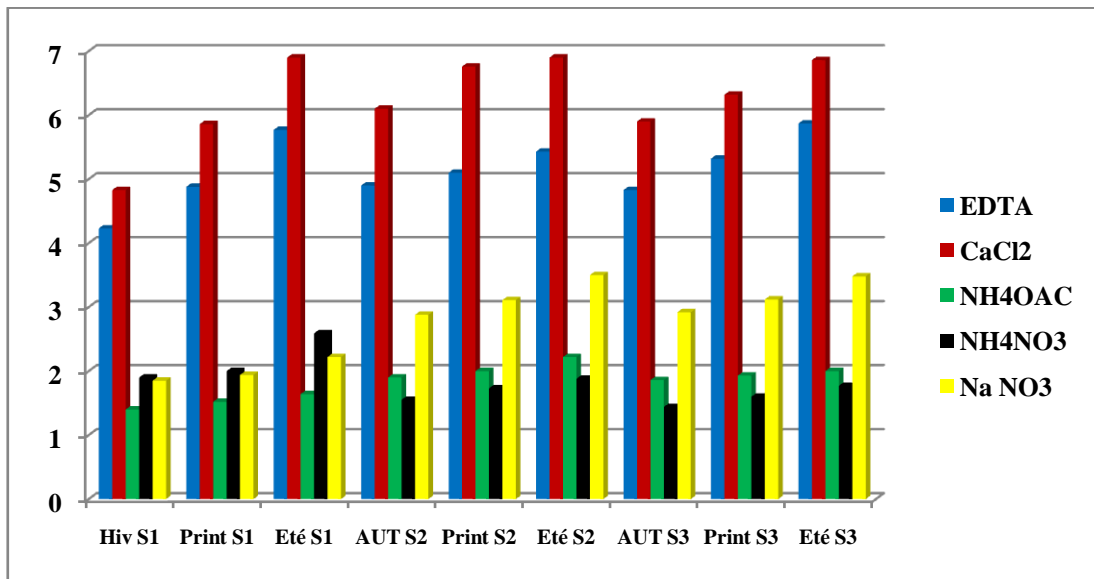


Figure 94: Histogramme illustrant les teneurs en Ni (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait par les solutions salines et EDTA)

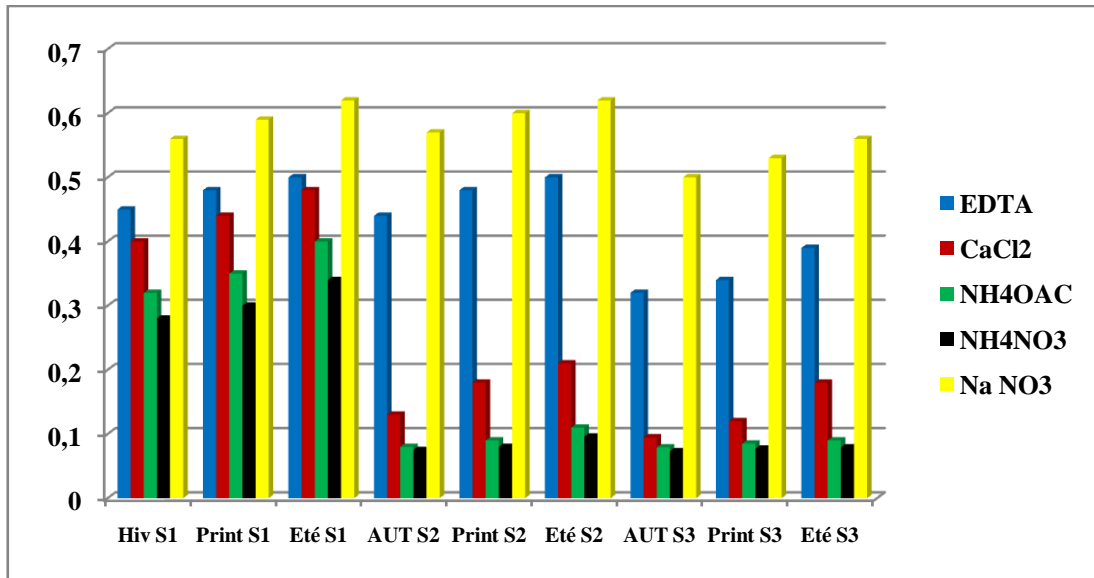


Figure 95: Histogramme illustrant les teneurs en Co (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait par les solutions salines et EDTA)

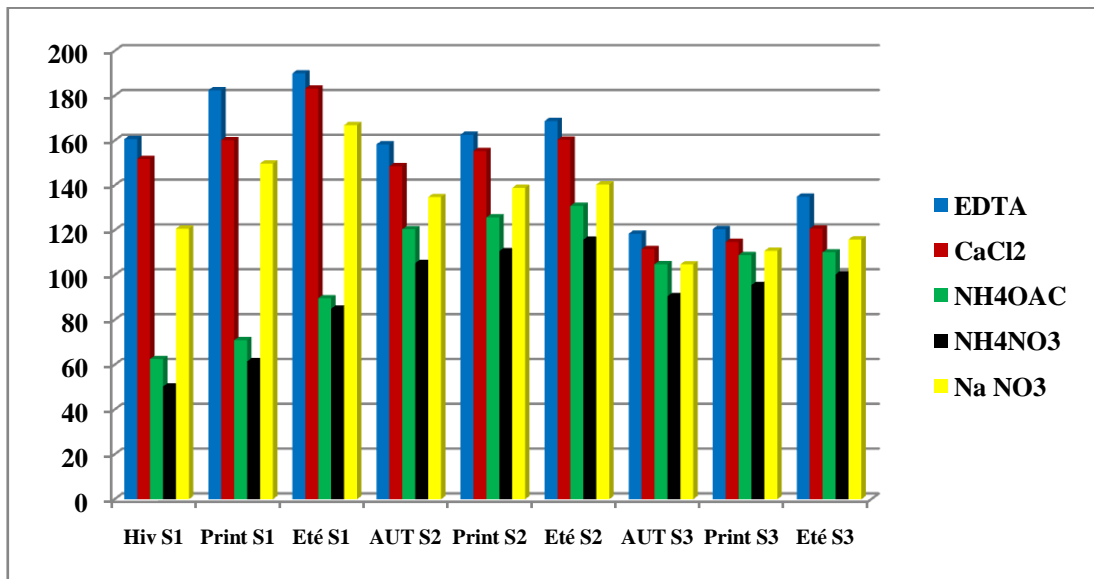


Figure 96: Histogramme illustrant les teneurs en Zn (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait par les solutions salines et EDTA)

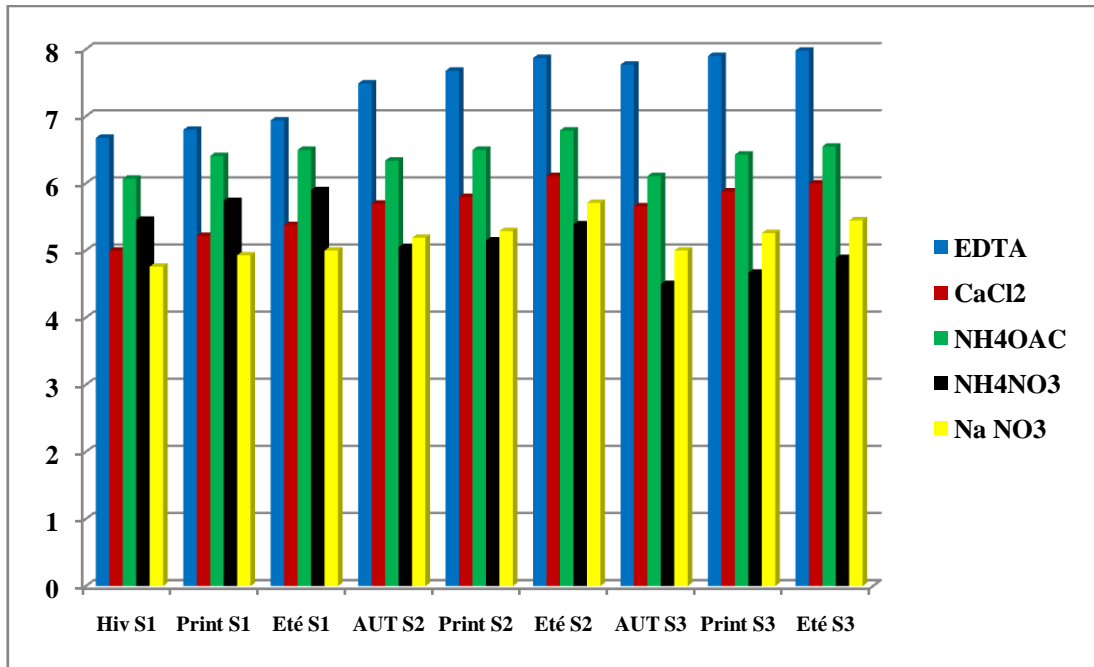


Figure 97: Histogramme illustrant les teneurs en Cr (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait par les solutions salines et EDTA)

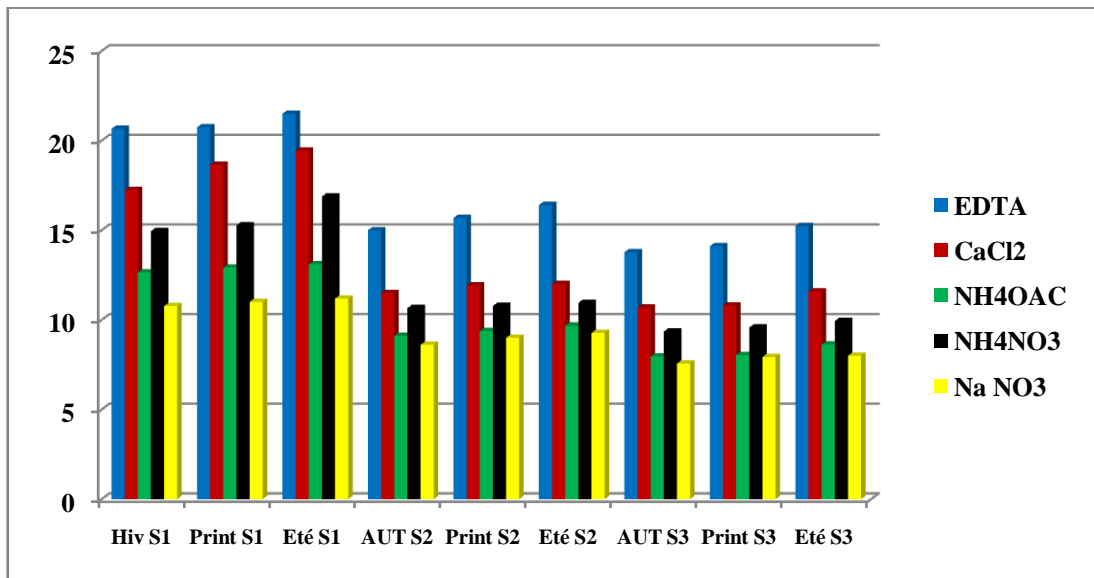


Figure 98: Histogramme illustrant les teneurs en Mn (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait par les solutions salines et EDTA)

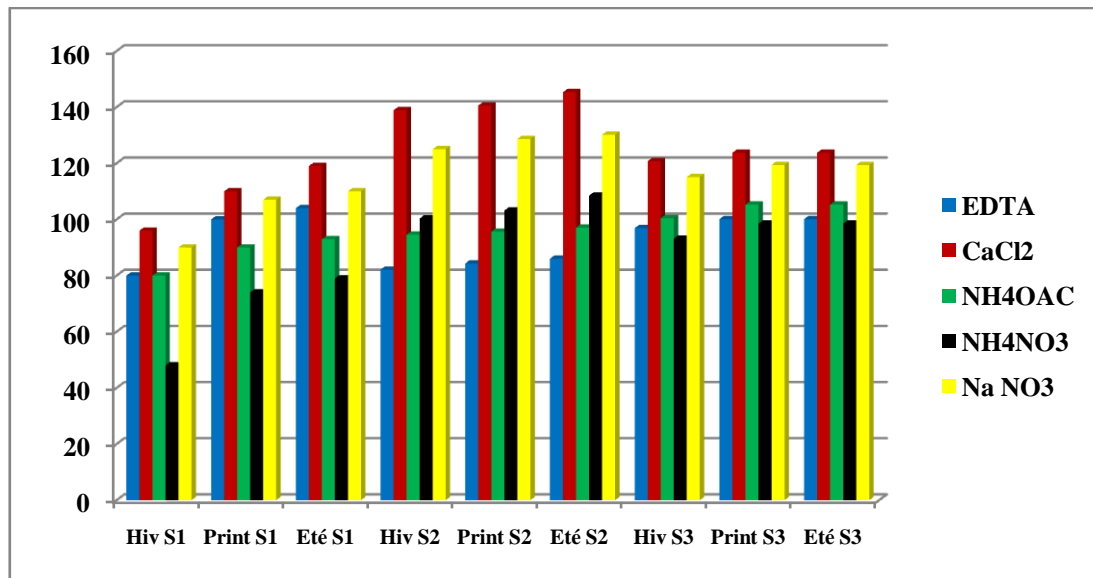


Figure 99: Histogramme illustrant les teneurs en Fe (mg/kg de MS) dans les différentes saisons de l'année 2010 des sols S1, S2 et S3 (extrait par les solutions salines et EDTA)

Les teneurs les plus élevées sont enregistrées dans la saison de printemps pour les sols S 2 et S3 et dans la saison d'été pour le sol S1.

Il y a accumulation des métaux lourds dans les sols durant toutes les années étudiées.

En comparant les résultats obtenus par les différents extractants HCl, EDTA, NH₄OAC, NaNO₃, CaCl₂ et NH₄NO₃, on peut déduire que:

- HCl extrait peu les métaux lourds étudiés.
- Cd est mieux extrait par EDTA et CaCl₂, ensuite par NH₄OAC.
- Cu est mieux extrait par EDTA puis NH₄OAC.
- Pb est mieux extrait par EDTA puis NaNO₃.
- Zn est mieux extrait par EDTA puis CaCl₂.
- Co est mieux extraite par NaNO₃ puis EDTA.
- Ni est mieux extrait par CaCl₂ puis EDTA.
- Mn est mieux extrait par EDTA puis CaCl₂, ensuite NH₄NO₃.
- Cr est mieux extrait par EDTA puis NH₄OAC.
- Fe est mieux extrait par CaCl₂ puis NaNO₃

Ainsi, l'échelle de classement du meilleur extractant par ordre décroissant est comme suit:

EDTA > CaCl₂ > NaNO₃ > NH₄OAC > NH₄NO₃ > HCl

De nombreuses études confirment d'ailleurs l'efficacité de l'EDTA pour l'extraction d'espèces cationiques telles que le plomb, le zinc, le cuivre et le cadmium, présents dans des sols contaminés [96].

Dans les trois sols, les valeurs des teneurs des 9 métaux lourds dans données par les différents extractants HCl, EDTA, NH₄OAC, NaNO₃, CaCl₂ et NH₄NO₃ sont relativement faibles comparées aux teneurs totales obtenues par l'extraction à l'eau régale.

Toutefois selon ces résultats au niveau des sols S1, S2 et S3, on constate que le Zn, le Cd, le Pb et Cr sont des éléments les plus biodisponibles suivi par le Ni et le Cu pour les sols S2 et S3 et ensuite par le Co pour les trois sols.

En revanche le Cu présente une très faible biodisponibilité pour le sol S1 et ainsi que le Mn pour les trois sols.

D'une manière générale, les teneurs en métaux lourds biodisponibles enregistrées dans le sol S1 sont plus faibles que celles enregistrés dans les sols S2 et S3.

Ainsi, on peut classer ces éléments dans l'ordre de biodisponibilité décroissante:

- Pour les sols S2 et S3: Cd > Zn > Pb > Ni > Co > Cr > Cu.
- Pour le sol S1: Zn > Pb > Cd > Co > Cr > Ni > Cu.

Conclusion

A la lumière de ces résultats, on peut déduire que les solutions salines semblent exclusivement réservées au suivi des sols pollués et le plus souvent à celui des sols acides ou neutres. Par contre, les faibles quantités extraites empêcheraient d'appliquer cette méthode aux sols dont l'origine des éléments-traces est géochimique. De plus, la principale critique formulée vis-à-vis de l'emploi de solutions salines concerne différents problèmes analytiques qu'elles occasionnent.

Le choix d'une méthode d'extraction peut être basé sur deux critères: d'une part l'étendue du domaine d'application de la méthode (nombre d'éléments-traces, nature des sols et des végétaux) et d'autre part les limites analytiques de son emploi. Par exemple, le Pb est lié aux carbonates en régions sèches méditerranéennes à sols riches en carbonates, alors qu'il est plus lié à des oxydes de fer et d'aluminium en régions à sols plus humides.

En conclusion, il n'existe pas de méthode d'extraction chimique universelle permettant d'évaluer simultanément et sans difficultés analytiques l'absorption de tout élément-trace par tout végétal cultivé sur tout type de sol.

Néanmoins l'extraction avec la solution de chlorure de calcium vise à quantifier la fraction mobile, c'est -à-dire la fraction d'éléments biodisponible et facilement lixiviable à l'eau. Cette extraction représente au mieux les conditions intrinsèques de la solution de sol à l'équilibre en termes de force ionique. Elle est souvent employée pour établir des corrélations sol-plante et définir ainsi la fraction biodisponible de la pollution.

L'extraction à l'EDTA vise à mesurer la fraction mobilisable, comprenant à la fois la partie mobile de la pollution mais également une partie potentiellement active.

Cette fraction peut ainsi être considérée en quelque sorte comme la fraction maximale extractible du sol. En effet, l'EDTA est un agent chélatant ayant une capacité d'extraction maximale des métaux présents dans les phases non liées à la silice, y compris les métaux complexés à des ligands organiques. Le choix du pH de 7,5 constitue un compromis entre le maximum de solubilité de nombreux anions en milieu acide et l'augmentation de la chélation de cations optimale en milieu basique, ce qui fait de ce type d'extraction une procédure applicable aussi bien aux espèces formant des oxyanions (As, Cr, Mn,...) qu'aux cations (Cd, Pb, Zn). Le contenu total s'apparente donc à la fraction en éléments du sol mobilisable ajoutée à la fraction immobile.

Les quantités extraites par les solutions de molécules chélatantes ne sont généralement pas ou peu corrélées à celles extraites par les végétaux cultivés. Comment expliquer ce paradoxe? Par le fait que le compartiment des éléments sur la phase solide en équilibre avec la solution du sol regroupe des éléments qui ne présentent pas tous le même degré de liaison avec cette phase solide et que la demande de la plante n'est pas suffisante (en intensité et /ou en durée) pour déplacer tous les éléments de ce compartiment vers la solution.

D'autre part on peut dire qu'en considérant le pH alcalin de ces sols, il est possible que les éléments métalliques se trouvent naturellement sous des formes très peu mobiles et donc moins extractibles par les extractants choisis.

II- Les plantes

Pour vérifier le caractère d'accumulation de métaux dans le blé dur, le poivron et le maïs, une extraction des métaux lourds par l'eau régale au niveau des racines et des parties aériennes a été effectuée. Ce dosage a été réalisé sur ces échantillons de végétaux prélevés en 2006 jusqu'à 2010. Les résultats de ces extractions sont classés dans les tableaux (211-270) et illustré sous forme d'histogrammes dans les figures (91-117):

Tableau 211: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du blé dur aux cours de différentes saisons de l'année 2006 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	1,77 ±0,17	11,44 ±0,87	2512,65 ±7,20	43,22 ±1,54	633,55 ±4,50	39,88 ±0,52	4,22 ±0,56	00	10,44 ±0,85
Printemps	1,65 ±0,16	9,87 ±0,83	2424,33 ±7,15	55,90 ±1,64	600,77 ±4,40	24,66 ±0,46	11,80 ±0,87	1,66 ±1,15	20,50 ±1,20
Eté	1,58	8,79 ±0,78	2309 ±7	39,42 ±1,53	584,94 ±4,25	13,41 ±0,90	19,29 ±1,19	00	28,25 ±1,48

MS: matière sèche

Tableau 212: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du blé dur aux cours de différentes saisons de l'année 2007 (extrait par l'eau régale).

Saisons/métaux	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	2 ±0,20	11,66 ±0,87	2538,88 ±7,28	48,19 ±1,58	660,76 ±4,74	60,12 ±1,70	6,33 ±0,63	0,25 ±0,025	12,55 ±0,90
Printemps	1,84 ±0,18	10,11 ±0,85	2447,33 ±7,20	63,88 ±1,71	628,88 ±4,44	44,33 ±1,55	13,72 ±0,94	1,90 ±0,19	22,33 ±1,25
Eté	1,72 ±0,17	9,11 ±0,80	2342,77 ±7,10	46,33 ±1,46	600,32 ±4,30	37,11 ±1,52	20,80 ±1,20	0,20 ±0,20	30,66 ±1,50

Tableau 213: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du blé dur aux cours de différentes saisons de l'année 2008 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	2,19 ±1,52	13,50 ±0,93	2546,54 ±7,30	49,88 ±1,59	665,80 ±4,75	63,22 ±1,71	7,41 ±0,72	0,51 ±0,052	14,50 ±0,98
Printemps	2 ±1,52	12,25 ±0,90	2460,50 ±7,25	64,90 ±1,71	633,90 ±4,46	46,50 ±1,56	14,56 ±0,98	2 ±0,20	24,77 ±1,44
Eté	1,90 ±1,52	11,33 ±0,87	2363,88 ±7,14	47,45 ±1,57	605,42 ±4,32	40,23 ±1,54	21,22 ±1,24	0,31 ±0,031	32,33 ±1,50

Tableau 214: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du blé dur aux cours de différentes saisons de l'année 2009 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	2,38 ±0,44	15,80 ±1,15	2555 ±7,35	50,11 ±1,60	670,12 ±4,77	65,11 ±1,72	8,11 ±0,77	0,75 ±0,075	15,88 ±1,15
Printemps	2,18 ±0,20	14,50 ±0,98	2471,33 ±7,27	65,88 ±1,72	638,55 ±4,47	48,33 ±1,58	15,66 ±1,15	2,15 ±0,21	25,80 ±1,45
Eté	2 ±0,20	13,44 ±0,90	2375,90 ±7,16	48,22 ±1,58	610,32 ±4,34	42,77 ±1,54	21,88 ±1,28	0,41 ±0,041	33,78 ±1,50

Tableau 215: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du blé dur aux cours des différentes saisons de l'année 2010 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	2,59 ±0,50	17,77 ±1,17	2568,11 ±7,40	52,66 ±1,60	676,22 ±4,78	67,33 ±1,75	9,20 ±0,80	1 ±0,10	17,90 ±1,17
Printemps	2,41 ±0,45	16,33 ±1,16	2492 ±7,30	67,90 ±1,75	644,18 ±4,50	50,22 ±1,60	16,54 ±1,16	2,40 ±0,44	28,21 ±1,48
Eté	2,24 ±0,30	15,50 ±1,15	2388,22 ±7,20	51,33 ±1,60	618,58 ±4,35	44,88 ±1,55	22,73 ±1,30	0,86 ±0,78	37,44 ±1,51

Tableau 216: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du poivron aux cours des différentes saisons de l'année 2006 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	115,43 ±2,15	15,17 ±1,15	1 ±0,10	2,26 ±0,32	00	9,31 ±0,80	14,20 ±1,14	2300 ±7,10	16,44 ±1,16
Printemps	175,50 ±2,72	27,44 ±1,47	1,21 ±0,20	2,60 ±0,46	0,22 ±0,02	11,11 ±0,87	18,33 ±1,18	2380,50 ±7,20	25,33 ±1,45
Eté	169,33 ±2,70	23,73 ±1,38	1,09 ±0,10	2,54 ±0,45	00	10,96 ±0,85	16,84 ±1,16	2345,44 ±7,15	21,43 ±1,22

Tableau 217: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du poivron aux cours des différentes saisons de l'année 2007 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	120 ±2,20	18,50 ±1,18	2,66 ±0,46	2,41 ±0,41	0,16 ±0,016	10 ±0,85	18,32 ±1,18	2345,11 ±7,16	19,51 ±1,19
Printemps	187,33 ±2,80	35,32 ±1,50	5,43 ±0,58	2,97 ±0,50	0,52 ±0,05	12,65 ±0,90	25,41 ±1,45	2401,26 ±7,24	30,44 ±1,50
Eté	170,77 ±2,70	28,86 ±1,48	4,77 ±0,54	2,85 ±0,48	0,29 ±0,03	11,50 ±0,87	21,74 ±1,21	2382,33 ±7,20	26,31 ±1,46

Tableau 218: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du poivron aux cours des différentes saisons de l'année 2008 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	130,10 ±2,30	19,72 ±1,19	4,71 ±0,55	3,41 ±0,50	0,32 ±0,03	11,23 ±0,87	24,41 ±1,40	2362,34 ±7,20	22,41 ±1,27
Printemps	196 ±2,97	37,23 ±1,52	7,55 ±0,72	3,94 ±0,52	0,85 ±0,085	13,71 ±0,93	30,33 ±1,50	2421,64 ±7,25	34,90 ±1,50
Eté	183,11 ±2,85	29,90 ±1,50	6,80 ±0,64	3,78 ±0,51	0,50 ±0,05	12,43 ±0,90	27,88 ±1,47	2400 ±7,23	30,10 ±1,50

Tableau 219: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du poivron aux cours des différentes saisons de l'année 2009 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	138,33 ±2,40	21,80 ±1,21	7,55 ±0,72	3,80 ±0,51	0,55 ±0,055	12,18 ±0,90	28 ±1,48	2390,45 ±7,22	26,38 ±1,46
Printemps	210,11 ±3,10	39 ±1,52	10,37 ±0,85	4,17 ±0,55	1 ±0,10	14,37 ±3,98	38,42 ±1,52	2443,66 ±7,30	38,50 ±1,52
Eté	197,55 ±3	31,25 ±1,50	9,78 ±0,90	3,96 ±0,52	0,85 ±0,084	13,50 ±0,93	36,33 ±1,51	2428,78 ±7,25	35 ±1,52

Tableau 220: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du poivron aux cours des différentes saisons de l'année 2010 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	147,47 ±2,50	23,76 ±1,30	10,33 ±0,85	4 ±3,54	0,78 ±0,08	13 ±0,94	34,54 ±1,50	2400,66 ±7,25	30,40 ±1,50
Printemps	220 ±3,20	41,44 ±1,54	13,80 ±0,95	4,42 ±3,55	1,20 ±1,20	15,50 ±1,15	42,42 ±1,54	2466,20 ±7,34	44,65 ±1,56
Eté	208,23 ±3,10	33,50 ±1,50	12,44 ±0,90	4,10 ±0,55	1 ±0,10	14,66 ±0,98	37,33 ±1,52	2440,62 ±7,30	40,20 ±1,54

Tableau 221: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du maïs aux cours des différentes saisons de l'année 2006 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	00 ±0,025	7,72 ±0,72	178,50 ±2,70	14,42 ±0,98	18,33 ±1,20	421,22 ±4,20	10,11 ±0,85	00	20,77 ±1,20
Printemps	0,26 ±0,025	14,55 ±0,97	226,66 ±3,20	28,77 ±1,48	29 ±1,50	470,42 ±4,68	17,43 ±1,17	0,21 ±0,021	29,85 ±1,50
Eté	00	10,67 ±0,85	210 ±3,10	20,56 ±1,20	20,25 ±1,20	455,75 ±4,50	14,88 ±0,98	00	25,33 ±1,45

Tableau 222: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du maïs aux cours des différentes saisons de l'année 2007 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,20 ±0,020	15,65 ±1,15	190,33 ±2,90	16,54 ±1,16	27 ±1,47	430,55 ±4,30	12,50 ±0,85	0,19 ±0,019	28,90 ±1,48
Printemps	0,74 ±0,073	29,88 ±1,50	238,84 ±3,35	38,88 ±1,52	43,66 ±1,55	482,42 ±4,82	20,21 ±1,20	0,44 ±0,044	38,84 ±1,52
Eté	0,41 ±0,041	20,42 ±1,20	220,50 ±3,20	29,90 ±1,50	32,50 ±1,50	468,77 ±4,68	16,33 ±1,16	0,27 ±0,027	30,44 ±1,50

Tableau 223: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du maïs aux cours des différentes saisons de l'année 2008 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,42 ±0,042	20,22 ±1,20	200 ±3	18,32 ±1,18	36,50 ±1,52	440,64 ±4,40	13,66 ±0,93	0,27 ±0,027	32,88 ±1,50
Printemps	1 ±0,10	35,10 ±1,52	248,78 ±3,48	41,60 ±1,54	51,31 ±1,60	490,50 ±4,90	21,74 ±1,21	0,68 ±0,068	42,90 ±1,54
Eté	0,71 ±0,071	28,33 ±1,48	231,44 ±3,31	32,12 ±1,50	40,20 ±1,54	476,33 ±4,76	17,55 ±1,17	0,40 ±0,04	34,74 ±1,51

Tableau 224: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du maïs aux cours des différentes saisons de l'année 2009 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,66 ±0,066	27,32 ±1,47	212,26 ±3,12	20,32 ±1,20	45,66 ±1,56	451 ±4,50	14,57 ±0,98	0,49 ±0,05	35,90 ±1,51
Printemps	1,31 ±0,031	42,26 ±1,54	258,68 ±3,57	43,73 ±1,54	60,41 ±1,70	500,21 ±5	22,80 ±1,32	1 ±0,10	46,77 ±1,57
Eté	1 ±0,10	35,72 ±1,51	242,33 ±3,40	34,21 ±1,51	48,55 ±1,58	485,45 ±4,80	18,11 ±1,18	0,85 ±0,085	38,33 ±1,52

Tableau 225: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les racines du maïs aux cours des différentes saisons de l'année 2010 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,90 ±0,09	36,56 ±1,51	220 ±3,20	22,11 ±1,22	54,21 ±1,64	460,24 ±4,56	15,43 ±1,15	0,91 ±0,091	38,66 ±1,52
Printemps	1,76 ±0,17	51,77 ±1,60	269,43 ±3,64	45,90 ±1,56	70,33 ±1,80	520,88 ±5,13	23,54 ±1,34	1,41 ±0,14	49,80 ±1,59
Eté	1,34 ±0,13	44,88 ±1,55	251,21 ±3,50	36,33 ±1,51	58,50 ±1,68	494,11 ±4,90	19,78 ±1,19	1 ±1,10	40,22 ±1,43

Tableau 226: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours de différentes saisons de l'année 2006.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	5,95 ±0,62	6,33 ±0,63	307,44 ±3,76	19,72 ±1,19	380,55 ±3,90	40,65 ±1,54	13,66 ±0,85	0,88 ±0,08	6,77 ±0,63
Printemps	3,11 ±0,50	2 ±0,20	50,28 ±1,60	13,55 ±0,82	232,67 ±3,50	15,90 ±1	6,32 ±0,63	00	3,22 ±0,50
Eté	3,60 ±0,53	4,23 ±0,44	57,33 ±0,62	17,50 ±1,16	280,55 ±3,57	18,27 ±1,18	8,74 ±0,62	00	3,66 ±0,51

