

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



**UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID -TLEMCEN-**

**Faculté des sciences**

**Département de chimie**

Laboratoire de Chimie Inorganique et Environnement (LCIE)



# THÈSE

Présentée pour l'obtention du  
**GRADE DE DOCTEUR EN SCIENCES**

Par  
**Kebir Tahar**

**Discipline : Chimie**  
**Spécialité : Chimie de l'Environnement**

## **Thème :**

**ÉTUDE DE CONTAMINATION, D'ACCUMULATION ET DE MOBILITE DE  
QUELQUES METAUX LOURDS DANS DES LEGUMES, DES FRUITS ET DES SOLS  
AGRICOLAS SITUES PRES D'UNE DECHARGE INDUSTRIELLE DE L'USINE ALZINC  
DE LA VILLE DE GHAZAOUET.**

**Devant le jury composé de :**

**Président :**

Mr TABTI Boufeldja

**Professeur à l'Université de Tlemcen**

**Examineurs :**

Mme DJAFRI Fatiha

**Professeur à l'Université d'ES-Senia - Oran**

Mme MOKHTARI Malika

**Professeur à l'Université de Tlemcen**

Mr BENALI Omar

**Maître de conférence «A » à l'université de Saida**

Mme LOUHIBI Samira

**Maître de conférence « A » à l'université de Tlemcen**

**Encadreur :**

Mme BOUHADJERA Keltoum

**Maître de conférence « A » à l'université de Tlemcen**

**Année universitaire 2011-2012**

## Remerciements

Avant tout, je dois remercier ALLAH qui m'a donné l'envie et la force pour mener à terme ce travail.

Ce travail a été mené au sein de l'Université de Tlemcen, au Laboratoire de Chimie Inorganique et Environnement (LCIE) sous la direction de Mme **BOUHADJERA KELTOUM**, Maître de conférences à l'université de Tlemcen à qui j'adresse ici ma profonde gratitude et mes sincères remerciements pour les conseils éclairés et les encouragements qu'elle n'a cessés de me prodiguer tout au long de ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Mr **TABTI BOUFELDJA**, Professeur à l'université de Tlemcen et Doyen de la faculté des sciences, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Mme **DJAFRI FATIHA**, Professeur à l'Université Es-Senia Oran, pour avoir accepté de faire partie de ce jury.

Je remercie vivement Mme **MOKHTARI MALIKA**, Professeur à l'université de Tlemcen et d'avoir accepté de participer à ce jury.

Je remercie aussi chaleureusement Mr **BENALI OMAR**, Maître de Conférences à l'université Moulay Tahar de Saida et Mme **LOUHIBI SAMIRA**, Maître de conférences à l'université de Tlemcen d'avoir accepté de participer à ce jury.

Mes remerciements vont aux personnels du Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman (**LASIR**) de l'Université des Sciences et Technologie de Lille (France) et précisément Mr **OUDDANE BAGHDAD** pour m'avoir fait les analyses des métaux par spectroscopie d'émission atomique par plasma à couplage inductif.

Enfin, merci aussi à tous mes collègues et mes amis de laboratoire qui se reconnaîtront ici, je leurs exprime également ma profonde sympathie et je leur souhaite beaucoup de réussite.

## Dédicace

---

*Après de longues années ce modeste manuscrit voit enfin le jour. Je le dédie à l'âme de madame le professeur Yacouta-Nour Aicha, et à deux personnes qui m'ont très chers ; ma mère et mon père qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de m'encourager. Enfin je le dédie à toute la famille Kebir, et que ce manuscrit soit utile pour tous ceux qui en auront besoin.*