Tableau 227: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours des différentes de l'année 2006.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	0,15 ±0,015	1,65 ±0,16	90,55 ±1,92	0,25 ±0,025	40,66 ±1,54	7,41 ±0,70	4,55 ±0,55	0,53 ±0,052	0,76 ±0,074
Printemps	0,27 ±0,025	8,66 ±0,67	180,77 ±3,20	0,32 ±0,034	100,50 ±2,16	14,88 ±0,97	3,66 ±0,52	00	1 ±0,11
Eté	0,31 ±0,031	6,48 ±0,64	220,45 ±3,46	0,44 ±0,044	113,4 ±2,26	20,07 ±1,22	9,44 ±0,70	00	1,33 ±0,14

Tableau 228: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les graines du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours des différentes saisons de l'année 2006.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Printemps	2,67 ±0,47	48,80 ±1,57	50,55 ±1,61	14,33 ±0,97	130,22 ±2,36	15,77 ±1,15	4,52 ±0,55	0,87 ±0,088	0,78 ±0,079
Eté	3,10 ±0,50	57,12 ±1,67	61,77 ±1,70	16,89 ±1,17	165,67 ±2,66	25,35 ±1,25	6,09 ±0,63	00	1 ±0,10

Tableau 229: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours de différentes saisons de l'année 2007.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	6,25 ±0,65	8,77 ±0,77	330 ±3,40	30,54 ±1,50	400,32 ±4	51,44 ±1,60	15,33 ±1,15	0,96 ±0,095	8,80 ±0,67
Printemps	3,32 ±0,51	4,50 ±0,56	71,22 ±1,80	24,68 ±1,30	253 ±3,59	26,33 ±1,46	8,55 ±0,66	0,30 ±0,03	4,31 ±0,55
Eté	3,80 ±0,51	4,66 ±0,57	80,45 ±1,82	27,87 ±1,47	285,87 ±3,63	29,30 ±1,49	9,22 ±0,94	0,21 ±0,16	5,66 ±0,60

Tableau 230: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours des différentes de l'année 2007.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	0,28 ±0,027	3,76 ±0,51	95,33 ±1,96	0,43 ±0,042	42 ±1,55	9,55 ±0,96	5,26 ±0,59	0,72 ±0,07	1,22 ±0,28
Printemps	0,41 ±0,041	10,65 ±0,86	184,65 ±3,20	0,50 ±0,05	103,11 ±2,16	16,90 ±1,16	5,17 ±0,59	0,32 ±0,032	1,34 ±0,13
Eté	0,49 ±0,05	8,50 ±0,76	224,44 ±3,45	0,68 ±0,067	115,12 ±2,16	22,32 ±1,28	10,77 ±0,85	0,20 ±0,020	1,50 ±0,15

Tableau 231: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les graines du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours des différentes saisons de l'année 2007.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Printemps	2,98 ±0,47	49,90 ±1,58	53,66 ±1,62	15,67 ±1,16	133,44 ±2,36	17,88 ±1,17	4,80 ±0,57	1 ±0,10	1,11 ±0,11
Eté	3,20 ±0,50	59,33 ±1,70	64,88 ±1,73	17,90 ±1,17	167,81 ±2,66	28,44 ±1,48	6,31 ±0,65	0,23 ±0,024	1,24 ±0,25

Tableau 232: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours de différentes saisons de l'année 2008.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	6,33 ±0,65	9,67 ±0,83	335,22 ±3,40	32,66 ±1,50	407,55 ±4,16	52,77 ±1,60	16,22 ±1,16	1 ±0,10	10 ±0,85
Printemps	3,66 ±0,51	5,88 ±0,60	74,33 ±1,81	26,77 ±1,26	255,41 ±3,59	27,80 ±1,47	9,60 ±0,83	0,39 ±0,04	5,80 ±0,60
Eté	3,91 ±0,53	5,70 ±0,61	84,50 ±1,84	28,90 ±1,48	288,90 ±3,62	30,44 ±1,50	10,78 ±0,85	0,30 ±0,03	6,88 ±0,64

Tableau 233: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours des différentes de l'année 2008.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	0,40 ±0,04	5,88 ±0,61	100,43 ±2	0,54 ±0,054	44,55 ±1,55	11,44 ±0,88	6,33 ±0,64	0,90 ±0,09	2,66 ±0,45
Printemps	0,55 ±0,054	12,89 ±0,90	186,66 ±3,21	0,61 ±0,061	110,22 ±2,18	18,88 ±1,18	5,77 ±0,61	0,45 ±0,045	2,78 ±0,46
Eté	0,68 ±0,068	10,75 ±0,85	226,44 ±3,46	0,77 ±0,077	123,33 ±2,30	24,53 ±1,30	11,44 ±0,88	0,39 ±0,04	2,92 ±0,48

Tableau 234: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les graines du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours des différentes saisons de l'année 2008.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Printemps	3,18 ±0,50	54,88 ±0,61	59,79 ±0,63	16,88 ±1,16	133,44 ±2,36	19,87 ±1,19	5,90 ±0,62	1,41 ±0,14	1,33 ±0,13
Eté	3,33 ±0,51	70,44 ±1,80	70,55 ±1,80	18,76 ±1,18	167,81 ±2,66	30,53 ±0,50	7,44 ±0,71	0,45 ±0,045	1,73 ±0,17

Tableau 235: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours de différentes saisons de l'année 2009.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	6,55 ±0,64	11,77 ±0,88	349,27 ±3,80	34,73 ±1,50	415 ±4,10	56,54 ±1,65	17,33 ±1,17	1,21 ±0,21	12,45 ±0,90
Printemps	3,88 ±0,51	9,65 ±0,83	85,44 ±1,84	28,80 ±1,47	272,33 ±3,62	31,63 ±1,50	10,73 ±0,85	0,70 ±0,07	7,88 ±0,71
Eté	4,12 ±0,54	7,66 ±0,71	96,33 ±1,96	30,77 ±1,50	291,66 ±3,77	34,21 ±1,51	11,80 ±0,88	0,55 ±0,055	8,74 ±0,77

Tableau 236: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours des différentes de l'année 2009.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	0,62 ±0,062	7,93 ±0,71	112,88 ±2,17	1,44 ±0,14	48,35 ±1,58	13,50 ±0,93	7,30 ±0,71	1 ± 10,	4,76 ±0,57
Printemps	0,79 ±0,079	14,76 ±0,98	197,43 ±3,20	1,55 ±0,15	115,50 ±2,16	20 ±1,20	6,72 ±0,66	0,90 ±0,09	4,82 ±0,58
Eté	0,90 ±0,09	12,80 ±0,91	248,56 ±3,58	1,72 ±0,17	128,44 ±2,27	26,43 ±1,46	12,48 ±0,91	0,81 ±0,08	5,10 ±0,60

Tableau 237: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les graines du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours des différentes saisons de l'année 2009.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Printemps	3,30 ±0,50	56,90 ±1,65	70,88 ±1,80	17,90 ±1,17	139,90 ±2,37	21,92 ±1,20	6,86 ±0,63	2,44 ±0,46	3,21 ±0,51
Eté	3,65 ±0,51	72,54 ±1,80	81,66 ±1,84	19,88 ±1,19	171,88 ±2,75	32,55 ±1,51	8,50 ±0,76	0,80 ±0,08	3,77 ±0,51

Tableau 238: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours de différentes saisons de l'année 2010

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	6,78 ±0,64	14,80 ±0,96	360,33 ±3,85	37,80 ±1,51	421,21 ±4,20	60,44 ±1,70	19,32 ±1,19	3,46 ±0,50	15,88 ±1,15
Printemps	4,06 ±0,56	12,45 ±0,90	96,50 ±1,97	29,75 ±1,49	285,42 ±3,65	35,66 ±1,51	13,50 ±0,90	2 ±0,20	10,75 ±0,85
Eté	4,33 ±0,57	10,75 ±0,85	107 ±2	34,65 ±1,50	300 ±3,75	40,32 ±1,53	13,90 ±0,90	2,77 ±0,45	11,57 ±0,87

Tableau 239: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours des différentes de l'année 2010.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Hiver	0,90 ±0,09	10,88 ±0,85	124,90 ±2,25	4,50 ±0,56	61 ±1,70	16,44 ±1,16	9,90 ±0,97	4,66 ±0,56	7,82 ±0,71
Printemps	1,10 ±0,10	17,56 ±1,17	220 ±3,44	4,64 ±0,56	127,22 ±2,27	23,33 ±1,30	8,88 ±0,67	3,87 ±0,51	7,90 ±0,72
Eté	1,23 ±0,30	15,74 ±1,15	264,33 ±3,58	4,82 ±0,57	142,10 ±2,38	30,77 ±1,50	15,22 ±1,15	3,78 ±0,50	7,21 ±0,71

Tableau 240: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les graines du blé dur (extrait par l'eau régale) aux cours des différentes saisons de l'année 2010.

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cr
Printemps	3,62 ±0,50	60,55 ±1,70	81,90 ±1,87	26,75 ±1,46	151,66 ±2,40	28,76 ±1,48	9,77 ±0,95	5,28 ±0,59	5,22 ±0,58
Eté	3,87 ±0,51	79,69 ±0,85	93,55 ±1,95	28,90 ±1,48	193,89 ±3,25	40,33 ±1,53	12,38 ±0,90	3,94 ±0,50	6 ±0,63

Tableau 241: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du poivron dans les différentes saisons de l'année 2006 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	700,21 ±5,61	7,32 ±0,71	15,50 ±1,15	1,14 ±0,14	00	8,55 ±0,78	10,88 ±0,85	35,76 ±1,51	9,50 ±0,80
Printemps	735,66 ±5,66	16,74 ±1,16	35,38 ±1,51	3,25 ±0,50	0,47 ±0,046	19,66 ±1,19	20,55 ±1,20	64,54 ±1,70	14,33 ±0,95
Eté	726,45 ±5,63	11,96 ±0,87	26,56 ±1,46	1,61 ±0,16	00	15,70 ±1,15	14,22 ±0,95	58,32 ±1,65	12,44 ±0,90

Tableau 242: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du poivron dans les différentes saisons de l'année 2006 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	300 ±3,75	30,11 ±1,50	19,32 ±1,19	0,55 ±0,05	00	10,24 ±0,85	42,42 ±1,53	65,54 ±1,71	1,50 ±0,15
Printemps	328,34 ±3,81	66,33 ±1,72	31 ±1,50	0,87 ±0,087	0,32 ±0,032	24,77 ±1,39	95,36 ±1,97	83,32 ±1,87	3,44 ±0,50
Eté	318,66 ±3,80	52,42 ±1,60	23,32 ±1,30	0,63 ±0,062	00	22,32 ±1,28	86,5 ±1,88	70,66 ±1,80	1,90 ±0,19

Tableau 243: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les fruits du poivron dans les différentes saisons de l'année 2006 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	233 ±3,44	10,25 ±0,85	37,78 ±1,51	2 ±0,20	00	1,90 ±0,19	92,66 ±1,90	1840,21 ±6,40	14,76 ±0,95
Printemps	287,50 ±3,65	29,64 ±1,49	66,90 ±1,72	5,78 ±0,59	0,88 ±0,087	4,87 ±0,54	134,72 ±2,35	1893,45 ±6,48	30,41 ±1,50
Eté	273,24 ±3,60	22,33 ±1,28	52,66 ±1,60	3,44 ±0,50	00	3,15 ±0,50	110,45 ±2,15	1875,33 ±6,44	25,33 ±1,45

Tableau 244: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du poivron dans les différentes saisons de l'année 2007 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	721,21 ±5,62	10,48 ±0,85	16,33 ±1,16	1,54 ±0,15	0,10 ±0,01	9,18 ±0,91	14,25 ±0,95	48,66 ±1,58	12 ±0,90
Printemps	758,41 ±5,70	24,19 ±1,44	37,34 ±1,50	3,95 ±0,54	0,82 ±0,08	20,23 ±1,20	24,66 ±1,44	78,45 ±1,84	17,50 ±1,17
Eté	740,90 ±5,67	18,24 ±1,18	27,21 ±1,46	2 ±0,20	0,24 ±0,024	16,43 ±1,16	18,33 ±1,18	69 ±1,78	15,33 ±1,15

Tableau 245: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du poivron dans les différentes saisons de l'année 2007 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	315,12 ±3,77	35,42 ±1,50	24,76 ±1,44	0,80 ±0,08	0,20 ±0,02	11,33 ±0,87	46,32 ±1,56	76,87 ±1,82	2 ±0,20
Printemps	340 ±3,90	70,41 ±1,80	38,50 ±1,51	1 ±0,10	0,52 ±0,05	25,80 ±1,45	118 ±2,10	100 ±2	4,10 ±0,56
Eté	327,25 ±3,80	60,66 ±1,70	29,68 ±1,50	0,95 ±0,095	0,26 ±0,026	23,78 ±1,40	97,18 ±1,97	82,44 ±1,88	2,55 ±0,46

Tableau 246: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les fruits du poivron dans les différentes saisons de l'année 2007 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	242,50 ±3,42	12,20 ±0,90	45,88 ±0,50	2,19 ±0,20	0,22 ±0,02	2,06 ±0,20	100 ±2	1861,22 ±6,50	16,54 ±1,16
Printemps	300 ±3,75	33,50 ±1,50	79,33 ±0,50	5,90 ±0,58	0,97 ±0,09	5,65 ±0,57	149,88 ±2,40	1900,10 ±6,60	32,36 ±1,50
Eté	285,33 ±3,60	25,48 ±0,50	65,11 ±0,50	3,58 ±0,50	0,25 ±0,02	4,23 ±0,53	120,33 ±2,25	1888,13 ±6,55	27 ±1,47

Tableau 247: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du poivron dans les différentes saisons de l'année 2008 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	730,11 ±5,65	11,50 ±0,87	18,44 ±1,18	1,85 ±1,18	0,30 ±0,03	9,30 ±0,95	17 ±1,50	58,21 ±1,68	14,27 ±0,97
Printemps	770,33 ±5,83	25,24 ±1,45	38,40 ±1,52	4,10 ±0,53	1 ±0,10	20,42 ±1,20	27,33 ±1,50	90 ±1,94	19,33 ±1,19
Eté	751 ±5,71	19,41 ±1,19	29,28 ±1,50	2,21 ±0,20	0,50 ±0,05	16,87 ±1,16	19,90 ±1,50	74,88 ±1,81	17,22 ±1,17

Tableau 248: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du poivron dans les différentes saisons de l'année 2008 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	328,15 ±3,79	37,21 ±1,51	27 ±1,47	1 ±0,10	0,25 ±0,025	12,41 ±0,90	50,46 ±1,60	82,33 ±1,88	5,22 ±0,54
Printemps	355,37 ±3,95	72,30 ±1,80	41,23 ±1,54	1,23 ±1,30	0,74 ±0,075	26,90 ±1,46	128,77 ±2,25	118,44 ±2,20	8,50 ±0,77
Eté	336,50 ±3,80	62,44 ±1,71	32,77 ±1,50	1,11 ±0,11	0,34 ±0,034	24,80 ±1,44	110 ±2,15	96,55 ±1,97	6,90 ±0,64

Tableau 249: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les fruits du poivron dans les différentes saisons de l'année 2008 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	250,50 ±3,50	14,55 ±0,95	50,23 ±1,60	2,30 ±0,30	0,32 ±0,03	3 ±0,50	110,22 ±2,11	1873,84 ±6,63	19,33 ±1,19
Printemps	315,22 ±3,78	35,33 ±1,51	82,44 ±1,88	6 ±0,63	1,10 ±0,10	6,11 ±0,64	162,33 ±2,63	1924,38 ±6,70	35,45 ±1,51
Eté	300,11 ±3,75	27 ±1,47	68,30 ±1,77	3,88 ±0,51	0,46 ±0,045	4,76 ±0,55	131,44 ±2,36	1895,22 ±6,64	30,26 ±1,50

Tableau 250: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du poivron dans les différentes saisons de l'année 2009 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	741,17 ±5,67	13,76 ±0,90	21,33 ±1,20	2 ±0,20	0,38 ±0,037	10,42 ±0,85	22,66 ±1,28	68,67 ±1,76	16,20 ±1,16
Printemps	783,25 ±5,88	27,34 ±1,47	41,42 ±1,54	4,35 ±0,54	1,20 ±0,20	21,33 ±1,20	32,74 ±1,50	100,55 ±2	21,42 ±1,20
Eté	764,66 ±5,73	21,55 ±0,20	32,64 ±1,50	2,50 ±0,50	0,75 ±0,075	18,90 ±1,18	26,26 ±1,46	85,44 ±1,85	19,33 ±1,19

Tableau 251: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du poivron dans les différentes saisons de l'année 2009 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	340,32 ±3,81	39,28 ±1,52	29,11 ±1,49	1,20 ±0,20	0,50 ±0,05	13,21 ±0,95	59,42 ±1,70	90 ±1,93	7,33 ±0,72
Printemps	363,90 ±3,98	75 ±1,83	44,26 ±1,54	1,45 ±0,14	0,90 ±0,09	27,88 ±1,47	138,80 ±2,38	128,32 ±2,25	10,66 ±0,85
Eté	351,11 ±3,83	64,73 ±1,73	34,80 ±1,50	1,33 ±0,13	0,65 ±0,065	25,77 ±1,47	118,28 ±2,36	107,47 ±2,10	8,96 ±0,77

Tableau 252: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les fruits du poivron dans les différentes saisons de l'année 2009 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	261,60 ±3,58	15,67 ±1,15	54,33 ±1,62	2,66 ±0,46	0,55 ±0,05	4,10 ±0,53	119,90 ±2,20	1880,33 ±6,63	22,42 ±1,27
Printemps	325,30 ±3,79	37,90 ±1,51	87,50 ±1,89	6,27 ±0,63	1,36 ±0,13	5,55 ±0,58	170,46 ±2,68	1935,21 ±6,74	38,55 ±1,51
Eté	310,66 ±3,75	29,88 ±1,50	74,85 ±1,81	4,11 ±0,55	0,83 ±0,081	5,10 ±0,55	142,12 ±2,40	1909,90 ±6,69	33,33 ±1,50

Tableau 253: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du poivron dans les différentes saisons de l'année 2010 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	750,20 ±5,74	14,80 ±0,97	25,38 ±1,45	2,23 ±0,28	0,60 ±0,06	11,50 ±0,87	30,42 ±1,50	76,23 ±1,82	20,56 ±1,20
Printemps	800,31 ±5,90	29 ±1,50	46,33 ±1,56	4,66 ±0,54	1,42 ±0,14	22,41 ±1,25	40,87 ±1,54	115,66 ±2,10	26,21 ±1,46
Eté	772 ±5,80	23,90 ±1,40	37,86 ±1,50	2,76 ±0,47	0,94 ±0,094	19,88 ±1,19	32,25 ±1,50	98 ±1,99	23,75 ±1,35

Tableau 254: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du poivron dans les différentes saisons de l'année 2010 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	349,87 ±3,83	41,55 ±1,54	34,66 ±1,50	1,41 ±0,14	0,72 ±0,07	14,33 ±0,96	70 ±1,79	100,66 ±2	10,20 ±0,85
Printemps	380,77 ±4,18	78,90 ±1,85	50 ±1,60	1,70 ±1,17	1,11 ±0,10	28,75 ±1,48	152,33 ±2,45	140,55 ±2,40	13,88 ±0,90
Eté	360,33 ±3,86	66,33 ±1,74	39,55 ±1,53	1,55 ±0,15	0,88 ±0,087	26,80 ±1,46	131 ±2,35	119 ±2,18	11,90 ±0,87

Tableau 255: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les fruits du poivron dans les différentes saisons de l'année 2010 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Mn	Fe	Cr
Automne	270,33 ±3,60	19,80 ±1,19	62,54 ±1,70	2,88 ±0,48	0,70 ±0,07	5,10 ±0,58	127,88 ±2,30	1890,50 ±6,65	26,33 ±1,46
Printemps	340,77 ±3,82	44,88 ±1,55	98,66 ±1,98	6,50 ±0,63	1,66 ±1,16	6,80 ±0,64	182,33 ±2,76	1950,33 ±6,78	43,88 ±1,54
Eté	320 ±3,78	33,90 ±1,50	86,77 ±1,88	4,33 ±0,56	1 ±0,10	6,21 ±0,63	155,54 ±2,46	1920,45 ±6,70	36,45 ±1,51

Tableau 256: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du maïs dans les différentes saisons de l'année 2006 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	00	0,90 ±0,09	210,23 ±3,18	2,32 ±0,44	5,71 ±0,58	240 ±3,40	0,55 ±0,054	00	8,73 ±0,77
Printemps	0,33 ±0,03	2,48 ±0,47	228,42 ±3,20	4,75 ±0,56	8,46 ±0,77	269,50 ±3,67	0,94 ±0,093	0,25 ±0,025	11,84 ±0,87
Eté	00	1,14 ±0,14	213,51 ±3,18	3,50 ±0,50	6,88 ±0,64	258,32 ±3,58	0,70 ±0,07	00	9,67 ±0,95

Tableau 257: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du maïs dans les différentes saisons de l'année 2006 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	00	1 ±0,10	132,55 ±2,32	2 ±0,20	6,77 ±0,64	181,55 ±2,76	1 ±0,10	00	8,70 ±0,78
Printemps	0,31 ±0,03	2,88 ±0,48	162,42 ±2,50	3,90 ±0,51	9,50 ±0,82	200,62 ±3,10	2,11 ±0,21	0,25 ±0,40	11,55 ±0,87
Eté	00	1,33 ±0,13	154,33 ±2,46	2,23 ±0,30	7,04 ±0,72	190,77 ±2,80	1,21 ±0,12	00	9,61 ±0,82

Tableau 258: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les grains du maïs dans les différentes saisons de l'année 2006 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,10 ±0,01	1,20 ±0,12	22,42 ±0,30	1,11 ±0,10	7,33 ±0,72	1,95 ±0,19	0,31 ±0,03	00	0,66 ±0,63
Printemps	0,30 ±0,03	2,47 ±0,40	45,33 ±1,55	2,89 ±0,48	12,75 ±0,90	4,80 ±0,56	1,48 ±0,14	0,25 ±0,024	2,74 ±0,45
Eté	0,13 ±0,012	1,53 ±0,15	30,21 ±1,50	1,48 ±0,14	9,42 ±0,80	2,02 ±0,20	0,50 ±0,05	00	0,98 ±0,098

Tableau 259: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du maïs dans les différentes saisons de l'année 2007 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,27 ±0,026	7,88 ±0,73	220,44 ±3,20	5 ±0,55	11,73 ±0,87	248,77 ±3,42	0,80 ±0,08	0,23 ±0,024	11,66 ±0,87
Printemps	0,60 ±0,06	13,74 ±0,90	241,50 ±3,40	8,90 ±0,78	15,66 ±1	281,33 ±3,71	1 ±0,10	0,60 ±0,06	14,90 ±0,97
Eté	0,33 ±0,032	9,33 ±0,80	229,33 ±3,27	7,28 ±0,72	13,11 ±0,90	269,55 ±3,64	0,93 ±0,092	0,31 ±0,03	12,88 ±0,90

Tableau 260: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du maïs dans les différentes saisons de l'année 2007 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,21 ±0,21	6,45 ±0,63	140,43 ±2,40	4,12 ±0,14	15,44 ±1,15	188 ±2,77	3,55 ±0,51	0,21 ±0,02	13,88 ±0,90
Printemps	0,83 ±0,083	10,77 ±0,85	172 ±2,62	5,88 ±0,14	20,90 ±1,20	212,33 ±3,18	6,78 ±0,64	0,50 ±0,05	16,75 ±1,16
Eté	0,38 ±0,037	7,88 ±0,73	163,18 ±2,50	4,90 ±0,14	17,50 ±1,17	200,66 ±3,10	5 ±0,55	0,31 ±0,03	14,90 ±0,97

Tableau 261: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les grains du maïs dans les différentes saisons de l'année 2007 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,31 ±0,03	7,33 ±0,63	30,33 ±1,50	3,43 ±0,51	14,55 ±0,96	6,11 ±0,63	1 ±0,10	0,33 ±0,03	1,96 ±0,19
Printemps	0,74 ±0,074	12,50 ±0,90	57,44 ±1,67	5,76 ±0,60	19,32 ±1,19	12 ±0,90	2,33 ±0,36	1 ±0,10	5,68 ±0,59
Eté	0,41 ±0,04	9,88 ±0,82	41 ±1,54	4,80 ±0,57	16,21 ±1,16	8,77 ±0,77	1,42 ±0,14	0,50 ±0,05	2,33 ±0,36

Tableau 262: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du maïs dans les différentes saisons de l'année 2008 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,43 ±0,55	10,75 ±0,85	232,33 ±3,30	6,43 ±0,63	20,55 ±1,20	268,22 ±3,64	1 ±0,10	0,46 ±0,045	14,22 ±0,97
Printemps	0,90 ±0,80	16,88 ±1,16	253,66 ±3,50	9,50 ±0,80	29,88 ±1,50	290,55 ±3,82	1,51 ±0,15	0,90 ±0,09	17,88 ±1,17
Eté	0,76 ±0,73	12,42 ±0,90	240,55 ±3,40	8,23 ±0,77	23,90 ±1,40	278,33 ±3,70	1,25 ±0,30	0,66 ±0,066	15,90 ±1,15

Tableau 263: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du maïs dans les différentes saisons de l'année 2008 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,42 ±0,04	10,33 ±0,85	151,33 ±2,50	6,33 ±0,63	21,76 ±1,21	197,44 ±3	4,78 ±0,55	0,54 ±0,053	16,34 ±1,16
Printemps	1,24 ±0,31	14,88 ±0,98	183,66 ±2,76	8,90 ±0,77	29,45 ±1,50	226,90 ±3,23	7,88 ±0,73	1 ±0,10	20 ±1,20
Eté	0,60 ±0,06	11,77 ±0,87	172,25 ±2,64	7,11 ±0,72	24,33 ±1,34	210 ±3,10	6,55 ±0,63	0,80 ±0,08	18,23 ±1,18

Tableau 264: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les grains du maïs dans les différentes saisons de l'année 2008 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,55 ±0,57	13,76 ±0,90	41 ±1,44	5,27 ±0,57	21 ±1,20	17,22 ±1,17	2,11 ±0,21	0,55 ±0,57	3,66 ±0,50
Printemps	1 ±0,10	18,33 ±1,18	68,66 ±1,77	8,88 ±0,78	27,55 ±1,47	23,50 ±1,34	3,87 ±0,51	1,76 ±0,17	8,88 ±0,77
Eté	0,74 ±0,073	15,90 ±1,15	52,72 ±1,60	6,45 ±0,63	25,42 ±1,45	19,90 ±1,19	2,77 ±0,47	1,21 ±0,21	6,42 ±0,63

Tableau 265: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du maïs dans les différentes saisons de l'année 2009 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,75 ±0,075	15,66 ±1,15	240 ±3,40	7,88 ±0,73	27,33 ±1,47	276,33 ±3,66	1,21 ±0,21	0,80 ±0,08	17,34 ±1,17
Printemps	1,11 ±0,10	22 ±1,20	262,90 ±3,56	11,20 ±0,87	38,55 ±1,51	300,64 ±4	1,73 ±0,17	1,20 ±0,20	21,90 ±1,21
Eté	0,95 ±0,094	18,21 ±1,18	251,77 ±3,45	9,55 ±0,81	32,68 ±1,50	287,53 ±3,77	1,50 ±1,15	1 ±0,10	18,87 ±1,18

Tableau 266: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du maïs dans les différentes saisons de l'année 2009 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,66 ±0,066	16,41 ±1,16	160 ±2,58	7,26 ±0,73	27,66 ±1,47	203,46 ±3	5,62 ±0,57	1 ±0,10	20 ±1,20
Printemps	1,48 ±0,55	20,33 ±1,20	192,55 ±2,96	10,88 ±0,85	35,77 ±1,51	235,87 ±3,35	9 ±0,80	2,11 ±0,21	25,77 ±1,45
Eté	0,89 ±0,09	18,22 ±1,18	180,41 ±2,77	8,65 ±0,78	30,33 ±1,50	219,2 ±3,20	7,50 ±0,72	1,24 ±0,30	23,66 ±1,30

Tableau 267: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les grains du maïs dans les différentes saisons de l'année 2009 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	0,77 ±0,077	20 ±1,20	50,23 ±1,60	6,45 ±0,63	30,50 ±1,50	25,33 ±1,45	3,65 ±0,50	0,80 ±0,08	6,70 ±0,64
Printemps	1,33 ±0,13	26,90 ±1,46	79,47 ±1,78	10,11 ±0,85	39,66 ±1,53	34,88 ±1,51	5,13 ±0,56	2 ±0,20	14,44 ±0,96
Eté	0,97 ±0,096	23,66 ±1,30	63,55 ±1,71	7,90 ±1,73	35,28 ±1,51	29,77 ±1,50	4,61 ±0,54	1,44 ±0,14	10,22 ±0,85

Tableau 268: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les tiges du maïs dans les différentes saisons de l'année 2010 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	1 ±0,1	20,33 ±1,20	250,23 ±2,49	8,50 ±0,77	36,60 ±1,51	285 ±3,80	2,63 ±0,46	1 ±0,10	22,44 ±1,28
Printemps	1,40 ±0,14	28,20 ±1,48	271,44 ±2,68	13,30 ±0,13	47,90 ±1,57	310,55 ±4,10	3,88 ±0,51	2,85 ±0,48	29,77 ±1,50
Eté	1,11 ±0,10	24 ±1,44	260,90 ±2,60	11,83 ±0,87	42 ±1,54	296,33 ±3,95	2,90 ±0,49	2 ±0,20	25,90 ±1,45

Tableau 269: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les feuilles du maïs dans les différentes saisons de l'année 2010 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	1,1 ±0,10	21,50 ±1,24	170,55 ±2,68	8,30 ±0,77	36,88 ±1,51	212 ±2,12	7,55 ±0,73	1,75 ±0,17	23,77 ±1,35
Printemps	2,24 ±0,30	28,78 ±1,49	200,33 ±3,15	12 ±0,90	43,75 ±1,54	242,65 ±2,40	10 ±0,85	3,66 ±1,51	29,80 ±1,50
Eté	1,20 ±0,20	25,66 ±1,46	191,76 ±3	9,50 ±0,80	39 ±1,53	230 ±2,30	9,33 ±0,80	2,60 ±1,46	26,33 ±1,46

Tableau 270: Les teneurs en métaux lourds (mg/kg de MS) dans les grains du maïs dans les différentes saisons de l'année 2010 (extrait par l'eau régale).

Saisons/ETM	Cd	Cu	Fe	Pb	Mn	Zn	Ni	Co	Cr
Automne	1,20 ±0,12	25,32 ±1,45	60,44 ±1,70	8 ±0,78	41,53 ±1,54	34,77 ±1,50	5,23 ±0,56	1 ±0,10	10,66 ±0,85
Printemps	2,11 ±0,21	32,11 ±1,50	88,50 ±1,88	12,33 ±0,90	50,80 ±1,60	44,65 ±1,55	7,20 ±0,73	3,56 ±0,50	20,75 ±1,20
Eté	1,33 ±0,13	28,44 ±1,48	72,66 ±1,80	9,88 ±0,83	44,33 ±1,45	38,90 ±1,52	6,76 ±0,64	2,50 ±0,40	15,22 ±1,15

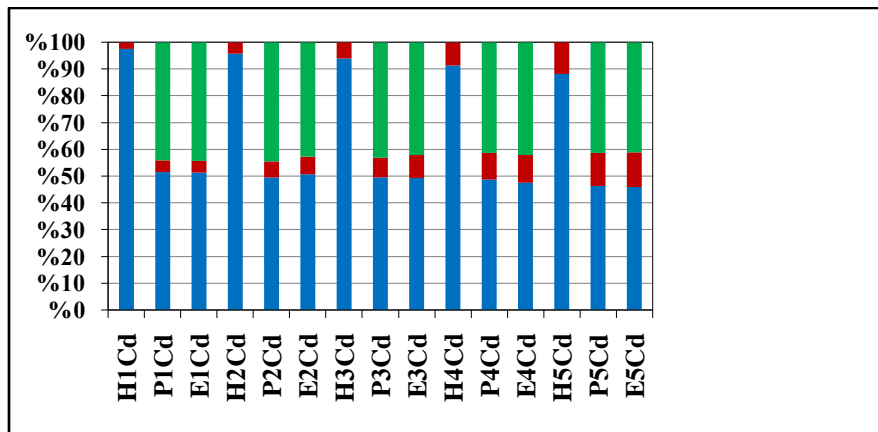


Figure 91: Histogramme illustrant la répartition du Cd (en % du contenu total) dans les différents organes (excepté les racines) du **blé dur** aux cours de différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

1, 2, 3, 4 et 5 représentent respectivement les années 2006, 2007, 2008, 2009 et 2010.

H: la saison d'hiver, **A:** la saison d'automne, **P:** la saison de printemps et **E:** la saison d'été.

■ Les tiges ■ Les feuilles ■ Les Graines ■ Les racines

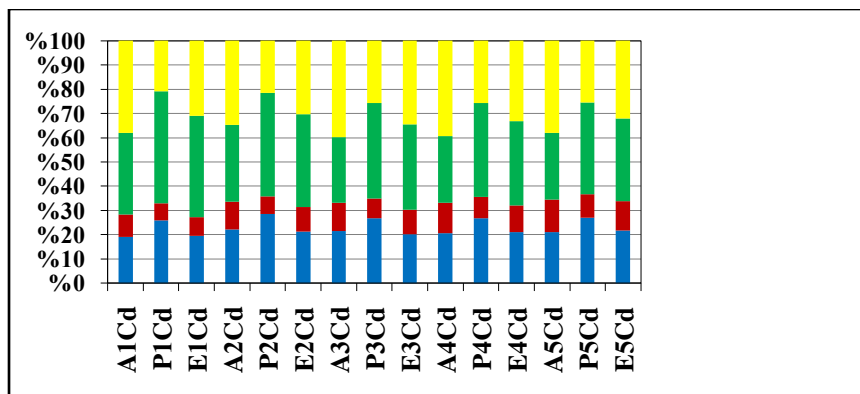


Figure 92: Histogramme illustrant la répartition du Cd (en % du contenu total) dans les différents organes du **poivron** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

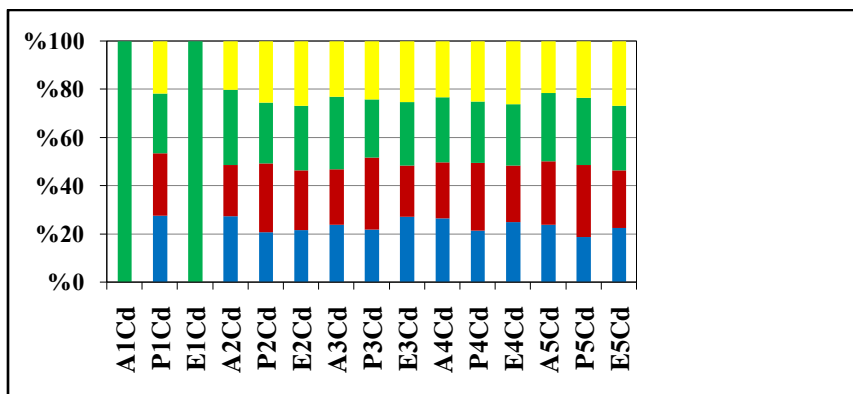


Figure 93: Histogramme illustrant la répartition du **Cd** (en % du contenu total) dans les différents organes du **maïs** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

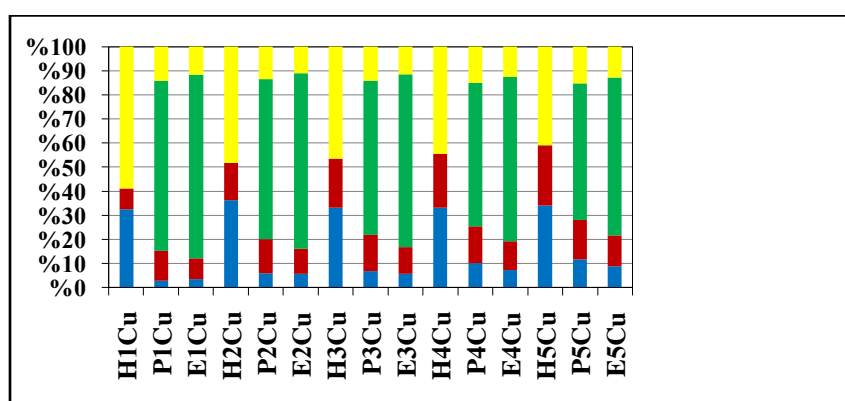


Figure 94: Histogramme illustrant la répartition du **Cu** (en % du contenu total) dans les différents organes du **blé dur** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

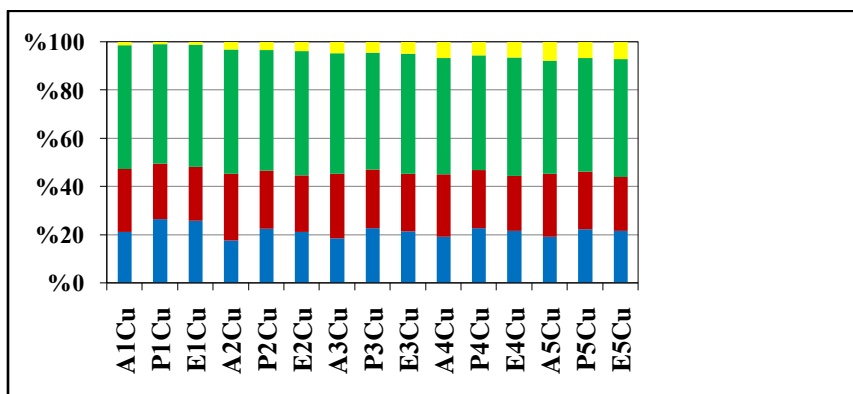


Figure 95: Histogramme illustrant la répartition du **Cu** (en % du contenu total) dans les différents organes du **poivron** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

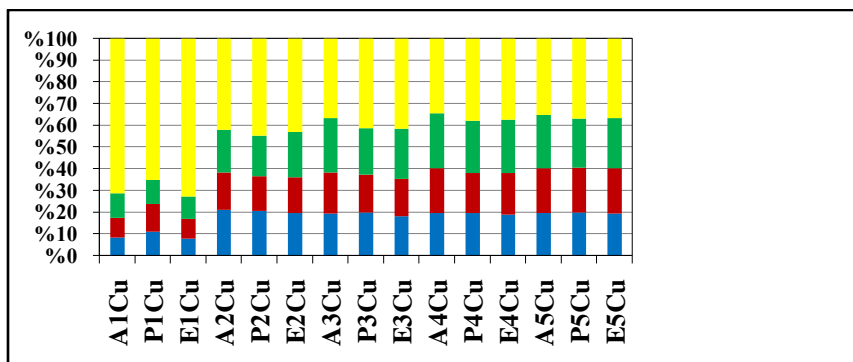


Figure 96: Histogramme illustrant la répartition du **Cu** (en % du contenu total) dans les différents organes du **maïs** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

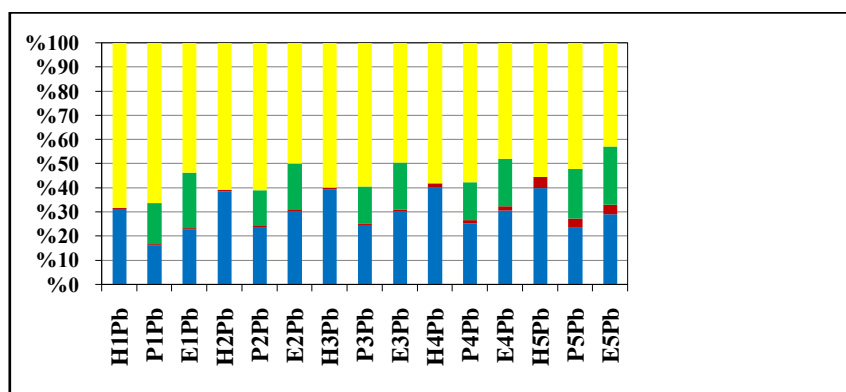


Figure 97: Histogramme illustrant la répartition du **Pb** (en % du contenu total) dans les différents organes du **blé dur** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

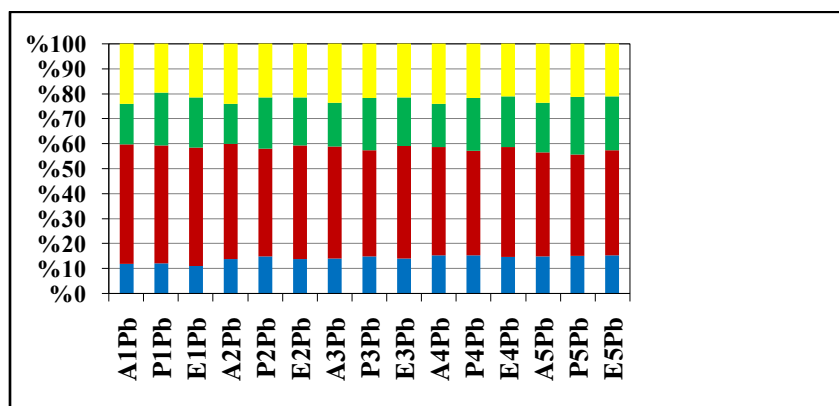


Figure 98: Histogramme illustrant la répartition du **Pb** (en % du contenu total) dans les différents organes du **poivron** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

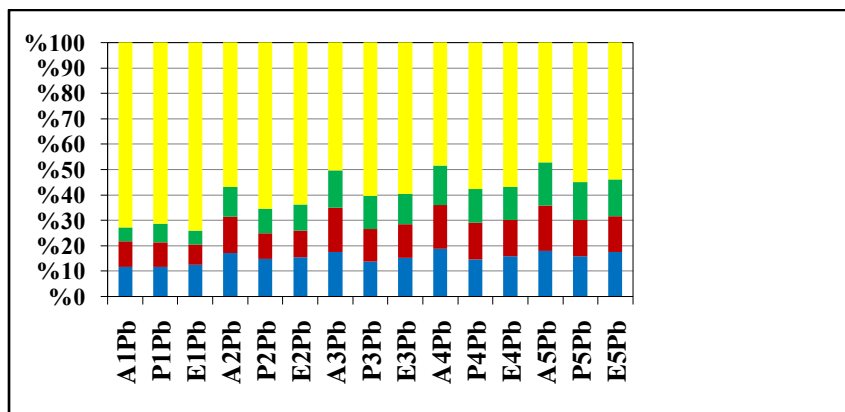


Figure 99: Histogramme illustrant la répartition du **Pb** (en % du contenu total) dans les différents organes du **maïs** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

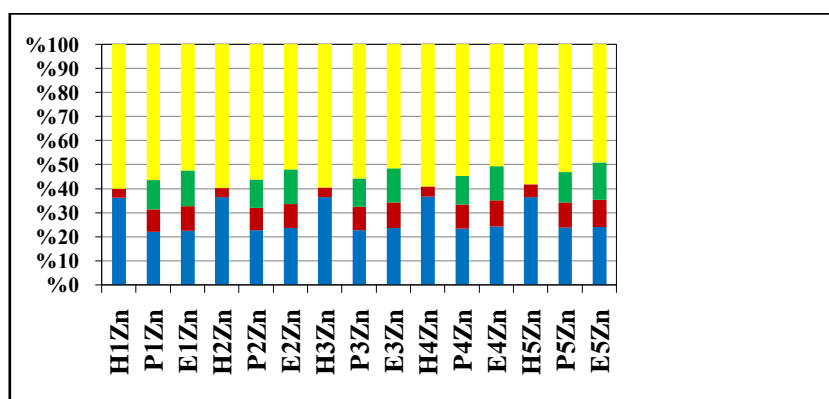


Figure 100: Histogramme illustrant la répartition du **Zn** (en % du contenu total) dans les différents organes du **blé dur** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

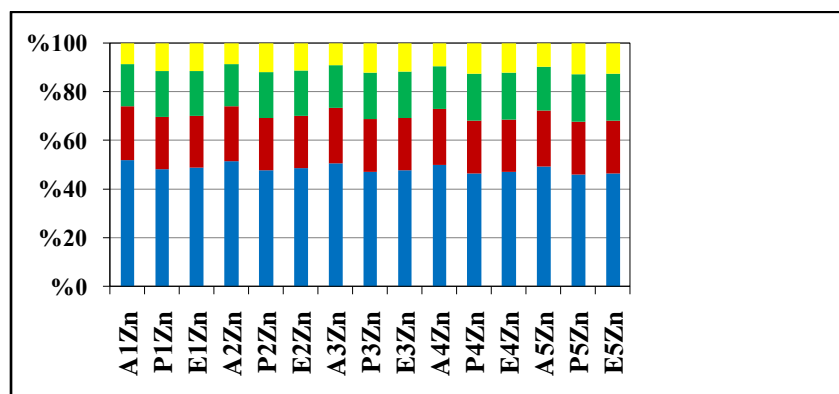


Figure 101: Histogramme illustrant la répartition du **Zn** (en % du contenu total) dans les différents organes du **poivron** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

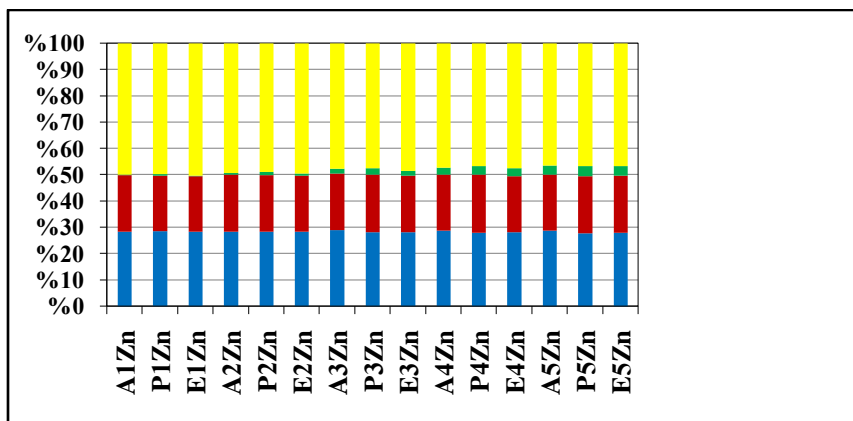


Figure 102: Histogramme illustrant la répartition du **Zn** (en % du contenu total) dans les différents organes du **maïs** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

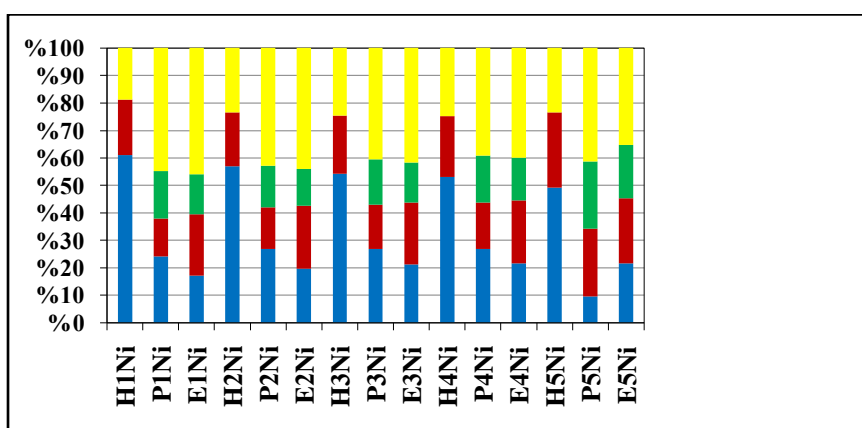


Figure 103: Histogramme illustrant la répartition du **Ni** (en % du contenu total) dans les différents organes du **blé dur** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

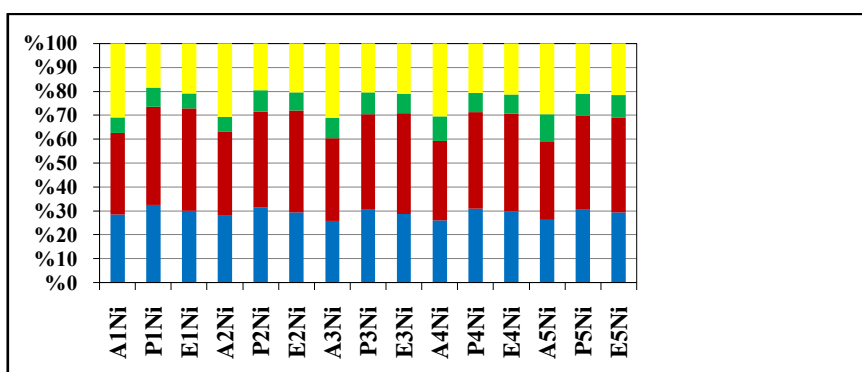


Figure 104: Histogramme illustrant la répartition du **Ni** (en % du contenu total) dans les différents organes du **poivron** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

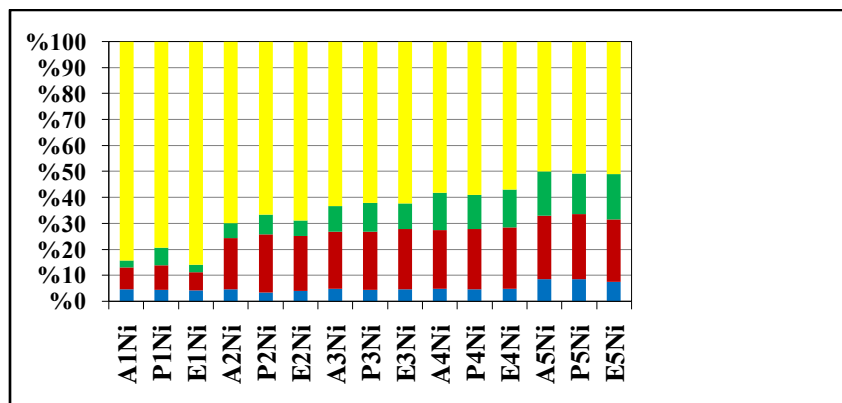


Figure 105: Histogramme illustrant la répartition du Ni (en % du contenu total) dans les différents organes du **maïs** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

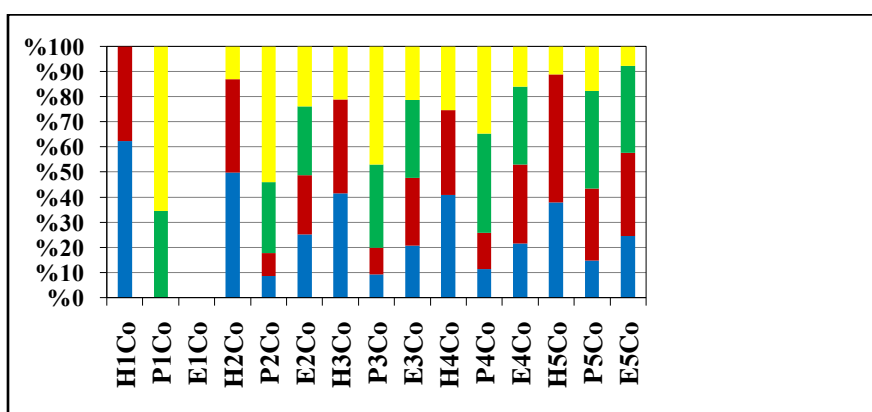


Figure 106: Histogramme illustrant la répartition du Co (en % du contenu total) dans les différents organes du **blé dur** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

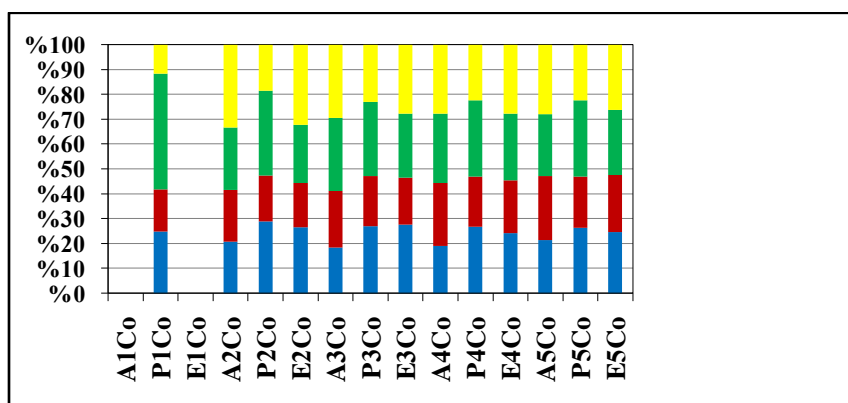


Figure 107: Histogramme illustrant la répartition du Co (en % du contenu total) dans les différents organes du **poivron** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

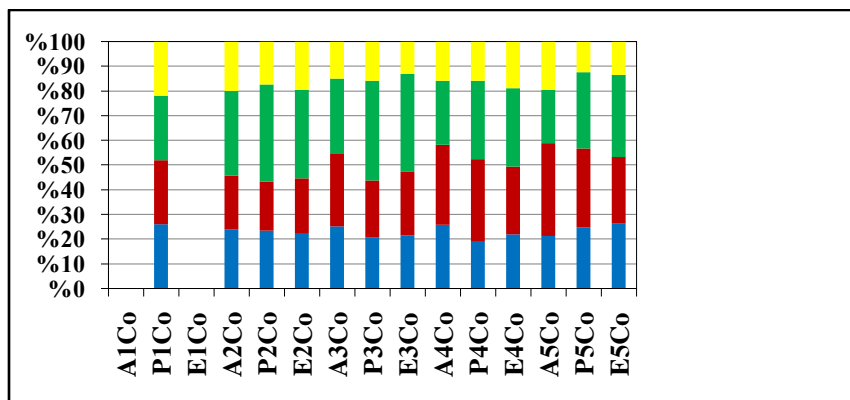


Figure 108: Histogramme illustrant la répartition du **Co** (en % du contenu total) dans les différents organes du **maïs** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

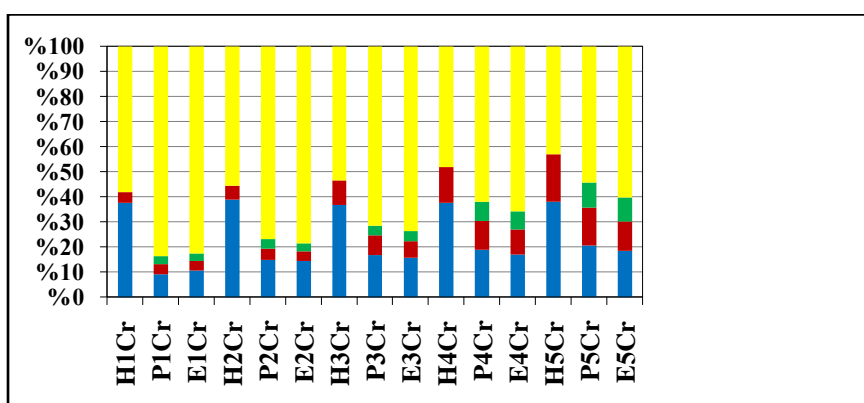


Figure 109: Histogramme illustrant la répartition du **Cr** (en % du contenu total) dans les différents organes du **blé dur** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

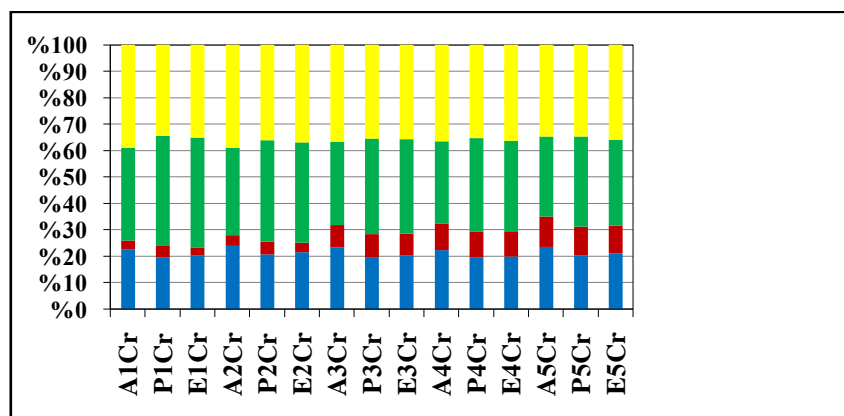


Figure 110: Histogramme illustrant la répartition du **Cr** (en % du contenu total) dans les différents organes du **poivron** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

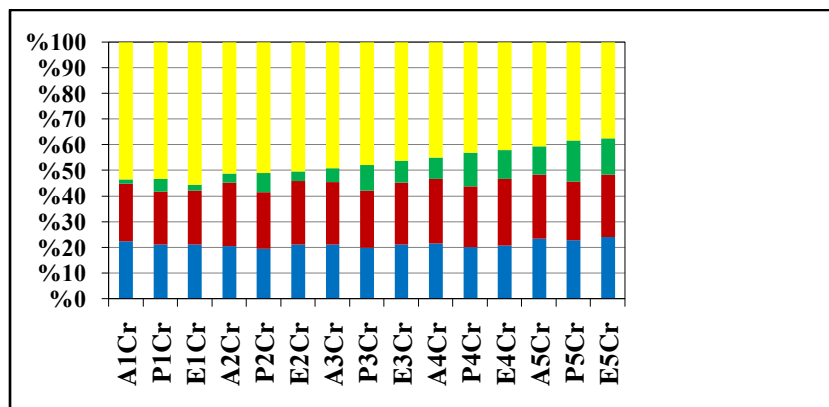


Figure 111: Histogramme illustrant la répartition du **Cr** (en % du contenu total) dans les différents organes du **maïs** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

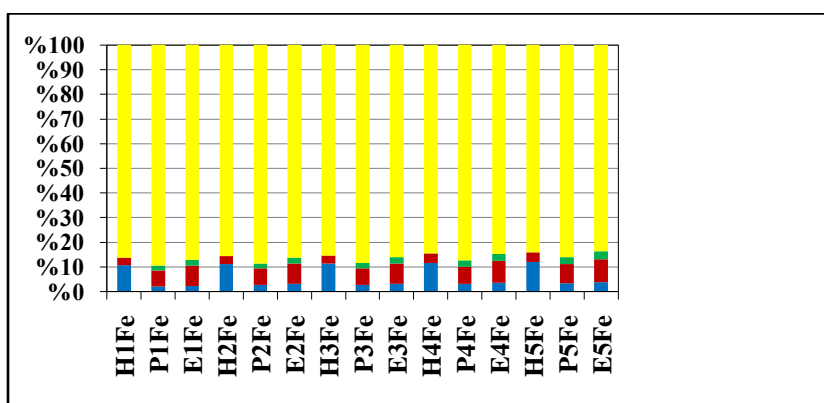


Figure 112: Histogramme illustrant la répartition du **Fe** (en % du contenu total) dans les différents organes du **blé dur** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

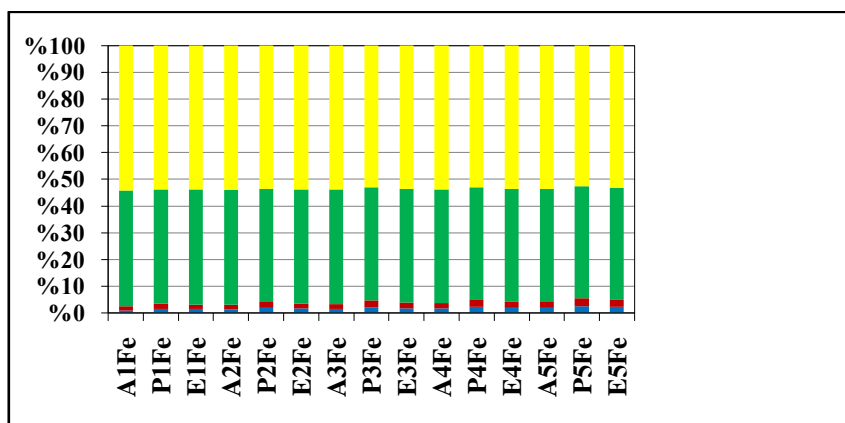


Figure 113: Histogramme illustrant la répartition du **Fe** (en % du contenu total) dans les différents organes du **poivron** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

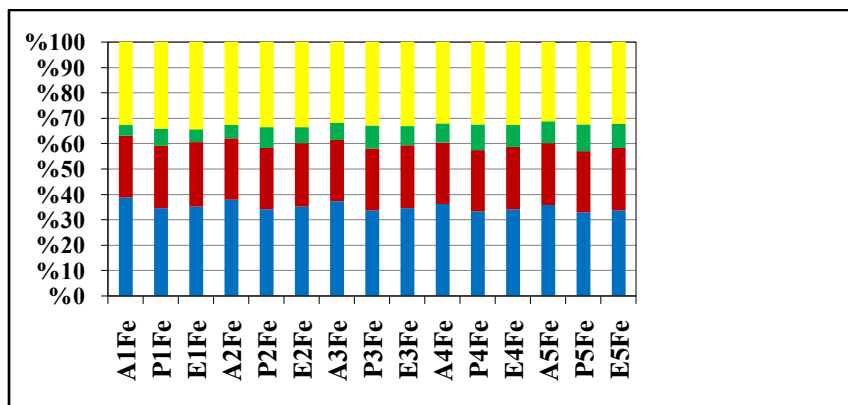


Figure 114: Histogramme illustrant la répartition du **Fe** (en % du contenu total) dans les différents organes du **maïs** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

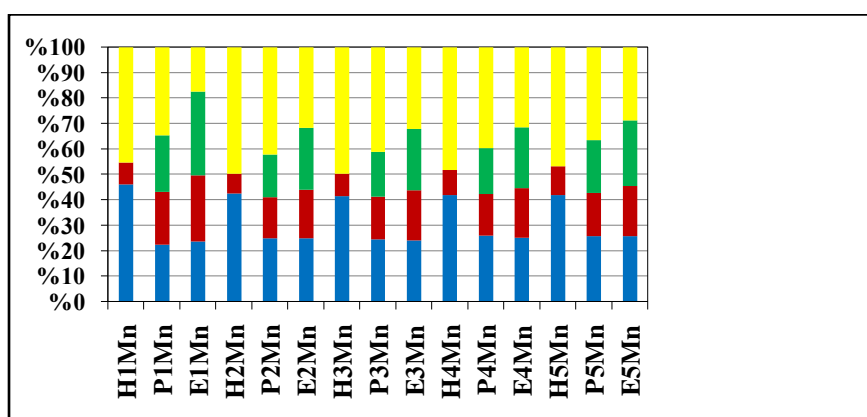


Figure 115: Histogramme illustrant la répartition du **Mn** (en % du contenu total) dans les différents organes du **blé dur** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

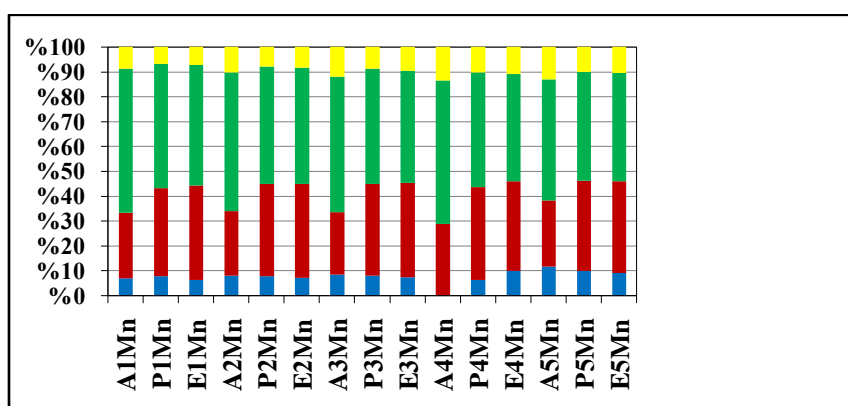


Figure 116: Histogramme illustrant la répartition du **Mn** (en % du contenu total) dans les différents organes du **poivron** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

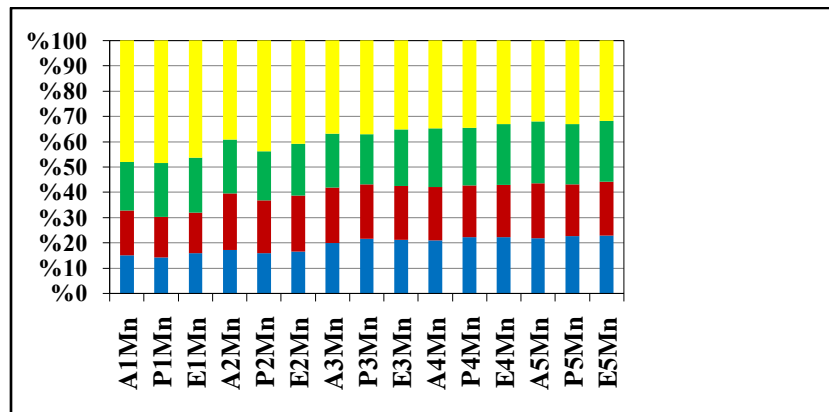


Figure 117: Histogramme illustrant la répartition du **Mn** (en % du contenu total) dans les différents organes du **maïs** aux cours des différentes saisons de l'année 2006 à 2010 (extrait à l'eau régale).