---

# **SOMMAIRE**

---

## Sommaire

---

Liste des abréviations .....	.
Glossaire de quelques termes utilisés dans la Thèse.....	.
<b>Introduction générale.....</b>	<b>-1-</b>
<b><u>CHAPITRE I. Synthèse bibliographique.....</u></b>	<b>- 4-</b>
<b>I.1. L'ETAT D'ENVIRONNEMENT EN ALGERIE.....</b>	<b>- 4-</b>
I.1.1. Pollution par les déchets ménagers.....	- 4 -
I.1.2. Pollution industrielle.....	- 5 -
I.1.3. Contamination des ressource en eau.....	- 6 -
I.1.4. Contamination du sol.....	-7 -
I.1.5. Impact sur la santé.....	-8 -
<b>I.2. SYNTHÈSE ET CONNAISSANCE ACTUELLE SUR LES MÉTAUX LOURDS.....</b>	<b>-9 -</b>
<b>I.2.1. Le sol.....</b>	<b>-9 -</b>
I.2.1.1. Description.....	-9 -
I.2.1.2. Structure .....	-10 -
<b>I.2.2. Métaux lourdes.....</b>	<b>-11 -</b>
I.2.2.1. Définition.....	-11 -
I.2.2.2. Origine des métaux présents dans le sol.....	-12 -
i. Origine naturelle .....	-13 -
ii. Origine anthropique .....	-13 -
I.2.2.3. Distribution des ETM dans les constituants des sols .....	-14 -
i. Phyllosilicates .....	-14 -
ii. Oxy-hydroxydes de fer et manganèse .....	-14 -
iii. Les carbonates et les phosphates .....	-14 -
iv. Les matières organiques .....	-15 -
I.2.2.4. Mobilité et biodisponibilité des métaux lourds .....	-17 -
i. La teneur en argile .....	-18 -
ii. Le pH.....	-18 -
ii. Le potentiel redox (Eh) .....	-18 -
iii. L'activité biologique .....	-18 -
I.2.2.5. Les métaux lourds : nature, toxicité et caractéristiques générales .....	-19 -
i. Le plomb.....	-19 -
ii. Le zinc .....	-21 -
iii. Le cadmium .....	-23 -
iv. Le cuivre. ....	-25 -
v. Le nickel .....	-27 -
vi. Le chrome.....	-29 -
vii. L'arsenic .....	-30 -
<b>I.2.3. Place spécifique des métaux dans l'économie mondiale.....</b>	<b>-34 -</b>
<b><u>CHAPITRE II. Contexte expérimental et méthodes analytiques.....</u></b>	<b>-36-</b>
<b>II.1. TRAVAIL AU CHAMP.....</b>	<b>-37 -</b>

<b>II.1.1. Description de la zone industrielle d'ALZINC.....</b>	<b>- 37-</b>
II.1.1.1.Localité.....	- 37-
II.1.1.2. Historique .....	- 37-
<b>II.1.2. Matériaux étudiés.....</b>	<b>- 39-</b>
II.1.2.1. Origine des échantillons .....	- 39-
II.1.2.2. Sol .....	- 41-
i. Prélèvement .....	- 41-
ii. Transport .....	- 41-
<b>II.2. MATÉRIEL ANALYTIQUE (TRAVAIL AU LABORATOIRE).....</b>	<b>- 41-</b>
<b>II.2.1.Protocoles analytiques.....</b>	<b>- 41-</b>
<b>II.2.2. Caractérisations physico-chimiques.....</b>	<b>- 42-</b>
II.2.2.1.Préparations des échantillons avant l'analyse, norme AFNOR NF X 31-427 .....	- 42-
II.2.2.2. Détermination de l'humidité résiduelle, norme AFNOR NF X 31-102 (1992).....	- 43-
II.2.2.3.Analyse granulométrique des sols, norme AFNOR NF X31-107 .....	- 43-
i.Granulométrie par tamisage, norme AFNOR NF X31-101 .....	- 43-
ii.Granulométrie par sédimentation, norme AFNOR NF X31-107 (1983) .....	- 45-
II.2.2.4. Détermination du pH, norme AFNOR NF X31-103 (1992) .....	- 47-
II.2.2.5. Détermination de la quantité de bleu méthylène (VBS), norme NF P 18-592 (1990) .....	- 49-
II.2.2.6. Détermination de la teneur du carbonate, norme AFNOR NF P94-048 (1996) .....	- 52-
II.2.2.7. Détermination de la matière organique (MO), norme NF ISO 10694 .....	- 54-
II.2.2.8. Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC), norme AFNOR NF X 31-130 (1993).....	- 55-
II.2.2.9.Teneurs totales en éléments majeurs et ETM.....	- 57-
i. Pour les sols, norme AFNOR NF X31-151 (1993) ou/ NF ISO 11466 .....	- 57-
ii. Pour les végétaux .....	- 59-
II.2.2.10.Extraction sequentielle.....	- 60-
<b>II.2.3. Détermination quantitative de la fraction mobilisable et mobilité des éléments par l'EDTA.....</b>	<b>- 64-</b>
<b>II.3. ANALYSE INSTRUMENTAL DES ELEMENTS METALLIQUES DANS LES SOLS ET LES VÉGÉTAUX.....</b>	<b>-65-</b>
<b>II.3.1. Spectroscopie d'émission atomique par plasma à couplage inductif [ICP-AES].....</b>	<b>- 65 -</b>
<b>CHAPITRE III. Résultats et discussions.....</b>	<b>-69-</b>
<b>III.1. LE SOL .....</b>	<b>-69-</b>
<b>III.1.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SOLS AGRICOLES ETUDIES .....</b>	<b>- 69 -</b>
III.1.1.1.Tamisage .....	- 69 -
III.1.1.2. Sédimentation.....	- 92-
i. Profondeur 0-20cm .....	- 89-
ii. Profondeur 20-40cm .....	- 92-
<b>III.1.2. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS AGRICOLES ETUDIES.....</b>	<b>- 95-</b>
III.1.2.1. Le pH .....	- 100-
III.1.2.2. Teneur en carbonates CaCO <sub>3</sub> .....	- 100-
III.1.2.3. Matière organique (MO en %) .....	- 101-
III.1.2.4. Capacité d'échange cationique (CEC).....	- 101-
III.1.2.5. L'humidité résiduelle (H en %) .....	- 102-
III.1.2.6. Valeur en bleu méthylène (VBS), exprimé en cm <sup>3</sup> /g .....	- 102-
<b>III.1.3.TENEUR INITIAL EN ELEMENTS MAJEURS ET METAUX LOURDS (ETM) DANS LES SOLS .....</b>	<b>-102 -</b>
III.1.3.1. Extraction totale par l'eau régale .....	-103 -
i. Eléments majeurs (EM).....	-113 -
ii Eléments Traces métalliques (ETM).....	-112 -