Ces données permettront par conséquent des comparaisons interannuelles, intersaisonniers et entre les différents organes pour chaque échantillon végétal.

II.1- Les racines

II.1.1- Variation saisonnière de la teneur en métaux lourds du blé dur, du poivron et du maïs

Pour le blé dur, les teneurs en Cd, Cu, Fe, Pb, Zn et Mn sont plus élevées en hiver qu'en printemps et été, alors que des teneurs en Ni, Co et Cr sont plus élevées en printemps.

Par ailleurs, pour le poivron et le maïs les teneurs en Cd, Cu, Fe, Pb, Zn, Mn, Ni, Co et Cr sont élevés en printemps.

II.1.2- Variation annuelle de la teneur en métaux lourds du blé dur, du poivron et du maïs

Il ya une variation significative entre les teneurs mesurées de 2006 à 2010, on remarque une augmentation de la teneur en métaux lourds, qui est considérable en fer, en zinc, en plomb et en chrome pour les trois plantes.

Les teneurs en métaux lourds sont très variables d'une plante à une autre.

Concernant **le blé dur**, les teneurs en Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co et Cr, varient respectivement entre $(1,58 \pm 0,15)$ mg/kg et $(2,59 \pm 0,50)$ mg/kg, entre $(8,79 \pm 0,78)$ mg/kg et $(17,77 \pm 1,17)$ mg/kg, entre $(39,42 \pm 1,53)$ mg/kg et $(67,90 \pm 1,75)$ mg/kg, entre $(584,94 \pm 4,25)$ mg/kg et $(676,22 \pm 4,78)$ mg/kg, entre $(4,22 \pm 0,56)$ mg/kg et $(22,73 \pm 1,30)$ mg/kg, entre 0 et $(2,40 \pm 0,44)$ mg/kg et entre $(10,44 \pm 0,85)$ mg/kg et $(37,44 \pm 1,51)$ mg/kg.

Quant au **poivron**, il présente des teneurs en Cd, en Cu, Pb et Zn oscillent respectivement entre $(2,26 \pm 0,32)$ mg/kg et $(4,42 \pm 3,55)$ mg/kg, entre $(1 \pm 0,10)$ mg/kg et $(13,80 \pm 0,95)$ mg/kg, entre $(15,17 \pm 1,15)$ mg/kg et $(41,44 \pm 1,54)$ mg/kg et entre $(115,43 \pm 2,15)$ mg/kg et $(220 \pm 3,20)$ mg/kg. Pour le Ni, le Co et le Cr, les teneurs dans les racines du poivron s'échelonnent entre $(9,31 \pm 0,80)$

mg/kg et $(15,50 \pm 1,15)$ mg/kg, entre 0 et $(1,20 \pm 0,20)$ mg/kg et entre $(16,44 \pm 1,16)$ mg/kg et $(44,65 \pm 1,56)$ mg/kg.

En outre, pour **le maïs**, les teneurs en Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co et Cr, varient respectivement entre 0 et $(1,76 \pm 0,17)$ mg/kg, entre $(7,72 \pm 0,72)$ et $(51,77 \pm 1,60)$ mg/kg, entre $(14,42 \pm 0,98)$ mg/kg et $(45,90 \pm 1,56)$ mg/kg, entre $(421,22 \pm 4,20)$ mg/kg et $(520,88 \pm 5,13)$ mg/kg, entre $(10,11 \pm 0,85)$ mg/kg et $(23,54 \pm 1,34)$ mg/kg, entre 0 et $(1,41 \pm 0,14)$ mg/kg et entre $(20,77 \pm 1,20)$ mg/kg et $(49,80 \pm 1,59)$ mg/kg.

Si on compare les teneurs en métaux dans les racines des trois plantes, on constate qu'à l'exception du Cu, Ni et Cr, les teneurs trouvées dans le blé dur sont plus élevées que celles déterminées dans le poivron et le maïs.

Que ce soit dans la partie aérienne ou dans les racines, le Fer présente les teneurs les plus élevées. Les teneurs trouvées dans les racines variant entre (2309 ± 7) mg/kg et $(2568,11 \pm 7,40)$ mg/kg pour le blé dur, entre $(2300 \pm 7,10)$ mg/kg et $(2466,20 \pm 7,34)$ mg/kg pour le poivron et entre $(178,50 \pm 2,70)$ mg/kg et $(269,43 \pm 3,64)$ mg/kg pour le maïs. Elles sont plus élevées que celles détectées dans la partie aérienne sauf pour le maïs.

Le Zinc présente également des teneurs importantes qui sont légèrement plus élevées dans la partie aérienne que dans les racines, à l'exception du blé dur le zinc est plus concentré dans les racines que dans la partie aérienne. Par contre, le Ni et le Pb montrent des teneurs légèrement plus élevés dans les racines que dans la partie aérienne, respectivement dans le maïs et dans les saisons d'hiver et printemps dans le blé dur.

Par ailleurs les teneurs en manganèse sont généralement faibles, oscillant entre $(13,41 \pm 0,90)$ mg/kg et $(67,33 \pm 1,75)$ mg/kg pour le blé dur, entre $(14,20 \pm 1,14)$ mg/kg et $(42,42 \pm 1,54)$ mg/kg pour le poivron et $(18,33 \pm 1,20)$ mg/kg et $(70,33 \pm 1,80)$ mg/kg pour le maïs. Ces teneurs ne dépassent pas les normes définies dans les tableaux (15 et 16). Le manganèse se concentre plus dans les parties aériennes que dans les racines.

Selon les teneurs, on peut classer les métaux dans l'ordre décroissant d'absorption :

Le blé dur: Fe >> Zn > Pb > Mn > Cr > Cu > Ni > Co > Cd.

Le poivron: Fe >> Zn > Pb > Mn > Cr > Ni > Cu > Cd > Co.

Le maïs: Zn > Fe > Mn > Cu > Cr > Pb > Ni > Cd > Co.

L'examen de l'ensemble de ces résultats permet de distinguer les faits suivants:

Les différentes valeurs obtenues en Cd, Pb, Zn, Cr pour le blé dur, le poivron et le maïs (excepté le Cd dans l'année 2006) sont à l'intérieur de la gamme des teneurs critiques en métaux lourds dans les plantes définie dans le tableau 15.

En comparant les valeurs obtenues avec les concentrations critiques au-dessus desquelles les effets de toxicité sont possibles, nous constatons que la teneur de Zn et Cr dépasse de loin le seuil critique des plantes (tableau 15) dans le blé dur, le poivron et le maïs.

Les teneurs en Fe dans le blé dur et le poivron sont bien au-dessus du seuil critique des plantes et dans les normes (tableau 15) pour le maïs.

Cependant, les teneurs en Cu dans le maïs dépassent légèrement le seuil de toxicité des plantes dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2007 et dans toutes les saisons des années 2008 à 2010, par contre les teneurs en Cu dans le blé dur sont dans les normes et sont en dessous du seuil normal dans le maïs.

Par ailleurs, les teneurs en Ni est légèrement en dessus du seuil toxique des plantes dans toutes les saisons des années 2006 à 2010 pour le maïs, concernant le blé dur dans les saisons de printemps et d'été des années 2006 à 2010 et quant au poivron dans les saisons de printemps et d'été des années 2007 à 2010.

En outre, les teneurs en Cd, dépassent de loin les seuils normaux des plantes, particulièrement pour le poivron.

Contrairement aux autres métaux lourds, les teneurs en Mn sont au-dessous des seuils normaux des plantes dans les trois plantes.

Enfin les teneurs en cobalts, sont dans le seuil normale des plantes dans les trois plantes, à l'exception pour le blé dur où les teneurs du cobalt sont nulles dans les saisons d'hiver et d'été de l'année 2006.

Conclusion

Quelles que soient l'espèce étudié, il ya un effet saisonnier sur les teneurs en Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Mn et Fe.

Le fer présente une importante accumulation par les racines du blé dur et du poivron. Une importance accumulation du Zn et de Cr par les racines du blé dur, le poivron et le maïs a été aussi constatée.

Cependant le blé dur montre une accumulation en Pb supérieure au poivron et au maïs.

De la même manière que pour le blé dur, le maïs accumule également des quantités de Ni dans les racines plus élevés que celle accumulés dans le poivron et le blé dur.

Une exception est cependant notable: le maïs est le seul végétal qui accumule le Cu.

Par conséquent, le blé dur, le poivron et le maïs montrent une accumulation moyenne en Cd.

Enfin, on constate des carences en manganèse dans les racines du blé dur, du poivron et du maïs.

Le fer s'accumule plus que les autres métaux.

Ainsi l'ordre croissant d'accumulation est le suivant:

- **Pour le Blé dur et le poivron** : Cd < Ni < Pb < Cr < Zn < Fe.
- **Pour le maïs** : Cd < Ni < Pb < Cr < Cu < Zn.

II.2- Les parties aériennes

Les teneurs en métaux lourds dans les parties aériennes sont très variables. Les teneurs en métaux lourds dans les tiges, les feuilles, les grains et les fruits sont très variables au cours du temps. En effet, elles augmentent considérablement de 2006 à 2010.

II.2.1- Les tiges et les feuilles

II.2.1.1- Variation saisonnière de la teneur en métaux du blé dur, du poivron et du maïs dans les tiges et les feuilles

Il y a des différences considérables des teneurs en métaux lourds dans les saisons et entre les organes (tiges, feuilles, grains et fruits (pour le poivron)).

Pour le blé dur, les teneurs en Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Mn et Fe mesurées en hiver dans les tiges sont élevés à celles rencontrées dans les saisons de printemps et d'été, alors que les teneurs en Cd, Fe, Pb, Zn, Mn et Ni collectées dans les feuilles sont plus fortes en été, cependant, les teneurs en Cu et Cr dans les feuilles sont nettement supérieures au printemps, par contre les teneurs en Co dans les feuilles sont plus élevés dans la saison d'hiver.

Par conséquent, les teneurs en Cd, Pb, Zn, Ni, Cr, Mn et Fe retrouvées dans les tiges sont alors nettement supérieures à celles rencontrées dans les feuilles et les grains, alors que les teneurs en Cu et Co sont plus concentrés dans les grains que les tiges et les feuilles.

Pour le poivron et le maïs, les teneurs en Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Mn et Fe sont plus élevées dans les feuilles collectées dans la saison de printemps.

De même que le blé dur, le poivron enregistre dans les tiges et les feuilles des teneurs en Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Mn et Fe plus importantes au printemps. Les teneurs en Cu, Cd, Co, Mn, Fe et Cr les plus élevés sont signalés dans les fruits, cependant le zinc est fortement concentré dans les tiges. Par contre, les teneurs en Ni et Pb sont plus élevés dans les feuilles.

Tout comme le poivron, les teneurs en Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Mn et Fe dans les tiges et les feuilles de maïs se trouvent plus dans la saison de printemps.

On observe que les teneurs en Fe, Pb et Zn sont plus élevées dans les tiges, alors que les teneurs en Ni, Co et Cr se concentrent plus dans les feuilles, en revanche, les teneurs en Cd, Cu et Mn se trouvent plus dans les grains.

II.2.1.2- Variation annuelle de la teneur en métaux du blé dur, du poivron et du maïs dans les tiges et les feuilles.

a- Le Cadmium et le Plomb

Pour le blé dur, les teneurs en Cd et Pb sont 4 à 40 fois plus élevées dans les tiges que dans les feuilles, allant avec un maximum respectivement de $(6,78 \pm 0,64)$ mg/kg et $(37,80 \pm 1,51)$ mg/kg dans les tiges et un extrême de $(1,23 \pm 0,30)$ mg/kg et $(4,82 \pm 0,57)$ mg/kg dans les feuilles. Ainsi les teneurs en Cd et Pb dépassent légèrement le seuil de toxicité des plantes dans les tiges, donc le blé dur accumule uniquement dans les tiges le Cd et le Pb.

Les teneurs en Cd et Pb dans les feuilles sont dans les normes des plantes, à l'exception des teneurs en Pb de l'année 2006 à 2008 où sont légèrement en dessous du seuil normale des plantes.

Par contre pour le poivron, les teneurs en Pb sont 3 à 4 fois plus élevées dans les feuilles que dans les tiges, les teneurs maximaux en Pb dans les feuilles et les tiges sont respectivement de $(78,90 \pm 1,85)$ mg/kg et $(29 \pm 1,50)$ mg/kg, dépassant ainsi le seuil de toxicité des plantes définies dans le tableau 15 dans les feuilles.

Le poivron accumule assez fortement le Pb dans les feuilles. Contrairement au Pb, les teneurs en Cd, sont 2 à 4 supérieurs dans les tiges que les feuilles, atteint un maximum de $(4,66 \pm 0,54)$ mg/kg dans les tiges et $(1,70 \pm 1,17)$ mg/kg dans les feuilles, ces teneurs dépassant largement les normes des plantes dans les tiges et les feuilles. Donc on remarque que le poivron accumule le Cd dans les tiges et les feuilles.

Ce qui concerne le maïs, les teneurs en Cd et en Pb dans les tiges et dans les feuilles ne montrent pas de différence significative, s'échelonnant respectivement avec maximum de $(1,40 \pm 0,14)$ mg/kg et $(13,30 \pm 1,13)$ mg/kg dans les tiges et de $(2,24 \pm 0,30)$ mg/kg et $(12 \pm 0,90)$ mg/kg dans les feuilles, par conséquent, le maïs accumule le Pb dans les feuilles et accumule assez faiblement le Cd dans les feuilles et les tiges.

b- Le Cuivre

Pour le blé dur, les teneurs en Cu sont presque semblables dans les feuilles et dans les tiges, avec des teneurs en printemps et en été dans les feuilles, qui sont légèrement supérieures, atteignant un maximal de $(14,80 \pm 0,96)$ mg/kg dans les tiges et $(17,56 \pm 1,17)$ mg/kg dans les feuilles, ces teneurs sont dans les normes des plantes. Donc le blé dur n'accumule pas de Cu dans les tiges et les feuilles.

Quant au poivron, les teneurs en Cu sont légèrement élevées dans les feuilles que dans les tiges, allant avec un maximum de $(50 \pm 1,60)$ mg/kg pour les feuilles et de $(46,33 \pm 1,56)$ mg/kg pour les tiges, dépassant ainsi le seuil de toxicité des plantes définie dans le tableau 15 dans les feuilles (à l'exception dans la saison d'automne de l'année 2006) et dans les tiges (à l'exception de la saison d'automne dans les années 2006 jusqu'à 2008). Le Cu est légèrement accumulé dans les tiges et les

feuilles. Comme décrit précédemment pour le blé dur et pour le poivron, les teneurs en Cu dans les tiges sont similaires que dans les feuilles du maïs, dépassant légèrement le seuil minimal de toxicité des plantes définie dans le tableau 15 dans la saison de printemps de l'année 2009 et dans toutes les saisons de l'année 2010, allant à un maximum de $(28,20 \pm 1,48)$ mg/kg pour les tiges et de $(28,78 \pm 1,49)$ mg/kg pour les feuilles. A l'exception de l'année 2006, où les teneurs en Cu sont en dessous du seuil de déficience des plantes définie dans le tableau 15.

c- Le Zinc

Les teneurs en Zn sont nettement supérieures dans les tiges que dans les feuilles, particulièrement pour le blé dur, avec 2 à 9 fois dans les tiges que dans les feuilles et pour le poivron, avec 2 à 2,5 fois dans les tiges que dans les feuilles, atteignant un maximum dans les feuilles et les tiges respectivement de $(142,10 \pm 2,38)$ mg/kg et $(421,21 \pm 4,20)$ mg/kg pour le blé dur, allant de $(380,77 \pm 4,18)$ mg/kg et de $(800,31 \pm 5,90)$ mg/kg pour le poivron et de $(242,65 \pm 2,40)$ mg/kg et $(310,55 \pm 4,10)$ mg/kg pour le maïs. Ces teneurs dépassent de loin le seuil de toxicité des plantes définie dans le tableau 15 dans les feuilles.

Par conséquent, le poivron, le maïs et le blé dur accumulent fortement le zinc dans les tiges ensuite dans les feuilles.

d- Le chrome

Les teneurs en Cr sont de 1,3 à 9 fois plus élevées dans les tiges du blé dur que dans les feuilles et de 2 à 6,5 fois plus élevées dans les tiges du poivron que dans les feuilles, atteignant un maximum dans les tiges et les feuilles respectivement de mg/kg $(15,88 \pm 1,15)$ mg/kg et $(7,90 \pm 0,72)$ mg/kg pour le blé dur, de $(26,21 \pm 1,46)$ mg/kg et $(13,88 \pm 0,90)$ mg/kg pour le poivron. Contrairement au blé dur et au poivron, les teneurs en Cr sont légèrement élevés dans les feuilles du maïs que dans les tiges, atteignant un maximum dans les tiges et les feuilles respectivement de $(29,77 \pm 1,50)$ mg/kg et $(29,80 \pm 1,50)$ mg/kg.

Les teneurs en Cr dépassent le seuil de toxicité des plantes définie dans le tableau 15 dans les feuilles et les tiges du maïs, dans les tiges et les feuilles du poivron (excepté dans les feuilles de la saison d'automne de 2006 et 2007) et dans les tiges et les feuilles du blé dur (excepté dans les feuilles des années 2006 -2008).

Ainsi le maïs, accumule bien le chrome dans les tiges et les feuilles, suivi du poivron dans les tiges et les feuilles (excepté dans la saison d'automne de 2006 et 2007), ensuite le blé dur dans les tiges et les feuilles (dans toutes les saisons des années 2009 et 2010).

e- Le nickel

Cependant, les teneurs en Ni sont plus élevées dans les tiges que dans les feuilles du blé dur et sont plus importantes dans les feuilles que dans les tiges du poivron et du maïs.

En ce qui concerne le blé dur, les valeurs maximales en Ni dans les tiges et les feuilles sont respectivement $(19,32 \pm 1,19)\text{mg/kg}$ et $(15,22 \pm 1,15)\text{mg/kg}$.

Quant au poivron, les teneurs maximales des tiges et feuilles sont respectivement de $(22,41 \pm 1,25)\text{mg/kg}$ et de $(28,75 \pm 1,48)\text{mg/kg}$.

Par ailleurs, pour le maïs les teneurs en Ni, atteignant un maximum dans les tiges et les feuilles respectivement de $(3,88 \pm 0,51)\text{mg/kg}$ et de $(10 \pm 0,85)\text{mg/kg}$.

Les teneurs en Ni dépassent le seuil de toxicité des plantes définie dans le tableau 15 dans les feuilles du poivron, ainsi que dans celle du blé dur dans la saison d'été de l'année 2007 et dans toutes les saisons des années 2008 à 2010, dans les tiges du blé dur dans les saisons d'hiver et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010 et dans les tiges du poivron dans les saisons de printemps et d'été des années 2006 à 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010.

Cependant pour le maïs, les teneurs en Ni sont également dans le seuil de déficience définie dans le tableau 15 dans les tiges dans toutes les saisons des années 2006 et 2007, dans les saisons d'automne et d'été de l'année 2008 et dans la saison d'automne de l'année 2009 et dans les feuilles dans les saisons d'automne et d'été de l'année 2006.

Par conséquent, le poivron accumule le Ni dans les feuilles et dans les tiges dans les saisons de printemps et d'été des années 2006 à 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010. On note également pour le blé dur, une accumulation en Ni dans les feuilles dans la saison d'été de l'année 2007 et dans toutes les saisons des années 2008 à 2010 et dans les tiges dans les saisons d'hiver et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010. Par contre le maïs présente des carences en Ni dans les tiges dans toutes les saisons des années 2006 et 2007, dans les saisons d'automne et d'été de l'année 2008 et dans la saison d'automne de l'année 2009 et dans les feuilles dans les saisons d'automne et d'été de l'année 2006.

f- Le cobalt

En revanche, les teneurs en Co dans les tiges et les feuilles sont presque similaires pour le blé dur, le poivron et le maïs, qui varient dans les feuilles et les tiges respectivement avec un maximum de $(4,66 \pm 0,56)\text{mg/kg}$ et $(3,46 \pm 0,50)\text{mg/kg}$ pour le blé dur, de $(1,11 \pm 0,10)\text{mg/kg}$ et $(1,42 \pm 0,14)\text{mg/kg}$ pour le poivron et de $(3,66 \pm 1,51)\text{mg/kg}$ et $(2,85 \pm 0,48)\text{mg/kg}$ pour le maïs.

Les teneurs en Co sont en générale dans les normes pour les trois plantes, á l'exception de l'année 2006, où les teneurs en Co sont nulles dans les saisons de printemps et d'été pour le blé dur et dans les saisons d'automne et d'été pour le poivron et le maïs.

g- Les éléments majeurs

• Le manganèse

Pour le blé dur, les teneurs en Mn sont plus élevées dans les tiges que dans les feuilles. Par contre pour le poivron et le maïs, les teneurs en Mn sont supérieures dans les feuilles que dans les tiges. Les teneurs maximales en Mn dans les tiges et les feuilles sont respectivement $(60,44 \pm 1,70)$ mg/kg et $(30,77 \pm 1,50)$ mg/kg pour le blé dur, $(40,87 \pm 1,54)$ mg/kg et $(152,33 \pm 2,45)$ mg/kg pour le poivron et $(47,90 \pm 1,57)$ mg/kg et $(43,75 \pm 1,54)$ mg/kg pour le maïs.

Cependant les teneurs en Mn, sont dans le seuil de déficience des plantes définie dans le tableau 15 dans les tiges du blé dur dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2006 et dans les feuilles dans les saisons d'hiver et de printemps des années 2006 à 2009 et dans la saison d'hiver de l'année 2010, dans les tiges du poivron dans les saisons d'automne et d'été de l'année 2006 à 2008 et également dans les tiges du maïs dans toutes les saisons des années 2006 à 2008 et dans les feuilles dans toutes les saisons de l'année 2006 et dans les saisons d'automne et d'été de l'année 2007.

Contrairement aux autres métaux lourds, le Mn présente des carences dans les tiges du blé dur dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2006 et dans ces feuilles dans les saisons d'hiver et de printemps des années 2006 à 2009 et dans la saison d'hiver de l'année 2010.

De même que le blé dur, on observe des carences en Mn dans les tiges du maïs dans toutes les saisons des années 2006 à 2008 et dans les feuilles dans toutes les saisons de l'année 2006 et dans les saisons d'automne et été de l'année 2007.

Par contre on remarque pour le poivron des carences en Mn seulement dans les tiges dans les saisons d'automne et d'été de l'année 2006 à 2008.

• Le fer

Pour le blé dur et le poivron, les teneurs en Fe, sont plus élevées dans les feuilles que dans les tiges, par contre dans le maïs, les teneurs en Fe sont plus concentrés dans les tiges que dans les feuilles.

Les teneurs en Fe dans les tiges et les feuilles atteignent un maximum respectivement de $(360,33 \pm 3,85)$ mg/kg et $(264,33 \pm 3,58)$ mg/kg pour le blé dur, de $(115,66 \pm 2,10)$ mg/kg et $(140,55 \pm 2,40)$ mg/kg pour le poivron, de $(271,44 \pm 2,68)$ mg/kg et $(200,33 \pm 3,15)$ mg/kg pour le maïs. Par conséquent, les teneurs en Fe, sont dans les normes des plantes pour le blé dur et le maïs, excepté pour le poivron, où les teneurs en fer sont dans le seuil de déficience des plantes définie

dans le tableau 15 dans la saison d'automne des années 2006 et 2007, On signale ainsi des carences en Fe.

II.2.2- Les grains et les fruits

II.2.2.1- Variation saisonnière de la teneur en métaux lourds dans le blé dur, le poivron et le maïs.

Pour le blé dur, les teneurs en Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Cr, Mn et Fe mesurées dans les grains sont supérieures dans la saison d'été que dans la saison de printemps, à l'exception des teneurs en Co, elles sont plus concentrées dans la saison de printemps que dans la saison d'été.

Contrairement au blé dur, le poivron et le maïs enregistrent respectivement dans les fruits et les grains des teneurs en Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Mn et Fe plus importantes dans la saison de printemps que dans les saisons d'automne et d'été.

II.2.2.2- Variation annuelle de la teneur en métaux dans le Blé dur, le poivron et le maïs dans les grains et les fruits.

a- Le cadmium

Pour le blé dur, les teneurs en Cd dans les grains sont inférieures que celle trouvés dans les tiges. Alors que pour le maïs, les teneurs en Cd sont plus élevées dans les grains que dans les tiges et sont plus inférieures à celles rencontrées dans les feuilles. Cependant pour le poivron, les teneurs en Cd sont fortement concentrées dans les fruits.

Les teneurs en Cd, atteignant un maximum, de valeurs de $(3,87 \pm 0,51)$ mg/kg, de $(2,11 \pm 0,21)$ mg/kg et de $(6,50 \pm 0,63)$ mg/kg respectivement dans les grains du blé dur, dans les grains du maïs et dans les fruits du poivron.

Les teneurs en Cd, dépassent légèrement le seuil de toxicité des plantes définie dans le tableau 15 dans les fruits du poivron dans la saison du printemps des années 2006 à 2010, dépassent largement les normes des plantes dans les grains du blé dur dans toutes les saisons des années 2006 à 2010 et dépassent légèrement les normes des plantes dans les grains du maïs dans toutes les saisons des années 2006 à 2010.

D'après, les résultats obtenus, on observe une accumulation importante de Cd dans les fruits du poivron, suivi dans les grains du blé dur, ensuite dans les grains du maïs.

b- Le cuivre

Pour le blé dur, les teneurs en Cu, sont plus de 5 fois plus élevées dans les grains que dans les tiges et les feuilles.

De même que pour le blé dur, les teneurs en Cu dans les fruits du poivron, sont plus de deux fois supérieures dans les fruits que dans les tiges et les feuilles.

Cependant pour le maïs, les teneurs en Cu sont légèrement plus élevées dans les grains que dans les tiges et les feuilles.

Les valeurs maximales en Cu, allant de $(79,69 \pm 0,85)$ mg/kg dans les grains du blé dur, de $(98,66 \pm 1,98)$ mg/kg dans les fruits du poivron et de $(32,11 \pm 1,50)$ mg/kg dans les grains du maïs.

Les teneurs en Cu, dans les grains du blé dur et dans les fruits du poivron dépassent le seuil minimal de toxicité des plantes.

Alors que pour le maïs, les teneurs en Cu, dépassent légèrement le seuil minimal de toxicité des plantes définie dans le tableau 15 dans toutes les saisons des années 2009 et 2010.

Par conséquent, le Cu est assez fortement accumulé dans les fruits du poivron et dans les grains du blé dur.

On remarque plus de carences que de toxicité dans les grains du maïs dans toutes les saisons de l'année 2006, où les teneurs en Cu sont dans le seuil de déficiences des plantes définie dans le tableau 15, excepté dans toutes les saisons des années 2009 et 2010, où le Cu est faiblement accumulé dans les grains.

c- Le Plomb

Pour le blé dur, les teneurs en Pb sont plus élevés dans les grains que dans les feuilles, cependant pour le poivron, les teneurs en Pb sont plus supérieures dans les fruits que dans les tiges. Contrairement au blé dur et au poivron, pour le maïs, les teneurs en Pb sont nettement inférieures dans les grains que dans les tiges et dans les feuilles.

Ainsi atteignant des maximaux de $(28,90 \pm 1,48)$ mg/kg, de $(44,88 \pm 1,55)$ mg/kg et de $(12,33 \pm 0,90)$ mg/kg respectivement dans les grains du blé dur, dans les fruits du poivron et dans les grains du maïs.

Les teneurs en Pb, sont plus élevées que le seuil minimal de toxicité des plantes définie dans le tableau 15 dans les grains du blé dur et dans les fruits du poivron, à excepté dans la saison d'automne de l'année 2006, où la teneur en Pb est dans les normes.

Par ailleurs, pour le maïs, les teneurs en Pb sont dans les normes dans les grains du poivron, à l'exception dans la saison de printemps de l'année 2010 où la teneur en Pb, dépasse le seuil minimale de toxicité des plantes définie dans le tableau 15.

Nous observons une importante accumulation en Pb dans les fruits du poivron et dans les grains du blé dur excepté dans la saison d'automne de l'année 2006 et une accumulation dans les grains du maïs dans la saison de printemps de l'année 2010.

Cette accumulation est plus importante dans les fruits du poivron et dans les grains du blé dur que celle trouvé dans les grains du maïs.

d- Le zinc

Pour le blé dur, les teneurs en Zn sont supérieures dans les grains que dans les feuilles, par ailleurs pour le poivron, les teneurs en Zn, sont dans les fruits moins importantes que dans les tiges et dans les feuilles.

Quand au poivron, les teneurs en Zn sont dans les grains nettement inférieurs à celles trouvées dans les tiges et dans les feuilles.

Les valeurs en Zn extrêmes, sont de $(193,89 \pm 3,25)$ mg/kg dans les grains du blé dur, de $(340,77 \pm 3,82)$ mg/kg dans les fruits du poivron et de $(44,65 \pm 1,55)$ mg/kg dans les grains du maïs.

Les teneurs en Zn, dépassent de loin le seuil minimal de toxicité des plantes définie dans le tableau 15, dans les grains du blé dur et dans les fruits du poivron.

Le blé dur et plus particulièrement le poivron accumulent assez fortement le Zn. Contrairement au blé dur et au poivron, nous avons relevé des carences en Zn dans les grains du maïs, dans toutes les saisons des années 2006 et 2007, où les teneurs en Zn sont dans le seuil de déficiences des plantes définie dans le tableau 15.

e- Le Nickel

Pour le blé dur, les teneurs en Ni dans les grains sont beaucoup moins importants que celles rencontrées dans les tiges.

De même que pour le blé dur, les teneurs en Ni dans les fruits du poivron sont bien plus faibles que celles trouvées dans les tiges et les feuilles.

Les teneurs limites en Ni, varient de $(12,38 \pm 0,90)$ mg/kg dans les grains du blé dur, de $(6,80 \pm 0,64)$ mg/kg dans les fruits du poivron et de $(7,20 \pm 0,73)$ mg/kg dans les grains du maïs.

Les teneurs en Ni, sont dans les normes dans les fruits du poivron, dans les grains du blé dur et du maïs.

Durant l'année 2010 dans la saison d'été, il y a une légère accumulation en Ni dans les grains du blé dur d'une part où les teneurs en Ni sont légèrement au-dessus du seuil minimale de toxicité des plantes définie dans le tableau 15 et d'autre part il y a une carence en Ni dans les grains du maïs dans les saisons d'automne et d'été des années 2006 et 2007, où les teneurs en Ni sont dans le seuil de déficience des plantes définie dans le tableau 15.

f- Le chrome

Les teneurs en Cr dans les grains du blé dur sont bien plus faibles que celles rencontrées dans les tiges, de même que le blé dur, les teneurs en Cr dans les grains du maïs sont nettement moins importantes que dans les tiges et les feuilles, alors que pour le poivron, les teneurs en Cr sont plus concentrées dans les fruits.

Les valeurs maximales en Cr sont de $(6 \pm 0,63)\text{mg/kg}$ dans les grains du blé dur, de $(43,88 \pm 1,54)\text{mg/kg}$ dans les fruits du maïs et de $(20,75 \pm 1,20)\text{mg/kg}$ dans les grains du maïs.

On remarque que le Cr est bien accumulé et que ainsi les valeurs trouvées dépassent de loin le seuil de toxicité des plantes définie dans le tableau 15 dans les fruits du poivron, légèrement dans les grains du maïs dans la saison de printemps de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010 et dans les grains du blé dur dans la saison d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010. Par contre, ces résultats montrent des carences en Cr dans les grains du blé dur dans toutes les saisons des années 2006 et 2007 et dans la saison de printemps de l'année 2008 et dans les grains du maïs dans toutes les saisons de l'année 2006 et dans les saisons d'automne et d'été de l'année 2007.

g- Le cobalt

Les teneurs en Co sont semblables dans les grains, les tiges et les feuilles du blé dur et du maïs. Par ailleurs, pour le poivron, les teneurs en Co sont similaires dans les fruits, les tiges et les feuilles.

Les teneurs en Co, maximales sont de $(5,28 \pm 0,59)\text{mg/kg}$ dans les grains du blé dur, de $(1,66 \pm 1,16)\text{mg/kg}$ dans les fruits du poivron et de $(3,56 \pm 0,50)\text{mg/kg}$ dans les grains du maïs. Par conséquent, ces teneurs en Co sont dans les normes dans les fruits du poivron, dans les grains du blé dur et du maïs.

En revanche, le Co est en carence durant l'année 2006 dans les grains du blé dur pendant la saison d'été, ainsi que dans les grains du maïs et les fruits du poivron aux cours des saisons d'automne et d'été de l'année 2006.

h- Les éléments majeurs

• Le fer

Les teneurs en Fe, sont beaucoup moins importantes dans les grains du blé dur et du maïs que dans les tiges et les feuilles du blé dur et du maïs.

Contrairement au blé dur et au maïs, les teneurs en Fe sont plus de 20 fois plus élevées dans les fruits que dans les tiges et les feuilles du poivron.

Cependant, les teneurs extrêmes en Fe varient de $(93,55 \pm 1,95)\text{mg/kg}$ dans les grains du blé dur, de $(1950,33 \pm 6,78)\text{mg/kg}$ dans les fruits du poivron et de $(88,50 \pm 1,88)\text{mg/kg}$ dans les grains du maïs. Par ailleurs, les teneurs en Fe sont largement plus élevées que le seuil de toxicité des plantes définie dans le tableau 15 dans les fruits du poivron, il y a donc une forte accumulation en Fe. En outre les teneurs en Fe, sont dans les normes dans les grains du blé dur dans toutes les saisons des années 2006 à 2010 et dans les grains du maïs dans la saison de printemps de l'année 2007, dans les saisons de printemps et d'été de l'année 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010.

De plus le fer présente des carences particulièrement dans les grains du maïs dans toutes les saisons de l'année 2006, dans les saisons d'automne et d'été de l'année 2007 et dans la saison d'automne de l'année 2008.

• Le manganèse

Les teneurs en Mn dans les grains du blé dur sont moins importantes que celle retrouvées dans les tiges et les feuilles, par contre les teneurs en Mn dans les fruits du poivron sont plus élevées que dans les tiges et les feuilles, cependant les teneurs en Mn dans les grains du maïs sont similaires que dans les feuilles.

Atteignant, ainsi des valeurs maximales de $(40,33 \pm 1,53)$ mg/kg dans les grains du blé dur, de $(182,33 \pm 2,76)$ mg/kg dans les fruits du poivron et de $(50,80 \pm 1,60)$ mg/kg dans les grains du maïs. Les teneurs en Mn sont dans les normes dans les fruits du poivron dans toutes les saisons des années 2006 à 2010, ainsi que dans les grains du blé dur dans les saisons d'hiver et d'été des années 2006 à 2008 et dans toutes les saisons des années 2009 et 2010 et également dans les grains du maïs dans toutes les saisons des années 2008 à 2010.

Le manganèse présente des carences dans les grains du maïs durant toutes les saisons des années 2006 et 2007 et dans les grains du blé dur dans la saison de printemps des années 2006 à 2008.

Conclusion

De même que les racines, il existe un effet saisonnier sur les teneurs en Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Mn et Fe dans les parties aériennes de nos plantes alimentaires. Selon les teneurs, on peut classer les métaux dans l'ordre décroissant d'absorption:

Les Tiges :

- **Le blé dur:** Zn > Fe > Mn > Pb > Ni > Cu \geq Cr > Cd > Co.
- **Le poivron:** Zn > Fe > Cu > Mn > Cr > Pb > Ni > Cd > Co.
- **Le maïs:** Zn > Fe > Mn > Cr > Cu > Pb > Ni > Co > Cd.

Les feuilles:

- **Le blé dur:** Fe > Zn > Mn > Cu > Ni > Cr > Pb > Co > Cd.
- **Le poivron:** Zn > Fe > Mn > Pb > Cu > Ni > Cr > Cd > Co.
- **Le maïs:** Zn > Fe > Mn > Cr > Cu > Pb > Ni > Co > Cd.

Les grains:

- **Le blé dur:** Zn > Fe > Cu > Mn > Pb > Ni > Cr > Co > Cd.
- **Le poivron:** Fe >> Zn > Mn > Cu > Cr > Pb > Ni > Cd > Co.
- **Le maïs:** Fe > Mn > Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > Co > Cd.

Par ailleurs, nos résultats ont montré que les trois plantes sont extrêmement tolérantes en Zn, en Cr et en Cu et particulièrement dans les grains du blé dur et dans les fruits du poivron et dans une moindre mesure, ainsi ces plantes présentent également une tolérance en Ni.

On peut classer l'ordre d'accumulation des différents métaux lourds dans les différents organes comme suit est le suit:

Les tiges:

- **Le blé dur :** Cd < Ni < Pb < Cr < Zn.
- **Le poivron :** Cd < Ni < Cu < Cr < Zn.
- **Le maïs :** Cd < Cu < Cr < Zn

Les feuilles:

- **Le blé dur:** Ni < Cr < Zn.
- **Le poivron:** Cd < Ni < Cr < Cu < Pb < Zn.
- **Le maïs:** Cd < Pb < Cu < Cr < Zn.

Les grains:

- **Le blé dur :** Cr < Ni < Cd < Pb < Cu < Zn.
- **Le maïs :** Pb < Cu < Cd < Cr.

Les fruits :

- **Le poivron:** Cd < Pb < Cr < Cu < Zn < Fe

Donc, on peut déduire le classement de tolérance suivant :

- **Les tiges:** Blé dur > Poivron > Maïs,
- **Les feuilles:** Poivron > Maïs > Blé dur,
- **Les grains et les fruits:** Poivron > Blé dur > Maïs.

En comparant les résultats obtenus entre les racines et les parties aériennes de nos plantes, on peut remarquer que pour le blé dur le Zn, Cr et Ni sont bien transférés dans les racines, continuent à migrer vers les parties aériennes et se trouvent par conséquent enrichis dans les parties aériennes.

Par contre le Fe est tout d'abord bien absorbés dans les racines du blé dur et du poivron, il reste bloquer dans les racines et il est peu transféré dans les tiges et les feuilles, bien transféré dans les fruits, alors que pour le maïs, le Fe ne montrent ni blocage ni enrichissement (pratiquement les même teneurs trouvés dans les tiges, les feuilles et les racines).

Par ailleurs, pour le poivron et le maïs, le Zn, le Cr, le Cu et le Cd sont bien absorbés dans les racines puis bien transférés vers les parties aériennes.

De même que pour le Zn, Cr et Cu, le Ni sont bien transférés dans les racines et les tiges et les feuilles pour le poivron, cependant pour le maïs, la translocation du Ni vers les parties aériennes est très faible.

En outre, le Cd qui peu transféré dans les racines, est bien accumulé dans les tiges spécialement dans la saison d'hiver et dans les grains du blé dur.

Ainsi que pour le Cd, le Pb est bien transféré dans les tiges et les grains du blé dur, dans les feuilles et les fruits du poivron et dans les feuilles et les grains du maïs.

Par contre, le Cu qui est peu absorbé dans les racines, est bien accumulé dans les grains du blé dur.

Il existe ainsi un effet "organe " très marqué.

Toutefois, certains éléments chimiques montrent une similarité de comportement que ce soit au niveau de la diffusion dans les plantes ou de leur migration dans les tissus. Cette similarité est qualifiée de relations de synergisme ou d'antagonisme. Dans notre cas, cette similarité de comportement a été constatée pour le Zn et le Cr (sont transloqués dans les différents organes des plantes), cette relation est significative pour les trois plantes, dans une moindre mesure le Cr.

De plus le Zn est un élément essentiel pour certaines activités.

En effet plusieurs études ont montrés une accumulation similaire de Zn dans les racines pour différentes espèces étudiées telles que le trèfle, le ray-grass, le blé et le pois^[97,98].

D'autre part, on a constaté que les quantités de métaux accumulées dans les racines et les parties aériennes du poivron sont plus importantes que celles accumulées dans le blé dur et le maïs. Ce résultat confirme que le type de plante est un facteur déterminant du transfert et de l'accumulation des métaux lourds et dépend de l'âge de la plante et du temps d'exposition aux eaux usés.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de recherche a permis d'accéder à des connaissances fines sur le devenir des polluants métalliques (Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Mn et Fe) dans les sols.

Dans un premier temps nous avons étudié les caractéristiques physico-chimiques des sols S1, S2 et S3 qui ont révélé des caractères communs à savoir une texture majoritairement sablo-limoneuse, un pH basique, un taux élevé de calcaire totale et une CEC faible dans toutes les saisons des années 2006 à 2010. Ainsi, la mobilité et la biodisponibilité des métaux dans les sols S1, S2 et S3 se trouvent limitée à un tel pH, ce qui minimise, probablement le risque de contamination des plantes par les formes phytoassimilables des éléments métalliques.

Dans un deuxième temps, nous avons effectué une analyse basée sur l'extraction chimique des métaux lourds par l'eau régale. Cette extraction a permis de mettre en évidence une forte pollution de Zn et de Cd dans les trois sols, suivi dans une moindre mesure d'une pollution de Pb et du Ni dans les sols S2 et S3 et celle du Co uniquement dans le sol S3.

Si les teneurs totales en métaux lourds par l'eau régale permettent un premier état des lieux, ce sont davantage la spéciation suivant la méthode de Tessier qui a permis une estimation du devenir des polluants et une approche du risque. L'extraction séquentielle pratiquée sur les sols S1, S2 et S3 a montré une source de pollution importante par le Zn, beaucoup moins par le Co, le Ni, le Cd, le Pb et enfin par le Cu des trois sols. Le Ni, le Co et le Cu ne constituent pas de menace potentielle pour l'environnement malgré des teneurs élevées car ils sont peu mobiles.

Ce type d'extraction nous a informé que le Cd est principalement lié aux carbonates, alors que le Cu est localisé essentiellement dans les matières organiques et que le Pb, le Zn, le Ni, le Co, le Cr, le Mn et le Fe sont plus concentrés dans les oxydes de fer et de manganèse. Une étude sur la répartition des métaux lourds au sein des deux autres fractions granulométriques (le fond < 0,02mm, 2mm) des trois sols nous a permis de compléter les résultats précédents. En effet, ces analyses effectuées confirment les résultats obtenus jusqu'à présent dans la littérature et selon lesquels la pollution est essentiellement concentrée dans les fractions les plus fines.

La phytodisponibilité des métaux lourds dans les sols S1, S2 et S3 a été également évaluée par plusieurs extractants tels que les solutions salines (NH_4OAC , NaNO_3 , CaCl_2 et NH_4NO_3), l'acide HCl et l'agent complexant EDTA. Il s'est avéré que la partie extraite est peu représentative de la fraction réellement biodisponible dans le sol.

Ainsi, l'échelle de classement du meilleur extractant par ordre décroissant est comme suit:

$\text{EDTA} > \text{CaCl}_2 > \text{NaNO}_3 > \text{NH}_4\text{OAC} > \text{NH}_4\text{NO}_3 > \text{HCl}$.

Ainsi l'EDTA est l'extractant qui extrait le mieux les métaux lourds. En générale c'est un agent chélatant ayant une capacité d'extraction maximale des métaux présents dans les phases non liées à la silice, y compris les métaux complexés à des ligands organiques, mais il ne permet pas d'estimer la phytodisponibilité.

L'étude du transfert et de l'accumulation des métaux lourds dans les plantes cultivées (le blé dur, le poivron et le maïs) a montré que la phytoassimilation des métaux lourds est essentiellement gouvernée par le type de la plante. Ainsi, le poivron accumule des quantités de métaux lourds dans les racines et les parties aériennes plus que le blé dur et le maïs. Par ailleurs, le Zn et le Cr s'accumulent assez fortement dans les parties aériennes et les racines du blé dur, du poivron et du maïs. Cependant, le Cu et le Cd s'accumulent dans les parties aériennes et les racines du poivron et du maïs, contrairement pour le blé dur, ces deux métaux sont peu absorbés par les racines, et dans la partie aérienne nous avons trouvé que le Cd est bien accumulé dans les tiges particulièrement dans la saison d'hiver et dans les grains et que le Cu s'accumule seulement dans les grains. En outre, le Ni s'accumule dans les racines du blé dur et du poivron et également dans les parties aériennes du blé dur, et seulement dans les feuilles et les tiges du poivron. Alors que le Fe s'accumule dans les racines du blé dur et du poivron et seulement dans les fruits du poivron. Enfin le Pb est bien accumulé dans les tiges et les grains du blé dur, dans les feuilles et les fruits du poivron et dans les feuilles et les grains du maïs.

De point de vue éco toxicologique, le transfert des métaux vers les parties aériennes est une propriété non désirable puisque les métaux lourds qui s'accumulent peuvent passer dans la chaîne alimentaire par le biais des herbivores. Ainsi chez le blé dur, le poivron et le maïs, la translocation des métaux lourds vers les parties aériennes apparaît être limitée, mais les trois plantes risquent donc de contaminer les animaux qui la consomment et ceci particulièrement par le Zn et le Cr dans le blé dur, le poivron et le maïs et par le Fe uniquement dans le poivron, dans une moins mesure par le Cd, le Pb et Cu dans les trois plantes et par le Ni dans le blé dur et le poivron. Contrairement aux autres métaux le Mn présente des carences dans les sols S1, S2 et S3 et dans les parties aériennes spécialement du blé dur, du maïs et beaucoup moins du poivron.

L'ensemble des résultats obtenus constitue une première étape vers la compréhension des effets affectant les sols irrigués par les eaux usées, les eaux d'oued Tafna et du barrage de Hammam Boughrara. Au cours de ce travail, nous avons étudié un cas réel du devenir des métaux lourds dans des sols agricoles et dans les plantes alimentaires (le blé dur, le poivron et le maïs).

Le premier intérêt d'une telle démarche est qu'elle fournit un état présent des trois sols étudiés dans le périmètre de Hammam Boughrara qui peut ensuite être utile à un contrôle de la situation sur le long terme.

PERSPECTIVE

Cette étude répond en partie aux objectifs fixés mais soulève également plusieurs points qu'il serait nécessaire de quantifier afin d'ajuster au mieux les différents modèles prédictifs de la mobilité des ETM. On pourrait ainsi définir quatre axes à approfondir compte tenu des localisations des ETM dans les microstructures spécifiques à un type d'usage des sols:

- Etudier d'autres sites avec des frondeurs des sols différents, d'autres fractions granulométriques et de tester une démarche statistique.
- Des études des compartiments biologiques et microbiologiques permettraient de définir au mieux leur influence quant à la mobilité des ETM raisonnée en termes de localisation.
- Enfin une étude et une modélisation des flux sur les plantes et les sols permettrait de quantifier et de qualifier les entrées et sorties d'ETM des systèmes ainsi que ceux transportés dans la solution des sols. Ces données s'avèrent essentielles lors de la modélisation de la mobilité et transferts des ETM dans les sols et in fine aboutir à la prévision des risques environnementaux et sanitaires.
- Faire une enquête épidémiologie depuis le début de notre travail (2006) jusqu'à maintenant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1-** T. Sterckeman, F. Douay, N. Proix & H. Fourrier. Contamination des sols vers la profondeur à Noyelles-Godault et Aubry. In: Un point sur....les éléments traces métalliques dans les sols approches fonctionnelles et spatiales. INRA. Editions (2008). Paris. p565.
- 2-** K. W. T. Goulding & L. Blake. Land use, liming and the mobilization of potentially toxic metals, *J. Agri. Ecos. Environ.* 67 (1998) 135-144.
- 3-** P. Droogers & J. Bouma. Soil survey input in exploratory modelling of sustainable soil management practices, *J. Am. Soil Sci. Soc.* 61 (1997) 1704-1710.
- 4-** F. Van Oort, J. P. Gaultier, R. Hardy & H. Bourennane. Distributions spatiales de métaux et stratégies d'échantillonnage dans les sols du périmètre agricole d'une friche industrielle. In : Les Eléments métalliques dans les sols-Approches fonctionnelles et spatiales. INRA-Editions, (2002) p281-297.
- 5-** W. Blum, A. Brandstetter & W. W. Wenzel. Trace element distribution in soils as affected by land use. In *Biogeochemistry of Trace Metals, Science reviews.* (1997) p432.
- 6-** S. Cornu & B. L. Clozel. Extractions séquentielles et spéciation des éléments trace métalliques dans les sols naturels. *Analyse critique. Étude et gestion des sols.* 7 (2000) p179-189.
- 7-** P. Duchaufour. *Abrégé de pédologie: Sol, Végétation, Environnement.* 5^{ème} Edition. Paris, France : Masson, SA, (1997) p291.
- 8-** B. J. Alloway. Soil processes and the behaviour of heavy metals. In Alloway, B. J. (Ed.). *Heavy metals in soils.* Chapman & London, (1995) p11-35.
- 9-** G. Sposito. *The chemistry of soils.* Edition Oxford University Press, (1989) p 277.
- 10-** C. Blanchard. Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués. Thèse Chimie, spécialité Sciences et Techniques du Déchet. L .France : INSA de Lyon, (2000) p301.
- 11-** A. Kabata-Pendias. *Trace Elements in Soils and Plants, Third Edition* (2001). CRC Press, Boca Raton, USA.
- 12-** D. Hillel. *L'eau et le sol, principes et processus physiques.* Edition Academia, (1988) p294.
- 13-** D. Baize. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France).* Edition INRA, (1997) p408.
- 14-** F. Ramade. *Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'environnement.* Paris, France: Edition Science, (1993) p822.
- 15-** R. G Pearson, .1963. Physical and inorganic chemistry: hard and soft acids and bases, *J. Am. Chem.Soc.* 85 (1963) 3533-3539.

- 16-** E. Nieboer, D. RICHARDSON. The replacement of the descript term "Heavy Metals" with biologically and chemically significant classification of metal ions, *J. Environ Pollution*. 1 (1980) 3-26.
- 17-** P. H. Bourrelier, J. BERTHELIN. Contamination des sols par les éléments en traces: les risques et leur gestion. Rapport n°42 à l'Académie des Sciences. Paris, France: Lavoisier Tec & Doc, (2008) p440.
- 18-** J. L. Envans , 1989. Chemistry of metal retention by soil, *J. Environ Sci Technol*. 23 (1989) 1046-1056.
- 19-** D. Baize et T. Sterckeman. Importance de la détermination du fond pédogéochimique pour évaluer la pollution des sols par des métaux. L'exemple du site de Dornach. Rencontre nationale de la recherche sur les sites et sols pollués. Paris. ADEME, (décembre 2002) p6.
- 20-** E. Smith, R. NAIDU, A. M. ALSTON. Arsenic in the soil environment, a review, *Adv Agron*. 64 (1998) 149-195.
- 21-** Directive 86/278/CEE. relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture (12 juin 1986) .
- 22-** NK. Fageria, VC. Baligar, RB. Clark. Micronutrient cultures, *Fageria production adv. Agron. New York*. 77 (2002) 189-272.
- 23-** U. S. Geological Survey Professional Paper 1270. With permission. Represents analyses from soils and other surficial materials from throughout the continental United States (regoliths including desert sands, sand dunes, loess deposits, and beach and alluvial deposits containing little or no organic matter) (1984).
- 24-** H. J. M. Bowen. "Environmental Chemistry of the Elements." Academic Press, London.) and references therein, with permission. Represents soil analyses from throughout the world (1979).
- 25-** A. M. Bernard. Effects of heavy metals in the environment on human health. In *Contaminated soils- 3rd International Conference on the biochemistry of trace elements*. Paris, France : INRA. (1997) p21-34.
- 26-** E. Baath. Measurement of heavy metal tolerance of soil bacteria using thymidine incorporation into bacteria extracted after homogenization-centrifugation, *J. Soil Biology and Biochemistry*. 24 (1992) 1167-1172.
- 27-** T. J. Logan, S. J. Traina. Trace metals in agricultural soils. In *Metals in groundwater*, Edition Lewis Publishers; (1993) p309-347.
- 28-** D. C. Adriano. Trace elements in the terrestrial environment. *Biogeochemistry*,

Bioavailability, and Risks of Metals, 2nd Edition (2001), New York: Springer-Verlag.

29- G. Pédro and A-B. Delmas. Les principes géochimiques de la distribution des éléments traces dans les sols, *J. Ann. Agron.* 21(5) (1970) 483-518.

30- T. M. Florence and G. E. Batley. Chemical speciation in natural waters, A review. *Critical Reviews. Analy. Chem.* 9(3) (1980) 219-296.

31- M. Bernhard, F. E. Brinckman and K. J. Irgolic. Why "speciation". In M. Bernhard, , F. E. Brinckman and P.J. Sadler (Eds.) *The importance of chemical speciation in environmental process*, Springer-Verlag (1986) p7-14.

32- T. M. Florence. Speciation of trace elements in waters, *Talanta* 29 (1982) 345-364.

33- H. E. Allen and D. J. Hansen. The importance of trace metal speciation to water quality criteria, *J. Water. Environ. Res.* 68(1) (1996) 42-54.

34- E. Tipping, S. Lofts and A. J. Lawlor. Modelling the chemical speciation of trace metals in the surface waters of the Humber system, *J. Sci. the Total Environ. Res.* 68(1) (1998) 42-54.

35- W. Stumm and J. J. Morgan. *Aquatic chemistry, an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters.* John Wiley, London. (1970) p583.

36- W. Stumm and J. J. Morgan. *Aquatic chemistry-Chemical equilibria and rates in natural waters.* John Wiley and Sons, New York. (1996) p1022.

37- G. W. Brümmer, J. GERTH, U. HERMS. Heavy metal species, mobility and availability in soils, *J. Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde.* 149 (1986) 382-398.

38- B. T. Hart. Trace metal complexing capacity of natural waters a review, *J. Environ. Technol. Letters.* 2 (1981) 95-110.

39- T. M. Florence and G. E. Batley. Determination of the chemical forms of trace metals in natural waters, with special reference to copper, lead, cadmium and zinc, *Talanta.* 24 (1977) 151-158.

40- G. K. Pagenkopf, R. C. Russo and R. V. Thurston. Effect of complexation on toxicity of copper to fishes, *J. Fish. Res. Board Can.* 31 (1974) 462-465.

41- V. M. Brown, T. L. Shaw and D. G. Shurben. Aspects of water quality and the toxicity of copper to rainbow trout, *J. Water. Res.* 8 (1974) 797-803.

42- P. Espiau. Le complexe absorbant. In M Bonneau and B. Souchier (Edition), *Pédologie*, tome II, *Constituants et Propriétés du Sol.* Paris, France: Masson. (1994) p489-510.

43- MJ. McLaughlin, B.A. Zarcinas, D.P. Stevens, N. Cook. Soil testing for heavy metals *Communication in Soil Sciences and Plant Analysis.* (2000) 1661-1700.

- 44-** S. Deneux-Mustin, S. Roussel-Debet, C. Mustin, P. Henner, C. Munoer-Lamy, C. Colle, J. Berthelin, J. Garnier-Lapalace, C. Leyval. Mobilité et transfert racinaires des éléments en traces : influence des micro-organismes du sol. TEC & DOC (2003) , Paris.
- 45-** V. Chaignon. Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées. Cas des sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse: Ecole doctorale, Sciences de l'Environnement: Système Terre (2001), Université d'Aix-Marseille.
- 46-** C. D. Foy, R L. Chaney, M. C. White. The Physiology of metal toxicity in plants, J. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. 29 (1978) 511-566.
- 47-** A. J. M. Baker, P. L. Walker. Ecophysiology of metal up take by tolerant plants. In J. Shaw (Ed). Heavy Metal Tolerance in plants: Evolutionary aspects. CRC Press, Boca Raton, Florida, (1990) p155-178.
- 48-** P.H.T. Beckett. The use of extractants in studies on trace metals in soils, seawaye, and sludge-treated soils. In B.A. Stewart (Ed), J. Adv. Soil. sci. Springer-Verlag, New York. 9 (1989) 143-176.
- 49-** A. M. Ure. Single extraction shemes for soil analysis and related applications, J. Sci. Total Environ. 178 (1996) 3-10.
- 50-** Afnor. Qualité des sols-Sols, sédiments-Mise en solution totale par attaque. NFX31-147. Paris, France: (1996b) p19.
- 51-** Afnor. Qualité des sols-Sols-Détermination du cuivre,du manganèse,du zinc et du fer-Extraction en présence de DTPA. NFX31-121. Paris, France: Afnor. (1993) p109.
- 52-** G. Rauret, J-F. López-Sanchez, A. Sahuquillo, E. Barahona, M. Lachica, AM. Ure and al. Application of a modified BCR sequential extraction (three-step) procedure for the determination of extractable trace metal contents in a sewage sludge amended soil reference material (CRM 483), complemented by a three-year study of acetic acid and EDTA extractable metal content, J. Environ Monit. 2 (2000) 228–33.
- 53-** R. E. Jervis, S.S Krishnan, M. M. Ko, L. D. Vela, T. Glenn Pringle, A. C. Chan and L. Xing,. Biological incinerator emissions of toxic inorganics, their residues and their availability, J. Analyst. 120 (1995) 651-657.
- 54-** M. N. V. Prasad. Heavy metal stress in plants from biomolecules to ecosystems (2ème édition) (2004). Springer.
- 55-** Q. T. Wu. Biodisponibilité du cadmium dans les systèmes sol-plante. Thèse de doctorat (1989), INPL., Nancy.