ii.1. Pour le plomb .....	-121 -
ii.2. Pour le cadmium .....	-121 -
ii.3. Pour le cuivre .....	-122 -
ii.4. Pour le zinc .....	-122 -
ii.5. pour le nickel .....	-123 -
ii.6. Pour le manganèse.....	-123 -
ii.7. Pour le cobalt .....	-124 -
ii.8. Pour le chrome .....	-124 -
ii.9. Pour l'arsenic .....	-124 -
iii. Distribution annuelle des éléments métalliques dans les sols F, K et R. ....	-125 -
iii.1. Eléments majeurs (EM).....	-125 -
iii.2. Eléments traces métalliques (ETM) .....	-126 -
III.1.3.2. Répartition géochimique des métaux majeurs et éléments traces métalliques (ETM) dans les sols vagricoles étudiés (Extraction séquentielle) .....	-128-
<b>III.1.4. EXTRACTION PAR L'EDTA, FRACTION MOBILISABLE .....</b>	<b>-166 -</b>
<b>III.2. DANS LES PLANTES VEGETALES ETUDIEES .....</b>	<b>-185-</b>
<b>III.2.1.Variation annuelle en éléments majeures dans les différents organes des plantes étudiées.....</b>	<b>-207-</b>
III.2.1.1. Pour le calcium.....	-207-
III.2.1.2. Pour le potassium .....	-207-
III.2.1.3. Pour le magnésium .....	-208-
III.2.1.4. Pour le sodium.....	-208-
III.2.1.5. Pour le fer.....	-208-
<b>III.2.2.Variation en éléments trace métalliques dans les différents organes des plantes.....</b>	<b>-208-</b>
III.2.2.1.Variation des teneurs des métaux en 2006.....	-208-
i. Pour le plomb.....	-208-
ii. Ppour le cadmium .....	-208-
iii. Pour le cuivre .....	-209-
iv. Pour le zinc .....	-209-
v. Pour le nickel .....	- 209-
vi. Pour le manganèse .....	-209-
vii. Pour le cobalt .....	-209-
viii. Pour le chrome .....	-210-
ix. Pour l'arsenic .....	-210-
III.2.2.2.Evolution métallique et toxicité en élément traces métallique (ETM).....	-210-
<b>III.2.3. Distribution annuelle des éléments métalliques au sein du poivron, d'artichaut et du raisin. ....</b>	<b>-216-</b>
III.2.4. Evaluation de l'accumulation et de la contamination des plantes par les métaux .....	- 217-
III.2.4.1. Pour le plomb, le cuivre et le zinc .....	- 221-
III.2.4.2. Pour le cadmium.....	- 221-
III.2.4.3. Pour le nickel, le manganèse et le chrome .....	- 221-
III.2.4.4. Pour le cobalt et l'arsenic.....	- 222-
<b>III.2.5. Dynamique des ETM au besoin des plantes.....</b>	<b>- 222-</b>
<b>Conclusion Générale et Perspectives.....</b>	<b>-223-</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>-227-</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>-234-</b>
<b>Publication.....</b>	<b>.....</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>.....</b>