- 56-** R. Bargagli. Trace elements in terrestrial plants. An ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. Springer. (1998) p324.
- 57-** J. L. Morel. Bioavailability of Trace Elements to Terrestrial Plants. Tarradellas J Bitton D. (Eds), J. Soil ecotoxicology. CRC. Lewis Publishers, Boca Raton. 6 (1997) 141-175.
- 58-** A. Tremel-Schaub, I. Feix. Contamination des sols. Transfert des sols vers les plantes, ADEME et EDP Sciences (Editions) (2010).
- 59-** S. Clemens. A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation, J. Trends. Plant. Sci. 7 (2002) 309-315.
- 60-** M. N. V. Prasad, H. M. De Oliveira Freitas. Metal hyperaccumulation in plants- Biodiversity prospecting for phytoremediation technology, J. Electronic. Biotechnol. 6 (2003) 110-146.
- 61-** J. L. Hall, L. E. Williams. Transition metal transporters in plants, J. Experimental Botany. 54 (2003) 2601-2613.
- 62-** H. Frérot, C. Lefèbvre, W. Gruber, C. Collin, A.D. Santos, J. Escarre. Specific interactions between local metal-tolerant plants improve the phytostabilization of mine soils, J. Plant. Soil. 282 (2006) 53-65.
- 63-** M. A. Olivier. Soil and human health: a review, J. European. Soil. Sci. 48 (1997) 573-592.
- 64-** M. E. Farago. Plants and the chemical elements, biochemistry, uptake and toxicity. VCH (1994), Weinheim, Allemagne.
- 65-** L. Sanità di Toppi, R. Gabbriellini. Response to cadmium in higher plants, J. Environ and Experimental Botany. 41 (1999) 105-130.
- 66-** R. E. Pugh, D. G. Dick, A. L. Fredeen, 2002. Heavy metal (Pb, Zn, Cd, Fe and Cu) contents of plant foliage near the Anvil Range lead/zinc mine, Faro, Yukon Territory, J. Ecotoxi. Environ. Safety 52 (2002) 273-279.
- 67-** A.N.R.H, Données hydrologiques du bassin versant du barrage Hammam Bouhrara Réalisé par l'agence national des ressources Hydrauliques, direction (A.N.R.H).
- 68-** I.E.T. Pollution des eaux du barrage Hammam Bouhrara. Réalisé par l'inspection de l'environnement. Tlemcen, Algérie (Septembre 2003).
- 69-** L. Benadda, S.M. Sidhoum et M. Benadda. Protection du barrage de Hammam bouhrara contre la pollution, Séminaire National sur l'eau, UAB. Tlemcen, Algérie (Juin 2001).
- 70-** Afnor. NF X31-100. Qualité des sols-Echantillonnage-Méthode de prélèvement d'échantillons de sol. Paris, France (1996).
- 71-** J. Lozet et C. Mathieu. Dictionnaire de Science du sol, Tec et Doc, Lavoisier. Paris, France (2002).

- 72-** J. M. Pauwels, E. Van Ranst, M. Verloo et A. Mvondoze. Manuel de laboratoire de pédologie, Publi. Agricoles 28 (1992), AGCD, Bruxelles.
- 73-** M. Pansu, J. Gautheyrou et J. Loyer. L'analyse du sol, échantillonnage, instrumentation et contrôle, Masson. France. (1998) p19.
- 74-** Afnor. NF X31-100. Qualité des sols. Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol-Méthode à la pipette.Paris, France. (2003)20p.
- 75-** Afnor. NF ISO 10390-Indice de classement: X31-117. Qualité du sol. Détermination du pH. Paris, France. (1994b) p12.
- 76-** Y. Amiet, J. Boutruche et L. Julien. Pour aborder la notion de la capacité cationique, La capacité d'échange cationique et la fertilisation des sols agricoles, Colloque national, AFES et C.A. de Basse-Normandie. (1987) p3-11.
- 77-** L. Orsini, J. C. Remy. Using chloride cobaltihexamine for the simultaneous determination of exchange capacity and exchangeable bases of soils science, J. Bull. AFES. 4 (1976) 269-279.
- 78-** L. E. Allison. Organic carbon. In A. Klute (Ed.), Methods of soil analysis. PartI. J. Am. Agron. Soc. Madison, WI (1986) 1367–1381.
- 79-** G. Aubert, 1970. Méthodes d'analyses des sols, CRDP. Marseille. (1970) p171p.
- 80-** Afnor. NF X31-147. Qualité des sols-Sols-sédiments-Mise en solution totale par attaque acide. Paris, France. (1996b) p19.
- 81-** A. Bermond, 1999. Caractérisation chimique de la spéciation des métaux traces dans le sol. In Club CRIN Environnement et Ministère de l'Environnement (Ed.), Spéciation des métaux dans les sols. Paris, France: ERIN. (1999) p73-95.
- 82-** W. P. Miller, D. C. Martens, L. W. Zelazny. Effect of sequence in extraction of trace metals from soils, J. Am. Soil. Sci. Soc. 50 (1986) 598-601.
- 83-** A. Tessier, P.G.C. Campbell, M. Bisson. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate traces metals, J. Anal. Chem. 51 (7) (1979) 844–51.
- 84-** ISO 11466, 1995. Qualité du sol. Extraction des éléments en traces solubles dans l'eau régale (1995).
- 85-** A. Lebourg, T. Sterckeman, H. Cieselski et al. Intérêt de différent réactif d'extraction chimique pour l'évaluation de la biodisponibilité des métaux en traces du sol Agromie. 16 (1996) 201-215.
- 86-** S. E. Allen, H.M. Grimshaw, A. P. Rowland. Chemical analysis. In P.D. Moore, S.B. Chapman (Eds.), Methods in Plant Ecology. Blackwell Scientific Publication, Oxford, London. (1986) 285–344.

- 87-** M. Pinta. Spectrométrie d'absorption atomique. Applications à l'analyse chimique. Paris, Masson, 2^{ème} édition, 2 (1980) p696.
- 88-** R. K. Rattan, S. P. Datta, P. K. Chhonkar, K. Suribabu, A. K. Singh. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater-a cause study, *J. Agri. Ecosystems and Environ.* 109 (2005), 310-322.
- 89-** G. N. Magesan, J. C. Williamson, G. W. Yeates and A. Rh. Lloyd-Jones. Wasterwater C: N ratio effects on soil hydraulic conductivity and potential mechanisms for recovery *Bioresource Technology.* 71 (2000) 21-27.
- 90-** W. Salomon, and W. G. Mouk. Processes affecting trace elements in lake. Ijssel. Abstarct.10th Int. Cong. Sedi. Jerusalem. (1978) 569-570.
- 91-** B. Alloway. Heavy metals in soils. John Wiley & Sons (1990).
- 92-** D. Dong, Y. M. Nelson, L. W. Lion, M. L. Shuler, W. C. Ghiorse. Adsorption of Pb and Cd onto metal oxides and organic material in natural surface coatings as determined by selective exactions: new evidence for the importance of Mn and Fe oxides, *J. Wat. Res.* 34 (2000) 427-436.
- 93-** C. Aboubaker. Impacts of phosphate discharges concentrating on the distribution of metals heavy soil-plant interface in the region Mévlaoui. DEA, FST. (2003) p85.
- 94-** O. Algan, N. Balkis, M. Namikcagatay et E. Sari, E., 2004. The sources of metal contents in the shelf sediments from the Marmara sea, J. Turkey. *Environ. Geol.* 46 (2004) 932-950.
- 95-** V. Colandini. Effets des structures réservoirs à revêtement poreux sur les eaux pluviales: Qualité des eaux et devenir des métaux lourds. Thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l'Adour. (1997) 15, 16, 21, 29, 34, 36, 74, 75, 80, 81, 164, 165, 170, 237, 241-243.
- 96-** H. A. Elliott, N. L. Shastri. Extractive Decontamination of Metal-Polluted Soils Using Oxalate, *J. Water. Air & Soil. Pullution.* 110 (1999) 335-346.
- 97-** ZH. Ye , ZY Yang , GYS Chan, MH. Wong. Growth response of *Sesbania rostrata* and *S cannabina* to sludge-amended lead/zinc mine tailings-a greenhouse study, *J. Environ. International.* 26 (2001) 449-455.
- 98-** JF. Souza, WE. Rauser. Maize and radish sequester excess cadmium and zinc in different ways, *J. Plant. Sci.* 165 (2003) 1009-1022.

ANNEXE

Tableau 76: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2006 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1	1,5	0,45	0,06	1,4	4,41
Cu	0,18	1,1	2,11	4,24	2,4	10,03
Pb	0	14,33	18,55	1,3	3,16	37,34
Zn	0,27	10	354,33	78,21	170,33	613,14
Ni	0,03	0,2	4,65	0,32	5	10,2
Co	0	0,1	0,68	0,08	1,42	2,28
Fe	0,89	9,13	10000	159,22	2100,44	12269,68
Mn	0,7	7,38	32	0,1	9,7	49,88
Cr	2	5,59	7,7	1,01	1	17,3

Tableau 77: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2006 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,81	1	0,25	0,03	1	2,89
Cu	0,1	1,09	2,45	6,2	4	13,84
Pb	0	17,74	31,55	5	11,86	66,15
Zn	1,1	20,60	601,22	190,33	401,11	1214,36
Ni	0,1	0,61	4,64	0,31	7,5	13,16
Co	0	0,25	1,13	0,09	1,89	3,36
Fe	1	14,12	15000,66	321,55	5500	20837,33
Mn	2,11	20,33	12,22	0,44	30,26	115,36
Cr	8,55	2,32	17,21	1,04	1,25	30,47

Tableau 78: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'été de l'année 2006 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,95	2,20	0,35	0,02	1,76	5,28
Cu	0,26	0,19	0,90	1,80	13	16,15
Pb	0	9,13	45,20	7,50	29	90,83
Zn	1,47	40	270	250	900	1461,47
Ni	0,20	0,78	2,90	0,89	27	31,77
Co	0,01	0,40	1,30	0,18	2	3,88
Fe	0,81	10	15000,9	354,22	5520,33	20886,26
Mn	1,24	22,33	43,15	0,23	14,1	81,05
Cr	15,14	2,15	12	1,02	1,55	31,86

Tableau 79: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2007 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,8	2	0,43	0,01	1,84	5,08
Cu	0,1	0,78	4	6,77	3,55	15,2
Pb	0,14	10,66	22,77	4,33	9,55	47,45
Zn	1,33	29,44	320,22	160,15	300,66	811,8
Ni	0,28	0,3	9,1	0,29	6,25	16,22
Co	0,05	0,3	1,14	0,28	1,2	2,97
Fe	0,9	10	13000	321,16	5428,6	18760,66
Mn	1	5,32	57,42	0,28	14,66	78,68
Cr	13	3,55	5,22	1,3	0,7	23,77

Tableau 80: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2007 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,69	1,16	0,2	0,01	0,95	3,01
Cu	0,08	1	3,6	5	3,32	13
Pb	0,2	15,33	34,22	4,18	13,9	67,83
Zn	1,10	30,77	650,22	200,11	400	1282,20
Ni	0,33	0,3	15	0,32	5,68	21,63
Co	0	0,5	2,45	0,75	1,12	4,82
Fe	0,51	15,22	16000,3	400,77	4000	20416,8
Mn	1,24	13	72,33	0,43	30	117
Cr	8,19	5,33	16	1,78	1,9	33,4

Tableau 81: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'été de l'année 2007(Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1	2,33	0,72	0,03	1,75	5,83
Cu	0,33	0,26	1,12	12,55	3,88	18,14
Pb	0,25	25	30,33	9,22	29,98	94,78
Zn	1,4	20,66	600,38	320	547	1489,44
Ni	0,25	1,33	3,41	1,55	30	36,54
Co	0	0,31	2,97	0,5	0,9	4,68
Fe	1	10,44	15673,33	309	5007,22	21000,99
Mn	1,17	10	52,88	0,34	30,19	94,58
Cr	10,11	2,9	17,77	2,18	1,33	34,29

Tableau 82: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2008 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1	1,34	0,55	1,65	0,8	5,34
Cu	0,74	0,84	7,33	7,66	0,1	16,67
Pb	4,66	12,33	24	4,89	4,77	50,65
Zn	15,5	52,66	1800	13,44	100,68	1982,28
Co	1,31	2,19	27,55	2,85	13,82	47,72
Ni	2	3,78	20,32	1	8,55	35,65
Mn	0,1	7,66	62	0,1	20,55	90,41
Fe	5,35	7,33	18000	57,22	750,12	18820,02
Cr	4,33	8,5	6	7,22	5,98	32,03

Tableau 83: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2008 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,9	1	0,97	0,45	0,33	3,65
Cu	1	13,11	10,22	150,41	5,33	180,07
Pb	5,77	20,66	41,55	0,1	8,33	76,41
Zn	3,10	63,44	1737,33	172	509,66	2465,53
Co	2,77	6,12	35,42	7,21	16,77	68,29
Ni	1,56	3,95	20,66	4,21	9,88	40,26
Mn	3	10,22	75,25	3,66	31,78	123,91
Fe	3,65	15,33	20000	305,76	2000,43	22325,17
Cr	3,5	7,55	13	0,12	12,76	36,93

Tableau 84: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'été de l'année 2008 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,10	2,40	0,74	0,04	1,77	6,05
Cu	1,87	21,22	50,33	145,89	10	229,31
Fe	1	20,44	22000,56	308,12	4076,77	26406,89
Pb	3,11	10,55	45,33	10	27,88	96,87
Mn	1,45	6,33	61,5	0,34	29	98,62
Zn	3	200,55	1708,44	12	1000,33	2924,32
Ni	1,9	4,35	37,32	4,62	10	58,19
Co	1,83	5,12	36,88	6,77	14,44	65,04
Cr	11,44	7	13,55	2,33	1,7	36,02

Tableau 85: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2009 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2	2,03	0,6	0,01	1	5,64
Cu	2	20,5	90,19	100,33	8,77	221,79
Fe	2	20,44	20000,89	400,5	4000,34	24424,17
Pb	0,1	18,55	25,66	2,15	4,77	51,14
Mn	0,5	17,33	58	0,3	23,77	99,9
Zn	1,55	56,33	2000,44	10	357,23	2425,55
Ni	2,18	5,33	39,33	6,44	14,55	67,83
Co	0,92	11,66	40,73	12,82	16,33	82,46
Cr	2,44	8,66	15	1	7,33	34,43

Tableau 86: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2009 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,9	1,89	0,4	0,05	0,7	4,94
Cu	1	20,22	100	193,55	8,5	323,27
Fe	1	22,44	23000,36	208,55	5089,67	28322,02
Pb	0,2	23,33	38,55	8,18	10,66	81,94
Mn	1	15,44	100	0,75	40,22	157,23
Zn	2,56	289,55	2000	18,44	987,45	3298
Ni	2,87	6,45	43,66	7,3	20,55	80,83
Co	1,65	15,45	51,32	16,43	20	104,85
Cr	5,2	7,33	17,45	2,77	8,36	41,11

Tableau 87: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'été de l'année 2009 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,15	2,43	0,76	0,05	1,80	6,19
Cu	1,98	30,66	100,43	196,87	17	346,94
Fe	1,9	30,33	24040,84	600,55	4079,21	28752,83
Pb	4,10	11	45,44	10,11	28	98,65
Mn	1,58	17,15	89,66	0,67	29,33	138,39
Zn	2	270,22	2000,31	17,44	970,28	3326,25
Ni	3,9	7,44	47,28	7,74	23,33	89,69
Co	1,46	15,12	50,32	16,88	19,11	102,89
Cr	8,7	9,66	20,55	3,44	7,78	50,13

Tableau 88: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2010 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,93	1,98	0,74	0,69	0,9	6,24
Cu	1,34	15,54	85,22	156,77	12	270,87
Fe	0,77	41,88	20008,55	489,64	5370,66	25911,5
Pb	0,02	20,3	21,66	4	7,53	53,51
Mn	1	8,78	70,55	0,56	32,34	113,23
Zn	1,97	182,44	1410,11	10	1008,22	2612,74
Ni	4,09	8,33	50	9,66	25,11	97,19
Co	1,73	18,27	62,49	19,33	26,52	128,34
Cr	3	5,8	15,1	4,79	7,65	35,34

Tableau 89: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2010 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,95	1,93	0,31	0,29	0,52	5
Cu	1,33	31,77	100,22	208,55	17,66	359,53
Fe	1,76	37,44	24028,23	350,7	4072,3	28490,43
Pb	5,66	23,22	34,11	10	13,88	86,87
Mn	1	19,33	100,21	9,95	39,45	169,94
Zn	2	400,33	2207,25	10,58	1012,95	3633,11
Ni	4,57	9,7	58,65	10,33	27,42	110,67
Co	2,66	23,48	70	24,12	32,66	152,92
Cr	10,66	10,54	15,49	4,88	8	49,57

Tableau 90: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'été de l'année 2010 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,15	2,47	0,80	0,06	1,85	6,33
Cu	2,77	32,84	98,66	195,33	24,5	354,10
Fe	1,8	31,44	25000,22	645,88	5088,77	30768,11
Pb	4,20	11,10	45,52	11,15	27,90	99,87
Mn	1	14,78	93,66	0,96	48,77	159,17
Zn	2,54	270,12	2000	17,9	1176,3	3466,89
Ni	4,78	10,33	62,77	12,45	30,44	120,77
Co	2,32	22,31	67,55	23,5	30,28	145,96
Cr	10,87	10,55	20	4,77	10,66	56,85

Tableau 91: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2006 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,93	1	0,36	0,07	0,98	3,34
Cu	0,08	0,83	1	2,01	1,15	5,07
Pb	0,05	8,9	22,38	4,75	5,73	41,81
Zn	4	59,44	700,66	19,77	306,22	1090,09
Ni	0,07	0,27	7,9	0,3	8,98	17,52
Co	0	0,1	0,83	0,26	2	3,19
Fe	2,77	10	16000,33	100,66	1800,44	17914,2
Mn	3,55	4,22	31,44	1,13	16,88	57,22
Cr	1,89	3,77	9,33	0,75	2,88	18,62

Tableau 92: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2006 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,41	0,92	0,1	0,01	0,69	2,13
Cu	0,09	1,15	1,15	2,25	1	5,6
Pb	0,05	10,07	30,98	3,66	7	51,76
Zn	4,22	10,33	589,77	10,44	200,66	815,42
Ni	0,1	0,59	10,66	0,02	7,88	19,25
Co	0,01	0,02	2,89	0,02	2	4,94
Fe	3	14,33	16090	100,33	1889,88	18097,54
Mn	5,9	18,88	40,66	2	20,77	88,21
Cr	2	3,44	12,7	0,55	2,66	21,35

Tableau93: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'été de l'année 2006 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,01	0,51	0,44	0,02	3,60	4,58
Cu	0,20	0,15	0,80	1,50	8	10,65
Pb	0,10	18,90	49	6,30	12	86,30
Zn	8,20	20,50	800	21	510	1359,7
Ni	0,18	0,84	4,70	8,60	23	37,32
Co	0	0,50	1,50	0,90	3	5,90
Fe	2,77	10,12	16032,7	100	1800,88	17946,47
Mn	3,44	8,53	30,22	2	25,66	69,85
Cr	2,98	4,57	10,66	0,89	4,9	24

Tableau 94: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2007 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,87	1	0,6	0,04	0,87	3,38
Cu	0,2	9,89	14,03	18,66	5,22	48
Pb	0,11	10,11	27,66	2,77	5,89	46,54
Zn	6,44	27,88	700	20,66	404,22	1159,20
Ni	1	3,34	21,54	3,77	9,66	39,31
Co	1,21	3,52	20,44	4,76	10,11	40,04
Fe	2	8,45	16987,11	97,33	1621,9	18716,79
Mn	7,66	13,43	24,55	12	16,88	73,97
Cr	2,12	4,5	12,66	1,88	5,77	26,93

Tableau 95: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2007 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,19	1	0,2	0,01	1	2,4
Cu	0,21	7,33	10,44	29,22	4	51,2
Pb	0,09	19,88	28,32	4,21	4,13	56,63
Zn	4,77	13,22	540,33	14,21	350	922,53
Ni	1,87	3,55	23,62	4,33	12,22	45,59
Co	2,44	4,9	23,77	5,46	11,79	48,36
Fe	3,12	14,88	16987,5	130,45	1852	18987,95
Mn	5,77	7,9	41,88	12,22	22,5	90,27
Cr	3,44	5,22	12,88	2,66	6	30,2

Tableau96: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'été de l'année 2007 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,02	2,55	0,47	0,02	1,75	4,81
Cu	0,1	5,44	13,55	30,33	7,18	56,6
Pb	0,13	20	50,51	6,90	12,33	89,87
Zn	8,55	21,33	810,22	22	518,19	1380,29
Ni	1,33	2,45	22,32	4,77	11,1	41,97
Co	1,78	5,55	26,86	6,22	12,12	52,53
Fe	3,11	12	17080,22	100,55	1000,43	18196,31
Mn	4,33	2,11	34,44	7,89	21,7	70,17
Cr	3,10	5,33	17,9	1,66	5,77	33,76

Tableau 97: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2008 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,11	1,12	0,25	0,14	0,98	3,60
Cu	0,9	1,97	12,42	29,55	14,88	59,72
Pb	1,98	13,77	26,33	0,79	7,66	50,53
Zn	40,55	9,43	895,21	48,88	176,66	1170,73
Ni	1,66	3,22	23	5,42	11,97	45,27
Co	2,33	5,11	25,77	5,75	12	50,96
Mn	8,5	7,88	38,77	0,9	24,33	80,38
Fe	2,55	11,77	17083	100,9	1609,43	18807,65
Cr	1,66	3,9	15,55	0,98	8,43	30,52

Tableau 98: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2008 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,35	1,3	0,29	0,3	0,27	2,51
Fe	1,9	14,5	17979,66	177,44	1000	19173,50
Ni	2	5,33	25,52	6,66	13,55	53,06
Co	2,66	7,32	30,15	8,55	14,43	63,11
Cu	0,1	8,9	17,33	30,22	10,88	67,43
Pb	1,9	20,66	29,22	0,28	8,5	60,56
Zn	10,77	17,45	520,88	9,66	428,75	987,51
Mn	7,9	10,44	58,66	4	20,33	101,33
Cr	2,86	9,55	19,77	1,9	5,88	39,96

Tableau99: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'été de l'année 2008 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1	2,76	0,49	0,03	0,80	5,08
Cu	0,82	7,8	23,94	41,55	10	84,11
Pb	0,14	20,77	51,83	7	12,94	92,68
Zn	8,88	22	818,66	22,44	520	1391,98
Ni	1,89	4,44	25	5,55	13,33	50,21
Co	3,66	8,75	36,56	9,55	15,44	73,96
Fe	3	18,8	17132,77	102,55	1079,43	18336,55
Mn	7,55	6,88	40,77	1,9	25,9	83
Cr	3,9	5,59	18,22	1,87	7,66	37,24

Tableau 100: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2009 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,95	1,19	0,65	0,18	1,05	4,02
Cu	0,87	9,53	30,22	36,88	11,32	88,82
Pb	0,21	19,33	37,44	2,96	10,88	70,82
Zn	10,21	30,45	635,77	30	400,56	1106,99
Ni	2,48	5,11	25,14	5,6	13,4	51,73
Co	3,1	8	32,87	9,06	14,22	67,25
Fe	4	12,55	17790,22	100	1208,66	19115,43
Mn	7,5	7,8	51,66	2,43	20,77	90,16
Cr	4,60	5,33	17,88	2,44	7,11	37,36

Tableau 101: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2009 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,76	1,18	0,41	0,09	0,5	2,94
Cu	1	19,85	30,33	39,44	10,22	100,84
Pb	0,3	20,22	37,88	4,66	8,28	71,34
Zn	10	26,77	643,8	30,22	340,33	1051,12
Ni	3,12	6,25	27,58	8,33	14,11	59,39
Co	3,3	8,44	33,28	9,5	15	69,52
Fe	5,73	19,77	18765,55	109,32	1021	19921,37
Mn	10,23	12,44	41,6	5,75	45,66	115,68
Cr	1,87	7,45	15,66	1,9	15,89	42,77

Tableau102: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'été de l'année 2009 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,10	2,80	0,50	0,04	0,91	5,35
Cu	1	14,44	29,77	43,22	11,33	99,76
Pb	0,15	21,10	52	7,33	13	93,58
Zn	9	23,50	820,67	23,60	527,31	1404,08
Ni	2,92	6,15	27	7,57	13,77	57,41
Co	4,21	9,33	40,51	10,54	17,22	81,81
Fe	4,89	19,6	17650	100,47	1045,65	18820,61
Mn	6,45	19,66	50,32	3,1	30,44	109,97
Cr	3,34	6	21,65	2,78	10,59	44,16

Tableau 103: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2010 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,7	1	0,7	0,2	2,07	4,67
Cu	0,7	15,43	21,77	46,55	16,42	100,87
Pb	0,35	18,66	50,22	6,77	6,33	82,33
Zn	19,65	57,44	674,22	40,11	400,33	1191,75
Ni	3,22	6,44	27,22	7,63	13,88	58,39
Co	3,77	9,24	38,77	10,55	16,9	79,23
Fe	4,88	19	18843,44	100,55	1109,98	20077,85
Mn	7	15,66	39,77	4,55	33,98	100,96
Cr	4	8,56	16,88	2,33	10,89	42,66

Tableau 104: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2010 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,9	1,19	0,1	0,09	1,1	3,38
Cu	1	15,33	38,45	40,22	18,77	113,77
Pb	0,08	19,54	38,33	9,22	17,43	84,60
Zn	10,11	30,31	583,88	28,33	420	1072,63
Ni	3,5	8,66	32,77	10,32	17,12	72,37
Co	4,44	11,21	44,34	13,45	21,34	94,78
Fe	5,44	23,55	19000	108,22	1089,55	20226,76
Mn	11,66	13,75	57,32	7,88	30,92	121,53
Cr	3,23	8,55	21,77	3,88	15,98	53,41

Tableau105: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'été de l'année 2010 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,15	2,83	0,52	0,05	1	5,55
Cu	0,95	9,66	48,5	63,11	18,77	140,99
Pb	0,20	21,90	53,66	8,55	14,54	98,85
Zn	10,23	25,22	828,44	25,12	530,77	1419,78
Ni	4,21	8,3	30,88	10	15,77	69,16
Co	4,65	12,75	47,44	14,33	24,66	103,83
Fe	5	18,77	18900,33	100,42	1000,56	20025,08
Mn	9,22	18,77	50,43	6,3	30,85	115,57
Cr	4,77	10,66	20,54	3,23	15,11	54,31

Tableau 106: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2006 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,25	0,98	0,23	0,44	0,71	2,61
Cu	0,63	1,35	1,57	2,87	1,54	7,96
Pb	0,28	18,77	27,33	2,87	7,78	57,03
Zn	2,43	50,22	178,3	28,77	178,87	438,59
Ni	0,03	0,49	5,77	0,39	7,33	14,01
Co	0	0,16	0,43	0,05	1,21	1,85
Fe	1	7,65	6085,33	70,53	843,21	7007,72
Mn	1	10,21	45,11	1,33	19,77	77,42
Cr	0,87	2,87	7,88	0,33	7,66	19,61

Tableau 107: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2006 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,29	1	0,12	0,09	0,66	2,16
Cu	0,14	1,98	3,76	8,9	1,98	16,76
Pb	0,09	7,65	27,44	2	4,22	41,4
Zn	1,98	40,66	188,77	25,33	100,11	356,85
Ni	0,14	1,21	9,87	0,49	7,88	19,59
Co	0,3	0,55	1,21	0,06	2,18	4,33
Fe	2,22	11,77	8043,11	100	987,33	9144,43
Mn	2	13,88	48,44	4,32	30,1	98,74
Cr	1	4,76	10,98	0,52	7,55	24,81

Tableau108: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'été de l'année 2006 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,04	0,92	0,19	0,49	0,59	2,23
Cu	0,1	0,96	2,98	3,21	1,95	9,2
Pb	0,09	5,33	20,22	1,98	5,97	33,59
Zn	2,68	30,17	160,75	17,44	100	311,04
Ni	0,07	0,98	9,44	0,55	6,22	17,26
Co	0	0,19	0,55	0,06	1,97	2,77
Fe	1	6,77	6879,44	87,52	743,11	7717,84
Mn	1,87	9,84	40,12	1,98	19,22	73,03
Cr	1	2,98	7,98	0,76	4	16,72

Tableau 109: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2007 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,89	1	0,21	0,2	0,8	3,07
Cu	0,07	0,65	1,98	4,88	1,95	9,53
Pb	0,19	17,22	27,33	2,98	16,51	64,23
Zn	6,21	52,53	300,5	30,21	120,22	509,67
Ni	0,08	0,94	7,77	0,4	6,45	15,64
Co	0,01	0,2	1,6	0,5	1,12	3,43
Fe	1,98	11,42	10000	100,33	800,77	10914,5
Mn	2,33	10,65	70,88	1,97	30,66	116,49
Cr	1,74	7,55	10,33	3	6,77	29,39

Tableau 110: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2007 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,47	1	0,2	0,22	0,92	2,81
Cu	0,2	1,92	4,21	7,3	6,95	20,58
Pb	0,21	15,55	27,73	1,98	6,44	51,1
Zn	1,97	40,7	276,42	20,11	153,55	492,75
Ni	0,43	6,55	18,66	2,32	9,87	37,83
Co	0,04	0,93	2,89	0,43	1,98	6,27
Fe	2	10,88	11000,67	98,98	1000,55	12113,08
Mn	2,97	5,66	80,75	3,65	45,76	138,79
Cr	3,66	5,45	17,88	3,65	14,87	45,51

Tableau 111: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'été de l'année 2007 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,40	1	0,24	0,17	0,95	2,76
Cu	0,17	0,75	2,77	3,9	3,5	11,09
Pb	0,11	7	22,55	1,76	6,33	37,75
Zn	2,96	40,77	287,44	24,88	144	500,05
Ni	0,3	1	10,88	0,53	5,9	18,61
Co	0,03	0,2	1,85	0,52	1,32	3,92
Fe	1,97	9,87	11000,33	90,25	905,75	12008,17
Mn	2,9	12,33	69,43	2,12	31,55	118,33
Cr	1,92	4	10,19	0,97	6,33	23,41

Tableau 112: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2008 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,40	2,80	0,20	0,10	1	4,50
Cu	1	1,21	1,98	7,77	0,98	12,94
Pb	1,98	18,44	30,55	10,33	8,9	70,2
Zn	3,34	37,5	800,12	49,77	238,66	1129,39
Ni	1,87	1,25	11,22	0	6,77	21,11
Fe	1.98	10.11	10087.88	100.44	806.33	11006,74
Co	1,25	1,87	11,75	0,72	7,7	23,29
Cr	5,88	4.76	15,55	1	10.44	22,43
Mn	2,66	10,77	73	3,22	40,11	129,76

Tableau 113: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2008 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,80	1	0,10	0,32	0,68	2,90
Cu	0,88	10,23	15,77	30,55	8,44	65,87
Pb	0,42	11,77	30,88	8,90	12,44	64,41
Zn	3,65	17,44	456,22	35,66	400	912,97
Ni	1,33	3,55	19,77	4,66	9,44	38,75
Fe	2,21	12,43	11040,11	129,55	1008	12192,30
Co	2,44	4,33	20,34	4,9	9,66	41,67
Cr	7,55	18,33	11	1,98	12,77	51,63
Mn	3,52	12,33	90,44	5,26	43,55	155,10

Tableau114: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'été de l'année 2008 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,29	1,22	0,20	0,35	1,02	3,08
Cu	0,28	6,44	30,66	20,33	5,66	63,37
Pb	0,30	7,66	24,55	1,90	6,77	41,18
Zn	3,10	42,33	457,44	39,65	412,12	954,64
Ni	1,27	2,75	18,76	4,44	9,12	36,34
Co	2,11	4	19	5,34	9	39,45
Fe	1,75	9,77	11085,33	97,55	967,22	12161,62
Mn	2,98	14,77	89,80	2,90	14,56	125,01
Cr	1,90	4,44	10,88	0,90	7,33	25,45

Tableau 115: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2009 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1	3,9	0,07	0,55	2,25	7,77
Cu	0,21	5	30,32	19,54	6,43	61,5
Pb	0,31	17,52	49,21	4,22	16,43	87,69
Zn	9,43	83,21	797,55	64,77	654,88	1609,84
Ni	1,9	5,65	23,66	6,76	12,41	50,38
Co	1,21	6,44	24,82	5,33	12	49,8
Fe	6,11	19,42	10079	102,23	1207,54	11414,3
Mn	5,33	19,54	100,21	5,31	32,88	163,27
Cr	1,9	10,95	19,96	1,9	19,44	54,15

Tableau 116: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2009 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,7	1,97	0,3	0,56	1,18	4,71
Cu	0,61	8,41	28,55	30,33	10	77,9
Pb	0,45	10,37	48,66	3,18	10,44	73,10
Zn	1,96	59,44	507,23	40	498,22	1106,85
Ni	2,14	6,55	27,33	8,77	13,66	58,45
Co	2,53	6,98	27,54	8,21	14,78	60,04
Fe	3,61	20	11000,42	108,96	1148,44	12281,43
Mn	4,33	17,55	100,77	5,32	39,55	167,52
Cr	2,33	10,66	23,55	4,57	19,7	60,81

Tableau 117: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'été de l'année 2009 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,91	2,02	0,37	0,39	1,97	5,66
Cu	0,35	8,59	30,44	25,22	8,21	72,81
Pb	0,3	8,25	28,44	2,47	8,9	48,36
Zn	3,21	52,66	592,33	35,44	500,77	1184,41
Ni	2	5,54	26,55	7,31	13,1	54,5
Co	1,77	7,66	25,37	5,22	13,11	53,13
Fe	2,95	18,42	11100,43	100,33	1000,22	12222,35
Mn	4	11,77	100,55	5,64	30,66	152,62
Cr	1,74	7,22	10,42	1,93	10,68	31,99

Tableau 118: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2010 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,52	3,54	0,5	0,48	2	8,04
Cu	0,41	7,76	27,33	25,55	9,44	70,49
Pb	0,51	25,33	42,77	9,44	12,65	90,70
Zn	4,21	85,33	790,44	57	694,88	1631,86
Ni	2,85	7,66	29,76	8,9	14,34	63,51
Co	4,21	8,06	32,85	9,55	16,77	71,44
Fe	3,41	20,25	11240	103,22	121,55	11488,43
Mn	5,11	14,33	115,65	8,52	39,88	183,49
Cr	3,45	9,78	20,54	3,22	20,52	57,51

Tableau 119: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2010 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,82	2,54	0,45	0,48	1,21	5,50
Cu	0,78	7,43	30,55	35,77	16,44	90,97
Pb	0,51	30	32,88	8,55	10,77	82,71
Zn	3,42	45,44	608,33	37,77	500	1194,96
Ni	3,21	8,11	33,45	9,44	15,55	69,76
Co	7,77	9,23	42,86	11,85	19,9	91,61
Fe	3,43	19,66	11789	119,54	1257	13188,63
Mn	7,33	19,44	100	10,5	40,9	178,17
Cr	3,12	12,75	21,67	7,54	23,88	67,96

Tableau120: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'été de l'année 2010 (Fraction 2mm) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1	3,21	0,25	0,92	1,4	6,78
Cu	0,51	8,31	25,51	33,66	13,33	81,32
Pb	0,38	18,44	31,22	4,55	7,33	61,92
Zn	3,66	65,77	678,33	50,68	503,21	1301,65
Ni	3	7,76	31,56	8,95	15,38	66,65
Co	5,21	8,34	35	10,33	17,52	76,4
Fe	3,07	18,44	11142,5	117	1082,48	12363,49
Mn	5,34	17,66	90,5	7,87	39,5	160,87
Cr	3	8,9	20,53	2,76	15,66	50,85

Tableau 121: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2006 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,55	1,98	0,79	0,20	1,98	6,50
Cu	0,4	1,97	2,97	6,77	6	18,11
Pb	0,55	25,66	38,23	4,15	8,45	77,04
Zn	3,24	26,63	589,34	121,22	298,44	1038,87
Ni	0,25	0,49	16,78	0,87	14,66	33,05
Co	0,02	0,29	1,19	0,3	3,55	5,35
Fe	2,21	16,44	11041,77	216	2190,33	13466,75
Mn	1,39	20,44	73,11	0,27	20,56	115,77
Cr	22,33	13,54	41,66	9,45	6,77	93,75

Tableau 122: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2006 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,96	2,83	0,88	0,11	2,54	8,32
Cu	0,44	1,93	3,15	7,98	7,89	21,39
Pb	4,55	28,77	59,44	18,66	28,33	139,75
Zn	3,55	49,33	749,65	283,22	496	1581,75
Ni	0,84	0,97	21,33	1,93	25,87	50,94
Co	0,02	1,91	2,69	0,78	4,21	9,61
Fe	1,42	26,31	16054,75	390,66	5591,51	22064,65
Mn	3,06	38,33	96,73	0,9	60,54	199,56
Cr	14,24	10,33	29,65	4,82	3,58	62,62

Tableau 123: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'été de l'année 2006 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,10	3,88	1,54	0,98	3,95	11,45
Cu	0,46	0,34	1,34	2,05	23,66	27,85
Pb	0,55	9,98	57,77	11,31	39,22	118,83
Zn	1,95	57,23	294,11	292,44	993,66	1639,39
Ni	0,25	0,98	3,97	1,9	35,22	45,32
Co	0,08	0,97	3,61	0,95	4,27	9,88
Fe	1,5	28,43	15754	400,06	5598,28	21782,27
Mn	2,16	82,33	71,28	1	37,25	194,02
Cr	25,19	18,16	37,18	10	7,8	98,33

Tableau 124: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2007 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,85	3,05	1,05	0,15	3,07	9,17
Cu	0,98	2,06	5,97	8,9	4,84	22,75
Pb	1,08	31,32	30,87	19,66	25,44	108,37
Zn	10,13	57,44	543,77	283,55	435	1329,89
Ni	0,96	1,47	24,84	3,78	19,55	50,6
Co	0,1	1,27	4,07	2,33	3,55	11,32
Fe	1,78	33,56	14352,33	398,65	5590,42	20376,74
Mn	3,48	24,68	89,16	4,55	42,71	164,58
Cr	25,33	10,12	25,66	15,87	5,06	82,04

Tableau 125: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2007 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,98	4,90	1	0,25	3,97	12,10
Cu	1,03	4,82	7,88	11,2	8,74	33,67
Pb	1,03	40,15	61,77	10,66	29,35	142,96
Zn	2,71	62,44	654,78	267,69	495,33	1482,95
Ni	1,07	1,54	32,78	1,66	21,22	58,27
Co	0,04	1,32	7,86	1,88	5,77	16,87
Fe	1,76	39	17000,55	497,9	5609,85	23149,06
Mn	4,12	31,27	158	1,08	79,8	274,27
Cr	28,87	11,73	31,66	7,22	5,49	84,97

Tableau 126: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'été de l'année 2007 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,92	4,95	1,77	0,96	3,98	13,58
Cu	1,27	5,66	9,84	10,51	7,53	34,81
Pb	1,08	41,44	61,22	14,66	29	147,4
Zn	4,77	70,04	762,15	298	590,44	1725,4
Ni	1,65	2,06	50,33	1,77	21,87	77,68
Co	0,02	0,72	9,02	0,95	1,55	12,26
Fe	1,27	29,11	17345,52	542,18	5602,44	23520,52
Mn	2,71	26,77	87,33	0,85	53,66	171,32
Cr	35,66	12,43	37,77	8,95	7,96	102,77

Tableau 127: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2008 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,08	2,15	1,74	2,12	1,97	10,06
Cu	2,43	2,56	9	10,18	7,84	32,01
Pb	15,44	39,95	47,22	13,55	13,66	129,82
Zn	36,5	85,88	1970	52,33	320,88	2465,59
Co	5,61	6,78	98,95	3,77	48	163,11
Ni	4,66	10,75	45,88	3,59	12,33	77,21
Mn	1,77	20,85	169,34	1,49	47,58	240,53
Fe	14,77	21,88	19897,31	116,62	2310,4	22360,98
Cr	20,86	25,75	35,94	14,33	12,49	109,37

Tableau 128: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2008 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,52	3,98	2,07	1,09	2,77	12,43
Cu	2,07	29,88	30,44	210,55	20,77	293,71
Pb	16,44	52,77	73,63	1,55	18,33	162,72
Zn	7,65	110,21	1989,78	298,44	786,32	3192,4
Co	4,78	7,89	45,33	9,44	19,33	86,77
Ni	0,28	8,33	50,85	9,88	20,91	90,25
Mn	20,73	25,55	170,77	15,52	60	292,57
Fe	8,51	28,66	20987,55	689,77	2390,44	24104,93
Cr	21,88	15,33	30,55	2,66	23	93,42

Tableau129: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'été de l'année 2008 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	4,77	4,02	2,15	1	2,30	14,24
Cu	2,27	57,33	110	229,66	25,86	425,12
Fe	1,9	48	27189,35	710,77	8581,18	36531,2
Pb	12	36,44	64,74	23,31	24,31	160,8
Mn	5,5	25,44	128,66	1,98	58,79	220,37
Zn	8,11	460,33	2649,88	58,66	1329,44	4506,42
Ni	3,57	8,66	55	10	22,94	100,17
Co	3	10,33	69,43	12,32	30,68	125,76
Cr	35,5	25,33	42,96	12,44	13,55	129,78

Tableau 130: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2009 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	3,32	3,66	1,09	0,10	2,40	10,57
Cu	3,5	54,33	149,86	207,44	25,77	440,9
Fe	2,74	36	23712,66	742,72	7690,43	32184,55
Pb	0,26	47,89	54,77	10	29,8	142,72
Mn	0,94	39,9	92,87	12,33	131,85	277,89
Zn	2,97	128,34	2598,37	29,39	489,66	3248,63
Ni	2,55	9,33	70,88	11,82	30,44	125,02
Co	1,86	18,58	120,85	21,64	58,33	221,26
Cr	10	18,14	38,32	22,47	35,02	123,95

Tableau 131: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2009 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	3,90	4,78	1,66	0,96	3,10	14,40
Cu	2,77	77,55	154,33	265,87	28,89	529,41
Fe	2,42	48,56	28497,97	498,66	8690,25	37737,86
Pb	1,96	42,88	75,44	27,33	25,77	173,38
Mn	3,45	38,33	159,88	13,77	90,21	305,64
Zn	7,85	398,66	2798,55	35,89	1319,88	4560,83
Ni	4,55	11,22	94,33	14,97	45,66	170,73
Co	4,98	15,35	100,85	18,34	50,66	190,18
Cr	13,44	16,55	47,87	10,32	20,66	105,84

Tableau132: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'été de l'année 2009 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	3,98	4,87	1,97	1,15	3,59	15,56
Cu	3,77	71,43	164,85	279,66	38,52	558,23
Fe	2,77	59,66	29107,55	773,58	9054,11	38997,67
Pb	20,95	48,77	68,95	18,43	21,22	178,32
Mn	2,23	38,55	138,77	2,12	68,87	250,54
Zn	4,88	490,43	2893	41,02	1316,17	4745,5
Ni	5,83	15,84	100,87	17,72	49,41	189,67
Co	5,94	19	145,43	22,13	72,86	265,36
Cr	18,89	35,77	55,98	8	25,44	144,08

Tableau 133: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'hiver de l'année 2010 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,94	3,98	1,27	1,03	2,05	11,27
Cu	2,94	40,65	121,33	278,9	45,77	489,59
Fe	1,9	62,55	22987,75	589,66	8921	32562,86
Pb	3,88	45,44	53,9	15,88	31,77	150,87
Mn	8,43	25,77	150,32	7	100,44	291,96
Zn	2,30	224,85	2031,55	24,66	1300,03	3583,39
Ni	6,84	17,42	135,33	20,44	61,22	241,25
Co	7,65	20,78	160,33	23,77	65,81	278,34
Cr	14,77	30,98	41,65	15,98	28,9	132,28

Tableau 134: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison de printemps de l'année 2010 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	3,77	4,34	2,17	1,21	3,51	15
Cu	4,88	69,33	150,75	290,31	54	569,27
Fe	2,76	58	28996,54	789,21	8294,77	38141,28
Pb	21,77	45,96	70,33	20,88	29,55	188,49
Mn	4,41	43	171,66	3,97	93,5	316,54
Zn	4,80	484,66	2897	36,44	1324,22	4747,12
Ni	7,19	17,65	150	21,76	67,11	263,71
Co	7,65	23,78	179,33	25,77	81,81	318,34
Cr	20,9	26,89	37,88	12,17	20,65	118,49

Tableau 135: Les teneurs en métaux lourds du sol S1 dans la saison d'été de l'année 2010 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	3,97	4,80	1,77	1,89	3,80	16,23
Cu	7,83	75,89	168,88	297,97	42,55	593,12
Fe	6,85	69,44	29898	793,14	9110,02	39877,45
Pb	15,87	48,9	69,88	21,7	34,66	191,01
Mn	5,88	34,77	138,66	7,33	78	264,64
Zn	5,80	492,77	2898,11	73,44	1397,55	4867,67
Ni	7,88	18,5	164,5	22,33	78,77	291,98
Co	6,44	20,66	148	22,88	72,18	270,16
Cr	31,77	46,44	36,96	12,54	30	157,71

Tableau 136: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2006 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,66	2,88	1,02	0,42	2,34	8,32
Cu	0,2	1,57	2,68	4,54	2,69	11,68
Pb	0,1	23,9	49,85	15,88	17,77	107,5
Zn	14	100,33	883,12	39,41	670,55	1657,41
Ni	0,19	0,52	15,9	0,89	28,41	45,91
Co	0,01	0,49	1,82	0,82	2,98	6,12
Fe	4,8	17,5	17200,33	194,22	2048,77	19465,62
Mn	16,11	15,33	49	5,66	58,77	144,87
Cr	5,21	14,55	16,25	1,03	18,41	55,45

Tableau 137: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2006 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,9	1,98	0,89	0,06	1,44	5,27
Cu	0,28	1,88	2,04	13,77	6,45	24,42
Pb	0,18	25,54	47,63	5,98	30,95	110,28
Zn	15,44	26,35	810,36	29,77	518,39	1400,31
Ni	0,42	1,98	23,33	0,12	25,77	51,62
Co	0,11	1,02	5,88	0,55	4,66	12,22
Fe	5,77	38,61	17397,55	228,33	2100	19770,26
Mn	10,96	29,77	90,33	10,44	74,41	215,91
Cr	10,33	17,47	31,88	1,25	13	73,93

Tableau 138: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'été de l'année 2006 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,04	0,97	1,04	0,5	4,9	7,45
Cu	0,39	0,41	1	1,97	24,22	27,99
Pb	0,32	29,78	58,44	16,28	25,92	130,74
Zn	15,77	38,21	827,88	29,33	568,66	1479,85
Ni	0,3	1,09	10	17,66	30,33	59,38
Co	0,01	1,13	5,34	1,03	2,61	10,12
Fe	7,88	29	17300,1	190,33	2075,19	19602,42
Mn	13,88	23,11	64,77	9,33	52,44	163,53
Cr	19,22	12	32,55	1,54	14,88	80,19

Tableau 139: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2007 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,28	3,04	1,15	0,2	2,05	8,72
Cu	0,56	20,15	30,33	55,8	28,77	135,61
Pb	0,89	25,54	57,33	6,89	25,88	116,53
Zn	29	78,55	924,77	51,22	600,77	1684,31
Ni	1,97	6,74	57,87	8,22	25,66	100,46
Co	3,45	6,14	41,23	8,66	20,77	80,25
Fe	5,8	28	18787,98	189,66	2204,33	21215,77
Mn	10,87	23,44	49,97	22,65	42,76	149,69
Cr	6,33	17,88	31,18	8,77	10,5	74,66

Tableau 140: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2007 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,9	2,13	0,8	0,9	1,89	6,62
Cu	0,84	26,87	29,55	59,96	18	135,22
Pb	0,86	40,88	60,44	10,55	10,53	123,26
Zn	17,9	31,22	855,33	43,18	550	1497,63
Ni	2,87	7,82	60,81	9,44	29,55	110,49
Co	5,77	8,58	53,66	10,55	24,16	102,72
Fe	7,9	35,88	18608,66	229,77	2287,8	21170,01
Mn	15,94	30,88	110,66	18,79	59,9	236,17
Cr	15,88	19,66	39,87	0,55	17,44	93,4

Tableau141: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'été de l'année 2007 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,96	2,72	1,03	0,29	2	8
Cu	0,94	19,22	37,19	69,97	23,55	150,87
Pb	0,9	30,77	63,88	14,44	35,66	145,65
Zn	15,88	38,77	898,44	36,65	510,21	1504,95
Ni	2,9	6,55	58,67	8,68	27,77	104,57
Co	5,98	9,88	61,24	11,33	29,44	117,87
Fe	7	27,43	18798,66	205,77	2270,55	21309,41
Mn	10,66	6,41	78,33	19,77	59,5	174,67
Cr	11,44	15,76	40	8,55	14,33	90,08

Tableau 142: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2008 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,95	3,14	1,05	0,96	2,55	9,65
Cu	7,33	11,77	33,44	59,18	32,89	144,61
Pb	5,9	29,95	58,66	17,22	20,44	132,17
Zn	78	25,75	1100,50	98,33	397,66	1700,24
Ni	3,25	7,77	68,33	10,88	32,66	122,89
Co	5,9	9,42	59,33	10	27,22	111,87
Mn	18,66	12,43	98,77	5,44	52,19	187,49
Fe	5,88	31,55	18300,77	221	2800,33	21359,53
Cr	8,64	15,77	30,18	10,55	24,66	89,8

Tableau 143: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2008 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,9	2,96	0,87	0,72	1,42	6,87
Fe	7,21	39,77	20398,65	390,44	2289,66	23125,73
Ni	3,88	8,97	79,5	12,33	35,47	140,15
Co	6,15	10,66	67,9	12,33	33,44	130,48
Cu	0,44	15,77	49,89	74,66	38,9	179,66
Pb	10,5	34,77	57,66	1,44	26,88	131,25
Zn	28,88	40,33	1032,77	21,55	398,22	1521,75
Mn	25,88	34,33	134,95	13,22	52,79	261,17
Cr	12,66	21,32	48,44	10,9	25,77	119,09

Tableau144: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'été de l'année 2008 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,49	1,98	1,70	0,80	4,50	9,47
Cu	1,8	11,77	55,88	88,55	29,44	197,44
Pb	0,31	42,77	68,96	22,44	28,62	163,10
Zn	21,32	43,66	898,44	45,11	582,33	1590,86
Ni	5,89	9	70,44	11,33	32,33	128,99
Co	6,77	11,65	85,34	14,5	40,12	158,38
Fe	7,65	28,45	20098,33	287,87	2389,44	22811,74
Mn	16,43	20,13	72,65	10,32	68,87	188,40
Cr	10,34	21,43	42,98	10,77	29,77	115,30

Tableau 145: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2009 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,32	2,56	1,69	0,90	2,49	9,96
Cu	1,76	27	51,22	79,44	29,55	188,97
Pb	0,78	43,16	62,64	14,77	28,89	150,24
Zn	26,55	67	1007,53	65,48	603,33	1769,89
Ni	6,33	9,66	85,64	12,21	35,88	149,72
Co	6,27	11,11	79,44	13,66	36,89	147,37
Fe	9,77	28,45	21089,56	290,33	2389,69	23007,8
Mn	18,76	29	92,44	12,33	74,55	227,08
Cr	14,21	21,77	31,54	10,66	24,72	102,9

Tableau 146: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2009 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,8	2,66	0,92	0,75	1,94	8,07
Cu	3,75	28,44	49,88	100,33	21,77	204,17
Pb	1,12	36,88	90,33	14	20,1	162,43
Zn	20,77	51,33	998,22	53,55	574,25	1698,12
Ni	7,44	10,77	97,23	14,22	42,54	172,2
Co	7,18	11,37	83,33	14	38,1	153,98
Fe	16,42	49,33	21100	272,19	2372,69	23810,63
Mn	27,66	37,57	100,53	21,21	86	272,97
Cr	11,22	20,44	55,37	10,66	40,33	138,02

Tableau147: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'été de l'année 2009 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,95	2,93	1,55	0,87	2,45	9,75
Cu	3,68	36,5	65,68	100,19	31,83	237,88
Pb	3,51	38,44	89,27	20	28,77	179,99
Zn	23,11	158,9	898,78	57,38	597,43	1735,6
Ni	6,9	10,14	90,42	14,1	40,44	162
Co	7,55	11,83	96,54	14,23	43,95	174,1
Fe	14	34,25	21100,33	280,65	2384,66	23813,89
Mn	18,5	38,68	95,33	15	50,88	218,39
Cr	19,44	23,52	50,66	10,33	29,55	133,5

Tableau 148: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'automne de l'année 2010 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,90	3,79	1,77	0,85	2,55	10,86
Cu	7,52	37,14	59,88	100	38,74	243,28
Pb	1,22	41,39	90,44	19,33	25	177,38
Zn	38,7	100	987,32	79,44	653,88	1859,34
Ni	6,21	9,84	87,54	13,8	38,66	156,05
Co	7,21	11,18	91,33	14,17	40,32	164,21
Fe	10,5	41,38	21100,32	287,45	2389,81	23829,46
Mn	21,33	48,66	85,44	18,55	59,77	233,75
Cr	17,54	27,69	55,66	10,33	29,88	141,1

Tableau 149: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison de printemps de l'année 2010 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,89	2,78	1,44	1,26	2,57	9,94
Cu	1,94	36,33	82,55	106,67	35,8	263,29
Pb	0,98	36,88	94,33	17,77	39,55	189,51
Zn	27,33	68,88	990,54	59,2	583,77	1729,72
Ni	7,5	12,77	98,55	15,8	45,96	180,58
Co	7,66	12,63	100,44	14,45	48,57	183,75
Fe	18,43	49,33	21987,56	280,75	2394,77	24730,84
Mn	39,77	36,44	136,55	21,88	90	324,64
Cr	11,66	30,54	69,8	10	40,33	162,33

Tableau150: Les teneurs en métaux lourds du sol S2 dans la saison d'été de l'année 2010 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,98	2,78	1,25	0,90	2,98	9,89
Cu	2,9	35,77	85,8	130,13	30,76	285,36
Pb	0,9	38,83	97,84	28,98	31,66	198,21
Zn	34,12	65,77	998,90	70,43	632,88	1802,10
Ni	7,36	12,33	95,33	15,43	42,66	173,11
Co	8,11	13,44	111,76	15,8	52,08	201,19
Fe	13,76	49,78	21190,85	287,44	2390,55	23932,38
Mn	21,54	38,87	111	14,77	79,87	266,05
Cr	17,9	29,43	59,89	12,66	39,79	159,67

Tableau 151: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2006 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,94	2,41	0,93	0,9	1,41	6,59
Cu	0,54	4,81	4,97	7,5	4,11	21,93
Pb	0,97	41,77	58,9	12,66	21,88	136,18
Zn	10,22	109,33	400,88	43,12	240	803,55
Ni	0,1	0,97	13,5	1,23	20,44	36,24
Co	0,21	0,65	0,95	0,15	3,77	5,73
Fe	3,43	18,31	10798,8	189,44	1496,88	12506,86
Mn	5,11	25,33	106,88	5,22	40	182,54
Cr	3,45	10	16,33	1,44	14,66	45,88

Tableau 152: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2006 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,5	1,53	0,39	0,3	1,05	3,77
Cu	0,9	6,86	10,77	19,66	7,55	45,74
Pb	0,41	23,77	42,66	10,89	16,9	94,63
Zn	1,77	78,55	365,66	34	221,33	701,31
Ni	0,41	4,88	27,74	1,9	21,75	56,68
Co	1,87	2,9	2,77	0,25	4,66	12,45
Fe	3,98	24,45	11097,83	190	1576,12	12892,38
Mn	10	37,44	156,11	16,33	48,66	268,54
Cr	7,88	10,33	28,55	1,77	18,55	67,08

Tableau153: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'été de l'année 2006 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,07	1,56	0,45	0,79	1,04	3,91
Cu	0,25	3,9	5,88	10,77	11	31,8
Pb	0,2	18,78	40,33	5,62	11,4	76,33
Zn	5	80,33	353,88	54,44	204,89	698,54
Ni	0,1	1,27	25,17	0,67	10,97	38,18
Co	0,53	0,98	1,89	0,1	2,98	6,48
Fe	2,5	20,77	10896,88	174,33	1500,44	12594,92
Mn	7,1	20,66	100,33	3,2	35,88	167,17
Cr	2,45	8,55	13,77	1,02	11,33	37,12

Tableau 154: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2007 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,4	1,9	0,78	1,3	2,5	7,88
Cu	0,38	1,98	4,5	10,77	10,66	28,29
Pb	13,76	33,44	63,82	12,66	24,77	148,45
Zn	15,32	110,66	380,55	64,11	293,88	864,52
Ni	0,75	2,9	20,87	0,98	13,44	38,94
Co	0,12	0,93	2,87	1,1	1,9	6,92
Fe	3,5	27,34	13398,33	197,22	1665,1	15291,49
Mn	5,33	30,66	150,41	7,2	50,77	244,37
Cr	2,9	16,84	31,77	10	18,54	80,05

Tableau 155: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2007 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,9	1,78	0,5	0,89	1,66	5,73
Cu	0,98	5,85	10,33	25,11	10	52,27
Pb	0,95	30,63	52,77	10,55	16,9	111,8
Zn	4,86	78,77	393,44	41,88	257,65	776,6
Ni	0,87	3,98	31	5,66	16,43	57,94
Co	0,1	1,54	7,89	1,9	3,8	15,23
Fe	5,67	29,33	15218,88	208,45	1630,66	17092,99
Mn	7,9	38,9	175,66	10,9	89,44	322,8
Cr	10,56	20,98	28,77	10,55	24,44	95,26

Tableau156: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'été de l'année 2007 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentiel).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,98	1,94	0,93	0,76	1,8	6,41
Cu	0,68	1,51	7,85	17,9	10,77	38,71
Pb	0,89	28,77	39,88	0,44	20,1	90,08
Zn	10,77	90,87	380,33	49,66	240,22	771,85
Ni	1,83	3,95	35,22	6,66	16,9	64,56
Co	0,15	2,79	13,88	3,77	6,66	27,25
Fe	4,76	24,9	13193,44	180	1590,32	14993,42
Mn	10,43	27,22	131,55	5,77	52,88	227,85
Cr	2,9	10,55	27,33	4,88	21,66	67,32

Tableau 157: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2008 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,90	3,86	0,89	0,51	2,40	9,56
Cu	3,55	4,88	7,11	10,33	7	32,87
Pb	7,94	44,33	62,8	20,77	26,22	162,06
Zn	7,11	72,41	1542,66	94,5	478,22	2203,9
Ni	1,42	3,33	33,11	6,3	16,44	60,6
Fe	5,66	20,15	16290	250,22	1068,88	17634,91
Co	0,54	2,33	12,88	2,9	6,23	24,88
Cr	4,77	24,83	30,5	17,9	24,66	102,16
Mn	10,22	31,43	115	11,27	90,15	258,07

Tableau 158: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2008 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,78	1,78	0,8	0,67	1,9	5,93
Cu	1,96	20,32	30,43	57,77	22,88	133,36
Pb	0,89	25,77	58,1	17,85	24,66	127,27
Zn	7,61	32,77	940,13	73,5	898,88	1952,89
Ni	2,93	3,77	38,66	6,88	18,55	70,79
Fe	4,55	29	15098,33	369,66	2036,88	17538,42
Co	2,77	3,44	20,21	5,89	8,98	41,29
Cr	10,22	18,9	38,66	14,88	28,77	111,43
Mn	19,55	34,88	171,33	18,66	100,77	345,19

Tableau 159: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'été de l'année 2008 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	0,6	2,98	0,9	0,95	1,89	7,32
Cu	0,68	21,44	48,66	39,55	14,77	125,1
Pb	0,98	27,33	57,66	11,88	27,76	125,61
Zn	7,88	90,44	980,9	70,77	800,33	1950,32
Ni	3,11	4,33	50,44	5,22	22,66	85,76
Co	5,9	4,89	40,66	6,94	19,33	77,72
Fe	3,88	23,55	13012,77	193,44	2195,88	15429,52
Mn	10,22	31,45	148,77	10,33	41,5	242,27
Cr	10,33	16,88	29,77	6,66	18,54	82,18

Tableau 160: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2009 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,21	5,29	0,98	1,1	3	11,50
Cu	0,98	7,19	57,32	35,66	16,9	118,05
Pb	2,89	37,89	73,7	12,44	30,66	157,54
Zn	20,55	190,66	1978,77	100	20,88	2310,86
Ni	2,77	4	45,18	4,54	20,66	77,15
Co	5,21	4,33	38,44	6,66	18,66	73,3
Fe	14,55	39,77	14998,33	276,34	2360,24	17689,23
Mn	17,24	41,77	165	14,86	61,55	300,42
Cr	3,76	18,33	35,5	13,77	35,81	107,17

Tableau 161: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2009 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,70	3,04	0,96	1,65	2,33	9,68
Cu	1,23	21,28	57,22	65,33	24,55	169,61
Pb	3,9	25,55	69,49	10,5	28,16	137,6
Zn	13	87,33	978,2	75,12	858,42	2012,07
Ni	5,03	6,44	57,11	8,55	24,77	101,9
Co	5,34	7,64	49,47	9,44	23,11	95
Fe	10,77	43	15983,22	290,44	2689,33	19016,76
Mn	10,5	29,88	190,56	20,65	95,11	346,7
Cr	10,29	30,22	48,55	15,33	40,41	144,8

Tableau 162: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'été de l'année 2009 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,89	3,12	0,89	0,97	2,88	9,75
Cu	1,9	23,88	58,9	61,89	25,77	172,34
Pb	4,55	25,77	63,49	10,33	23,55	127,69
Zn	10,90	104	1021,54	84,33	910,18	2130,95
Ni	5,35	6,54	50,21	7,46	26,65	96,21
Co	4,89	7,05	45,16	9,22	22,77	89,09
Fe	10,22	37,33	13798,55	230	2289,44	16365,54
Mn	14,22	29,77	189,45	15,88	59,79	309,11
Cr	10,32	26,38	39,55	15	27,64	118,89

Tableau 163: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'automne de l'année 2010 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	2,9	4,87	1,79	1,07	3,56	14,19
Cu	1,05	14,56	56,88	76,44	20,66	169,59
Pb	1,44	58,33	80,21	20,88	28,49	189,35
Zn	10,66	158,43	1130,58	100,11	1056,77	2456,55
Ni	5,35	8,66	67,55	9,33	33,11	124
Co	6,43	7,76	63,43	9,21	30,44	117,27
Fe	10,3	43,25	15000,24	267,16	2390	17710,95
Mn	12,55	29,78	179	20,44	110,66	352,43
Cr	10,55	29,66	39,22	10,33	39,77	129,53

Tableau 164: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison de printemps de l'année 2010 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,89	4,09	1,10	1,20	2,98	11,26
Cu	3,45	38,79	70	90,55	37,44	240,23
Pb	1,28	63,17	78,55	25,7	28,55	197,25
Zn	10,43	128,26	1090,22	89,43	1000,77	2319,56
Ni	8,44	10,33	80,17	11,22	39,66	149,82
Co	7	9,33	79,88	12,21	38,44	146,86
Fe	10,2	38,33	17098,21	280,44	2658,11	20085,29
Mn	19,77	42,66	188,22	30,57	90,66	371,88
Cr	10,77	29,44	50,9	20,66	42,89	154,66

Tableau 165: Les teneurs en métaux lourds du sol S3 dans la saison d'été de l'année 2010 (Fraction le fond) en mg /kg (ppm) (extraction séquentielle).

ETM/PHASES	Phase échangeable	Phase acido soluble	Phase réductible	Phase oxydable	Phase résiduelle	Totale
Cd	1,90	4,98	0,95	1,87	2,85	12,55
Cu	1,33	20,77	62,44	79,8	80,22	244,56
Pb	3,9	49,55	90	9,44	28,33	181,22
Zn	15,32	159,77	1000,44	95,88	1000	2271,41
Ni	7,55	10,44	76,21	11,11	37,5	142,41
Co	7,66	9	74,55	11,66	35,44	138,31
Fe	16,33	40,4	13998,45	212,22	2390,44	16657,84
Mn	17,33	32,38	153,44	20,55	88,22	311,92
Cr	10,16	28,77	49,44	10,33	30,55	129,25

PUBLICATION

African Journal of Agricultural Research Vol. 5(20), pp. 2795-2800, 18 October, 2010
Available online at <http://www.academicjournals.org/AJAR>
ISSN 1991-637X ©2010 Academic Journals

Full Length Research Paper

Assessment of metals accumulated in Durum wheat (*Triticum durum* Desf.), pepper (*Capsicum annuum*) and agricultural soils

A. Baba Ahmed* and K. Bouhadjera

Department of Chemistry, Faculty of Sciences, Laboratory of Inorganic Chemistry and Environment. University of Tlemcen 13000, Algeria.
Accepted 5 October, 2010

Soil contamination by heavy metals is widely spread and concerns have been raised over the potential risks to humans, animals and agricultural crops. Toxic metals are readily accumulated in some plants and may cause a threat to humans and grazing animals. In this study, an assessment on contaminated edible vegetables by heavy metals is made. Two major sites (denoted S1 and S2) where durum wheat (*Triticum durum* Desf.) and pepper (*Capsicum annuum*) are widely cultivated in Algeria have been considered. S1 and S2 have been subjected to chemical characterisation, total metal quantification (Cd, Cu, Zn, Pb, Ni and Co) and sequential extraction as well metal speciation. Total content of the metals in the soils were found to be below the internationally recommended and permissible limits set for agricultural use for all the heavy metals except for Pb (mostly bound to iron and manganese oxides) in S2. Whereas Cd and Zn concentrations were higher in both S1 and S2; Cd, Cu, Zn, Ni and Co were mainly present in residual form, appearing less bio-available. As a consequence, these soils exhibit significant contamination. In the edible portions of durum wheat and pepper, the respective concentrations of Cd and Cu as well as of Pb, Zn, and Ni are found to exceed the permitted limits of the European Standards. The study indicates a potential ecological risk of the contaminated plants by most heavy metals except in the case of Co, causing potential health risk.

Key words: Heavy metals, soil, contamination, sequential extraction.

INTRODUCTION

Soils are major receptacles for heavy metals released from industrial activities; municipal wastewater sludge, urban composts, road traffics, atmospheric deposits and chemicals used in agriculture (phosphate fertilisers, pesticides) and spread out into the environment (Adriano, 1986). Heavy metals are extremely persistent in the environment; they are non-biodegradable and nonthermodegradable and thus readily accumulate to toxic

*Corresponding author. E-mail: abderrazak_baba@yahoo.fr.
Tel: 00213775338361. Fax: 0021343264317.

Abbreviations: cm, Centimeter; m, meter; mm, millimeter; S1, soil 1; S2, soil 2; EC, electrical conductivity; W, water; V, bulk; °C, degree(s) Celsius; h, hours; ml, milliliter; mol L⁻¹, mole liter⁻¹; M, mole liter⁻¹; %, percentage; g, gram; No, numero; mS cm

levels (Sharma et al., 2007). Many soils especially those found in hazardous waste sites are frequently contaminated with heavy metals, including lead, copper, chromium, and cadmium. In addition, they may move also through soils to reach ground waters or may be taken up by plants. It is known that the transfer of metals to food chain is a recognised risk and in order to reduce it, the European Union (Commission of the European Communities, 2001) has established limits for contaminants in foodstuff that include metals such as Cd and Pb. Vegetables and particularly leafy ones accumulate high amounts of heavy metals (Parida et al., 2003; Clemente et al., 2007). Cadmium is a metal of great environmental concern (Perronnet et al., 2000). It is not essential for life; it is very mobile in soils and is readily absorbed and accumulated in the plants. Therefore, it may alter human health and grazing animals and functioning of ecosystems (Bitton, 1999). Lead is well known as a physiological and neurological toxin affecting many biochemical processes and almost every organ and system in the human body (Agency for Toxic Substances and Disease Registry: ATSDR, 1999). Actually, environmental risks are related to the bioavailability of the metals in the soils (Conder et al., 2001). Single and sequential extractions have been designed in order to predict either the retention/release of the metals in the soils, or their bioavailability (Tessier et al., 1979; Pérez-Cid et al., 1996; Kennedy et al., 1997; Pichtel and Anderson, 1997; Rauret et al., 2000; Sahuquillo et al., 2003). The objective of this study is to quantify and estimate the total concentration and the form/fraction of a specific metal in the two soils S1 and S2 located near the industrial site of a suburb of Hammam Boughrara city (2800° N latitude and 300°E longitude). This later is 50 Km far away from the Tlemcen's province (west Algeria). In addition, the total amount of the accumulated metals in the two plants: durum wheat and pepper growing in these soils have been evaluated. The results of the respective soils and vegetables have been compared to the established safe limits.

MATERIALS AND METHODS

Soil and plant samples

Soil samples

Surface soils (S1, S2) have been collected in triplicate from the horizon-cultivated soils (0 to 30 cm) at two sampling stations located in Hammam-Boughrara, Tlemcen (Algeria) and distant at 100 m from each other. The samples were air-dried, crushed, passed through 2 mm sieve and stored at ambient temperature. Afterwards, the soil properties and the concentrations of the heavy metals have been examined.

Vegetable samples

Plant samples (durum wheat, pepper and maize) have been also picked up in triplicate from the same field simultaneously. Replicate samples were washed using clean water and then separately oven dried at 80°C till constant weight was achieved. The samples were then crushed separately through a steel grinder and the crushed material was passed through 2 mm sieve.

Chemical characterization of the soils

Three replicates of each sample (S1, S2) have been analysed: Electrical conductivity (EC) has been measured in a suspension characterized by a residue/water ratio of 1:5 (w/v), after 1 h stirring and using the conductivity meter (Systronics, India). The pH was measured in water (1:2.5 w/v) using the pH meter (HM-50V, TOA DKK, Tokyo, Japan). The organic carbon has been determined using the Walkley and Black's method (Allison, 1986); Cation exchange capacity by cobaltihexamine chloride the Orsini and Remy's method (1976).

The total concentration of CaCO₃ was measured in an acidic medium by a Bernard calcimeter and the water-holding capacity has been determined gravimetrically, after draining the water saturated soil.

Metal analysis

The concentrations of Cd, Co, Cu, Ni, Pb and Zn in both soils (S1, S2) and plants (durum wheat and pepper) have been determined by using the atomic absorption spectrometry (Aurora Instruments Ltd-AI 1200).

Soils

Total metal concentrations: The concentrations of Cd, Co, Cu, Ni, Pb and Zn have been evaluated after digestion of the samples (S1, S2) with aqua regia according to ISO 11466 (1995) and as it has

been described Pueyo et al. (2003).the samples were digested with a mixture of HCl (37%) and HNO₃ (70%) in a ratio of 3:1 (v/v) first at room temperature for 16 h and then, at 130°C for 2 h under reflux conditions. Each suspension was then filtered, diluted to 100 ml with 0.5 mol L⁻¹ HNO₃ and stored at 4°C until analysis. Three independent replicates were performed for each sample and blanks were measured in parallel.

Metal speciation: The sequential extraction described previously by (Tessier et al., 1979) has been followed. This method is based on the partitioning of particular metal traces of samples with 8 mL magnesium chloride solution (1 mol L⁻¹, pH 7) in order to liberate exchangeable/acid-extractable metals (Step 1). Metals associated and bound to carbonates phases have been solubilised using 8 mL of 1M NaOAc adjusted to pH 5 with acetic acid (HOAc) (Step 2). The residue from step 2 has been extracted with 20 mL 0,04 M NH₂OH.HCl in 25% (v/v) HOAc in order to release the metals associated with the bound to Fe-Mn oxides phases (Step 3). The residue from step 3 has been added to 3 mL of 0,02 M HNO₃ and 5 mL of 30% H₂O₂ adjusted to pH 2 with HNO₃ to liberate the metals associated with the bound to organic matter phases (Step 4). Finally, the contaminants have been released by HF-HClO₄ mixture (Step 5). The extracts were analysed in order to assess the metal (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) concentrations. Analyses were performed on independent triplicates samples of the soils (S1 and S2) and blanks were measured in parallel for each set.

Plants

Durum wheat and pepper samples weighing approximately 10 g were carbonized on an electrothermal plate and ashed at 500°C in a furnace for 3 h. The 0.1 g of ash was digested with 2 mL of a mixture of concentrated HCl (37.5%) and, HNO₃ (65%) in 3:1 ratio at 80°C until a transparent solution was obtained (Allen et al., 1986).The solution was filtered through Whatman No. 42 filter paper and diluted to 50 mL with distilled water in order to estimate the amount of metals that can be transferred from the soil.

RESULTS AND DISCUSSION

Chemical characterization

Table 1 summarizes the obtained results and shows the different physico-chemical parameters of the two soils (S1, S2). S1 and S2 are basic and, the two matrices present low

Table 1. Chemical characterization of both soils considered in this study (mean ± S.D., n =3).

	S1	S2
pH	8,52 ± 0,2	8,67 ± 0.2
EC (mS cm-1)	0,21	0,21
Moisture (%)	6 ± 0.3	5.9 ± 0.4
Organic matter (%)	3.69 ± 0.8	3,8 ± 0.4
CEC	7	10,5
Total amont of Calcaire	38,51 ± 1	36,48 ± 2
Total C	2,14 ± 0.8	2,24 ± 0.6

Table 2. Contents of metal (mg Kg⁻¹ dry weight) in different soils considered in this study (Mean ± S.D., n = 3).

	Metal concentrations (mg Kg⁻¹ dry weight)	
	S1	S2
Cd ^(a, b)	3,81 ± 0,1	3,31 ± 0,1
Co ^(a, b)	3,02 ± 0,2	6,91 ± 1
Cu ^(a, b)	13,60 ± 0,2	8,85 ± 0,1
Ni ^(a, b)	26,62 ± 1	35,37 ± 1
Pb ^(a, b)	99,4 ± 3	129,4 ± 2
Zn ^(a, b)	1300,07 ± 4	1389 ± 29

Table 3: Results of the total concentrations of heavy metals in S1 and S2 after fractionation through the sequential extraction.

	Metal concentrations (mg Kg⁻¹ dry weight)	
	S1	S2
Cd	5,28	4,58
Co	3,88	5,9
Cu	16,15	10,65
Ni	31,77	37,32
Pb	90,83	86,3
Zn	1461,47	1359,7

percentages of organic matter and show a low value of EC.

Metal contents

Metal contents in soils

Total metal contents: Metal concentrations in S1 and S2 are given in Table 2. Index of soil contamination should be determined by its total metal concentrations. Limits have been fixed by EU rules (Directive 86 / 278 /EEC). They represent maximum permitted concentrations of metals in S2 where the total concentrations of Zn and Cd are quite above the established limits. On the other hand, according to the European Directive 2000, S1 and S2 being basic showed high content of Cd, Pb and Zn. These different values can indicate a contamination of agricultural soils. Consequently, this contamination could be aggravated if toxic metal are mobilises favouring plant uptake.

Metal speciation: To evaluate the environmental impact of these metals we should note that is not sufficient to determine their total content, since their behaviour in a given medium and capacity for mobilisation are equally important. These factors will depend on their chemical form in the soil. As a consequence, it is important to identify and quantify different species, forms or phases present in a soil. Sequential extraction schemes can be used to differentiate between short and term metal bioavailanility. Metal fractionation of Cd, Co, Cu, Ni, Pb and Zn was conducted by using the sequential extraction. The sequential steps for the extraction procedure assume that the following chemical forms of metals are recovered by each of the steps: exchange, carbonatebound, Fe/Mn oxide-bound, OM-bound and residual. The sum of the five fraction values are

given in Table 3. Relative distribution of metals as a percentage of the total metal (sum of all five fractions), are shown in Figure 1 S1 and 2 S2. Cadmium was extracted in large quantities during the fifth extraction step and the second extraction step carbonate-bound. This suggests that Cd in these samples is less bioavailable. However, it's important to notice that this is a problem to environment, where Cd content is high, considering the limit value of regulatory documents. Cu was mainly extracted through the fifth and fourth step. It is known that Cu forms specific complexes with organic matter, a fact that was also observed by other workers (Narwal et al, 1998). Soils show lower amount of Cu associated to exchange fraction, as a consequence Cu is less bio-available. For the two studied soils, Pb is mainly associated to the Fe-Mn oxide and residual fractions and to a lesser extends, bound to organic matter, showing lower values in the exchange fraction. This induces low bioavailability values, but a considerable tendency to become available. In the two tested soils, Zn is mainly in the residual and Fe-Mn oxide fractions showing lower values in the exchange fraction. This means that Zn has lower degree of mobility. In the case of S2, Ni is widely distributed among the bound to organic matter and residual fractions. In the two studied soils, Co is mainly associated to residual and Fe-Mn oxide fractions and, to a lesser extend, bound to organic matter, showing lower values in the exchange fraction.

Figure. 1

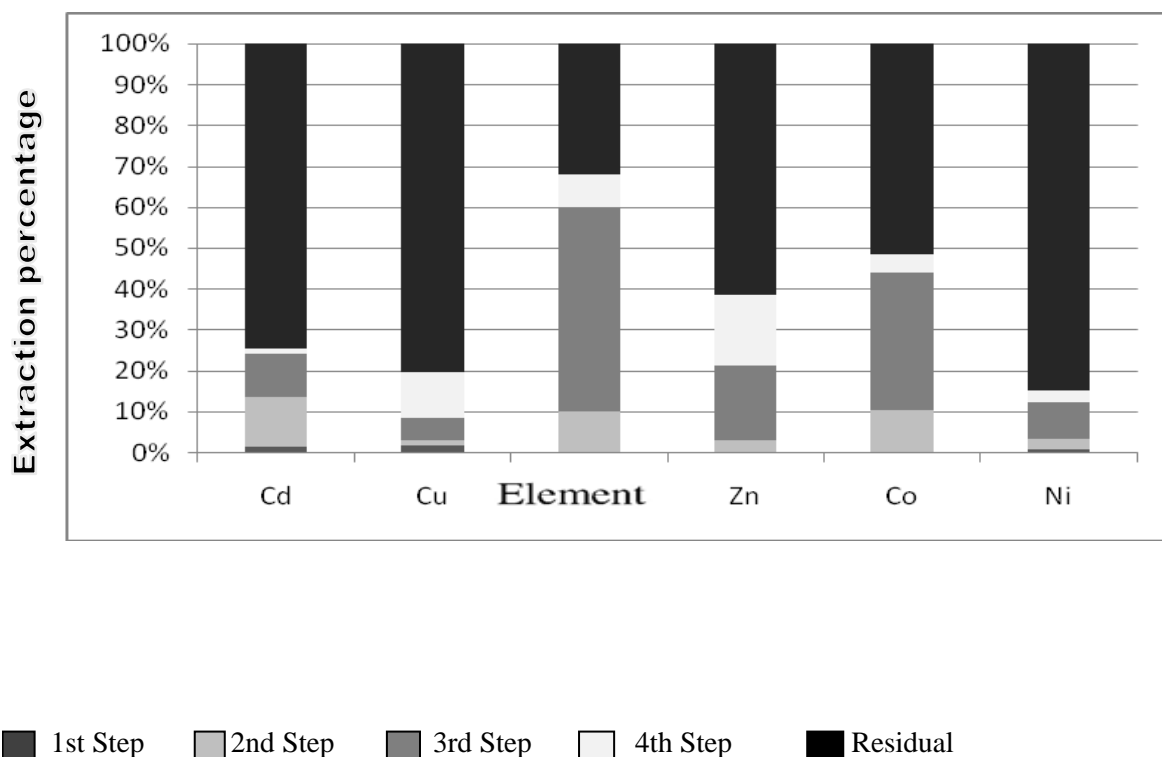
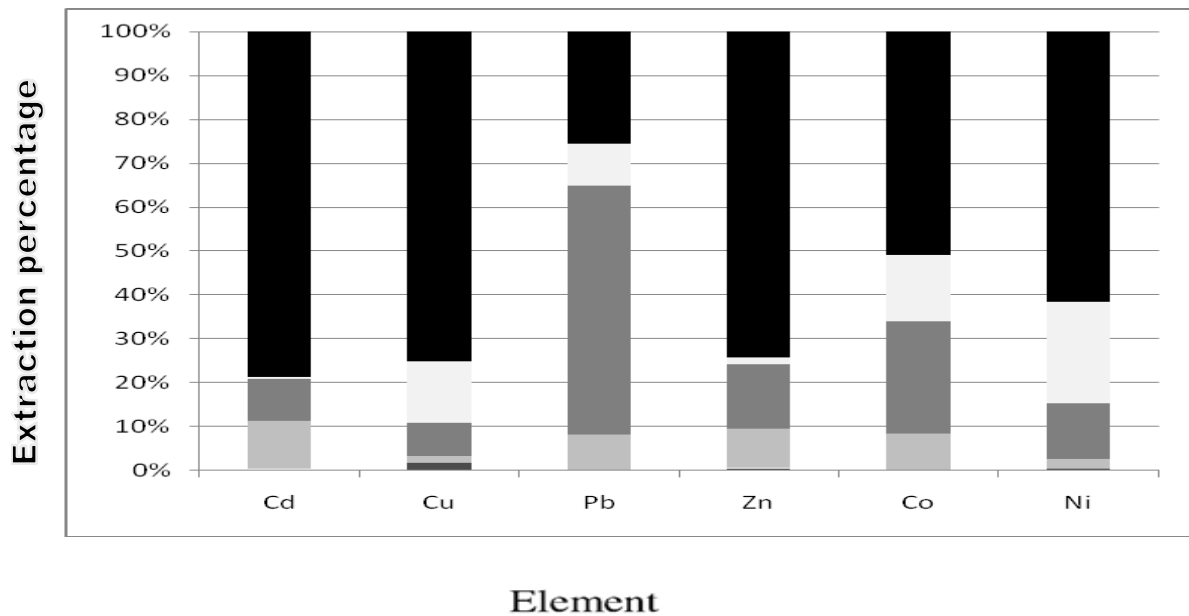


Figure 1. Metals as a percent of the total content after fractionation through the sequential extraction.

Figure. 2



■ 1st Step ■ 2nd Step ■ 3rd Step □ 4th Step ■ Residual

Figure 2. Metals as a percent of the total content after fractionation through the sequential extraction.

Metal content in the plants

The contents of Cd, Cu, Pb, Zn, Co and Ni in different parts of the plants (durum wheat and pepper) are shown in Table 4. The amount of all the elements varied with the different parts of plant. However, the concentrations of Cd, Cu, Pb, Ni and Zn were higher than those in the plants reported in the literature. The results from this investigation indicate that Cd accumulates primarily in stems and seeds and with much lower concentration in the roots, leaves and nodes of the durum wheat. It is found that the roots of pepper accumulated Cd

Table 4: Heavy metal concentrations (mg Kg⁻¹ dry weight) in different parts of plants (durum wheat and pepper)

Edible vegetable	<i>Durum wheat</i> L					Pepper			Normal Content In plant (mg/kg)	
	Different parts of the plant	Sheathes	Leaves	Nodes	Seeds	Roots	Roots	Stems		Leaves
Cd		3,58	0,31	0,21	3,10	1,58	2,54	1,61	0,63	0,05
Co		-	-	-	-	-	-	-	-	0,2
Cu		2,63	6,48	3,9	57,12	8,79	1,09	26,56	23,32	10
Ni		7,14	9,44	5,2	6,09	19,29	10,96	15,7	22,32	1,5
Pb		16,65	0,44	-	16,89	39,42	23,73	11,96	52,42	1
Zn		274,95	113,4	198,77	165,67	584,94	169,33	726,45	318,66	50

highest than the stems and leaves. These differences in sheath and seeds and other parts of the durum wheat and also in the root and stems of pepper uptake might be explained by the fact that one of the normal functions of stems and seeds of durum wheat and root of pepper is to selectively acquire ions from the soil solution, whereas the other parts of durum wheat and stems of pepper do not normally play this role (Salt et al., 1997). Costa and morel (1993, 1994) in their studies on lettuce and lupin confirmed that there was a metabolically active component in Cd uptake by roots (Jiang et al., 2001). Cu is mainly accumulated in stems of durum wheat and pepper. Pb and Ni accumulated in high quantities in roots and leaves of durum wheat and pepper. Zn is widely accumulated by nodes of durum wheat and stems of pepper.

Conclusion

Our investigation provides an indication of the impact of the metal contamination on the soil-plant. From the chemical analysis of the two soils examined in this work, we can conclude that S1 and S2 are contaminated since the total Cd, Pb and Zn concentrations exceed widely the limits established by Directive 86/278/EEC and European Directive. Using sequential methodology given by (Tessier et al., 1979). Our results show that these metals are mainly present in the residual fraction. This supports the assumption that Cd, Pb and Zn are less bioavailable in the examined soils. However, these results show that the durum wheat and pepper growing respectively in the soils S1 and S2 have ability to remove and accumulate strongly metals ions in their different parts of the plant.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to acknowledge the support provided for this study by the Laboratory of Inorganic Chemistry and Environment Of the University of Tlemcen-Algeria and factory Al Zinc of Ghazaouet – Algeria.

REFERENCES

- Adriano, D.C., (1986). Trace Elements in the Terrestrial Environment. Springer-Verlag, New York. 533pp.
- Allen, S.E., Grimshaw, H.M., Rowland, A.P., (1986). Chemical analysis. In: Moore, P.D., Chapman, S.B. (Eds.), Methods in Plant Ecology. Blackwell Scientific Publication, Oxford, London. pp: 285–344.
- Allison, L.E., (1986). Organic carbon. In: Klute, A. (Ed.), Methods of soil analysis. Part I. American Society of Agronomy, Madison, WI. pp: 1367–1381.
- Bitton, G. Wasterwater Microbiology., 2nd ed., wiley-Liss (1999); New York.

- Clemente, R., Paredes, C., Bernal, M.P., (2007). A field experiment investigating the effect of olive husk and cow manure on heavy metal availability in a contaminated calcareous soil from Murcia (Spain). *Agriculture Ecosystems and Environment*.118: 319-326.
- Conder JM, Lanno RP, Basta NT., (2001). Assessment of metal availability in smelter soil using earthworms and chemical extractions. *J Environ Qual*.30:1231–7.
- Costa, G., Morel, J.L., (1993). Cadmium uptake by *Lupinus albus* (L.): cadmium excretion, a possible mechanism of cadmium tolerance. *J. Plant Nutr*.16: 1021-1029.
- Costa, G., Morel, J.L., (1994). Efficiency of H⁺-ATPase activity on cadmium uptake four cultivars of lettuce. *J. Plant Nutr*.17: 627-637.
- Jiang, W., Liu, D., Hou, W., (2001). Hyperaccumulation of cadmium by roots, bulbs and shoots of garlic (*Allium sativum* L.). *Bioresource Technology*.76: 9-13.
- Kennedy VH, Sanchez AL, Oughton DH, Rowland AP., (1997). Use of single and sequential chemical extractants to assess radionuclide and heavy metals availability from soils to root uptake. *Analyst*.122:89R–100R.
- Narwal RP, Singh BR., (1998). Effects of organic materials on partitioning, extractability and plant uptake of metals in an alum shale soil. *Water Air Soil Pollu* 103: 405-21.
- Orsini L, Remy J.C., (1976). Using chloride cobaltihexamine for the simultaneous determination of exchange capacity and exchangeable bases of soils science, *Bull. AFES*, 4: 269-279.
- Parida, B.K., Chhibba, I.M., Nayyar, V.K., (2003). Influence of nickel-contaminated soils on fenugreek (*Trigonella cornicula* L.) growth and mineral composition. *Sci. Hortic*.98: 113-119.
- Pérez-Cid B, Lavilla I, Bendicho C., (1996). Analytical assessment of two sequential extraction schemes for metal partitioning in sewage sludges. *Analyst*.121:1479–84.
- Perronnet, K., Schawartz, C., Gerard, E. and Morel, J.L., (2000). Availability of cadmium and zinc accumulated in leaves of *Thlaspi caerulescens* incorporated into soil. *Plant and soil*.227: 257-263.
- Pichtel J, Anderson M., (1997). Trace metal bioavailability in municipal solid waste and sewage sludge composts. *Bioresour Technol*.60:223–9.
- Pueyo M, Sastre J, Hernández E, Vidal M, López-Sánchez JF, Rauret G., (2003). Prediction of trace element mobility in contaminated soils by sequential extraction. *J Environ Qual*.32:2054–66.
- Rauret G, López-Sánchez J-F, Sahuquillo A, Barahona E, Lachica M, Ure AM, et al., (2000). Application of a modified BCR sequential extraction (three-step) procedure for the determination of extractable trace metal contents in a sewage sludge amended soil reference material (CRM 483), complemented by a three-year study of acetic acid and EDTA extractable metal content. *J Environ Monit*.2:228–33.
- Sahuquillo A, Rigol A, Rauret G., (2003). Overview of the use of leaching/extraction tests for risk assessment of trace metals in contaminated soils and sediments. *Trends Anal Chem*.22 (3):152–9.
- Salt, D.E., Pickeling, I.J., Prince, R.C., Gleba, D., Dushenkov, S., Smith, R. D., Paskin, I., (1997). Metal accumulation by aquacultured seedlings of Indian mustard. *Environ. Sci. Technol*.31: 1636-1644.
- Sharma, R.K., Agrawal, M., Marshall, F., (2007). Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.66: 258-266.
- Tessier A, Campbell PGC, Bisson M., (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal Chem*.51 (7):844–51.

RESUME

Résumé

L'objectif de cette étude a consisté à une évaluation des atteintes aux sols à vocation agricole et à végétation naturelle dues à l'irrigation par les eaux chargés en métaux lourds, en provenance du barrage de Hammam Boughrara, de l'oued Tafna et des eaux usées des égouts et ainsi des rejets atmosphériques provenant des axes routiers de la ville de Hammam Boughrara situé à 50km de la ville de Tlemcen aux cours des différents saisons de l'année 2006 à 2010.

Les extractions pratiquées sur les sols ont montrés des teneurs totales supérieures aux normes limites, générant ainsi une contamination par le zinc, beaucoup moins par le cobalt, le nickel, du cadmium, du plomb et enfin par le cuivre des trois sols.

Quant aux végétaux cultivés, l'étude indique un risque potentiel écologique du blé dur, du poivron et du maïs contaminée particulièrement par le Zn et le Cr dans le blé dur, le poivron et le maïs, par le Fe uniquement dans le poivron, dans une moins mesure par le Cd, le Pb et Cu dans les trois plantes et par le Ni pour le blé dur et le poivron, provoquant ainsi des risques potentiels pour la santé, par contre le manganèse présente des carences dans les sols S1, S2 et S3 et dans les parties aériennes spécialement du blé dur, du maïs et beaucoup moins du poivron.

Mots clés: blé dur, poivron, maïs, métaux lourds, sol, contamination, extraction séquentielle.

summary

The objective of this study was to assess damage to agricultural soils and natural vegetation due to irrigation water laden with heavy metals, from the dam Boughrara Hammam, Wadi Tafna and sewage and wastewater and air emissions from roads in the town of Hammam Boughrara located 50km from the city of Tlemcen in different seasons during the year 2006 to 2010.

Extractions performed on soils have shown the total contents exceed the standards limits, there by generating a zinc contamination, much less by cobalt, nickel, cadmium, lead and finally by copper in soils. As for plants, the study indicates a potential ecological durum wheat, peppers and corn contaminated by particularly Zn and Cr in durum wheat, peppers and corn, by Fe only in the pepper, in a less extent by Cd, Pb and Cu in the three plants and Ni in durum wheat and peppers, causing potential risks to health. For against the present manganese deficiency in soils and especially in the shoots of durum wheat, corn and much less pepper.

Keywords: durum wheat, pepper, corn, heavy metals, soil contamination, sequential extraction

ملخص

الهدف من هذه الدراسة لتقييم الأضرار التي لحقت التربة الزراعية والنباتات الطبيعية نتيجة لمياه الري لادن مع المعادن الثقيلة، من سد حمام بوغرارة، وادي ثافنة، مياه الصرف الصحي وانبعثات الهواء من الطرق في بلدة حمام بوغرارة تقع 50 كلم من مدينة تلمسان، في المواسم المختلفة خلال العام 2006 الى 2010. وقد أظهرت عمليات الاستخراج التي أجريت على التربة مقادير تتجاوز حدود المعايير، مما يولد تلوث الزنك وأقل بكثير، Co, Ni, Cd وأخيرا النحاس من قبل S3, S1, S2. أما بالنسبة للنباتات، تبين الدراسة إلى احتمال الإيكولوجي القمح القاسي، الفلفل والذرة الملوثة من طرف الزنك، الكروم وخاصة في القمح القاسي، الفلفل والذرة والحديد من فقط في فلفل، في أقل قدر من الكاديوم، الرصاص والنحاس في تربة الثلاثة والنيكل بالنسبة للقمح القاسي والفلفل، مما تسبب في المخاطر المحتملة على الصحة، لمكافحة نقص والمغنيز الموجودة في التربة S1, S2, S3 وخاصة في يطلق النار من القمح القاسي، والذرة والفلفل أقل من ذلك بكثير.

كلمات البحث: القمح القاسي، والفلفل، والذرة، والمعادن الثقيلة، وتلوث التربة، واستخراج متتابعة