## Liste des abréviations

---

- OMS:** Organisation Mondiale de la Santé (World Health Organization).
- ISO:** International Society Organisation.
- PAM:** Programme d'Action stratégique en Méditerranée.
- ATP:** Adénosine Triphosphate.
- Ha:** Hectares.
- ICP-AES:** Spectrométrie d'Emission Atomique par Plasma à Couplage Inductif / Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy.
- CAH:** Complexes Argilo - Humiques.
- AFNOR:** Association Française de Normalisation.
- HAP:** Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.
- PTM:** Programme de Tests et Mesures.
- EM:** Eléments Majeurs.
- ETM:** Eléments Traces Métalliques.
- MS:** Matière Sèche.
- ANRH:** Agence Nationale de Recherche Hydraulique.
- HAP:** Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.
- PCB:** PolyChloroBiphényl.
- PCT:** PolyChloroTriphényl.
- T:** Tonne.
- V:** Volume.
- Min:** Minimum.
- Max:** Maximum.
- H:** Humidité résiduelle.
- µm:** Micromètre.
- Eh:** Potentiel redox.
- CEC:** Capacité d'Echange Cationique.
- ppm:** Partie par million.
- DJA:** Dose Journalière Admissible.
- EDTA:** Acide Ethylène Diamine Tétra acétique.
- DTPA:** Acide Diéthylène Triamine Penta acétique.
- LD:** Limite de Détection.
- λ:** Longueur d'onde.
- LQ:** Limite de Quantification.
- ET:** Extraction Totale.
- MATE:** Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.
- USCS:** Unified Soil Classification System.
- LPC:** Laboratoires des Ponts et Chaussées.
- NF:** Norme Français.
- Ps:** Poids sec.
- Sol F:** Sol de la parcelle du poivron.
- Sol K:** Sol de la parcelle d'artichaut.
- Sol R:** Sol de la parcelle du raisin.



## GLOSSAIRE DES TERMES UTILISÉS DANS LA THÈSE

**ANAEROBIES:** se dit de l'ensemble des réactions chimiques d'un organisme se produisant en l'absence d'oxygène.

**BIOACCUMULATION:** processus d'accumulation d'une substance dans tout ou partie d'un organisme vivant, via la chaîne alimentaire ou un écosystème. Processus d'échange entre un être vivant et son milieu, entraînant des concentrations plus élevées à l'intérieur de cet organisme que dans son environnement ou sa nourriture.

**CHIMIOLITHOTROPHE:** qualifie une bactérie oxydant les éléments minéraux et se servant du bioxyde de carbone comme aliment carboné.

**CUPRITE:** la cuprite est une espèce minérale composée d'oxyde cuivreux de formule  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

**DOSE JOURNALIÈRE ADMISSIBLE (DJA):** quantité de substance chimique que peut ingérer un homme ou un animal, par jour, au cours de leur vie, sans aucun risque appréciable pour leur santé. Valeurs établies pour les additifs alimentaires et les résidus de pesticides dont la présence dans les aliments répond à des besoins techniques ou qui sont nécessaires pour la protection des plantes (OMS).

**ÉCHANTILLONNAGE:** action qui consiste à prélever une partie considérée comme représentative d'un milieu en vue de l'examen de diverses caractéristiques définies.

**ÉCOTOXICITÉ:** capacité d'une substance, du fait de sa toxicité, de produire des effets nuisibles ou incommodants pour des micro-organismes, des animaux, des plantes, ou pour l'homme par le biais de l'environnement.

**ÉCOTOXICOLOGIE:** science qui étudie l'impact des substances chimiques sur les écosystèmes. Elle prend en compte d'une part le devenir des substances dans l'environnement (phénomènes de dégradation biotique et abiotique) et d'autre part les effets toxiques ou l'écotoxicité des substances, et les mécanismes par lesquels s'effectue la pollution de la biosphère.

**EFFLUENT:** liquide, traité ou non, qui provient d'ouvrages urbains, d'installations individuelles (fosses septiques), d'une activité industrielle ou agricole, et qui est rejeté dans l'environnement.

**ERUPTIVE:** relative aux éruptions volcaniques, qui provient du refroidissement du magma volcanique (des roches éruptives)

**FELDSPATH:** est un minéral à base de silicate double d'aluminium, de potassium, de sodium ou de calcium. Les feldspaths sont de la famille des tectosilicates. Il existe de nombreux feldspaths, dont les principaux sont l'orthoclase (potassique), l'albite (sodique) et l'anorthite (calcique).

## GLOSSAIRE DES TERMES UTILISÉS DANS LA THÈSE

**FERROMAGNESIEN:** qualifie un corps ou un aliment riche en fer et en magnésium.

**FOND GÉOCHIMIQUE NATUREL:** concentration naturelle en un élément, en un composé ou en une substance dans un milieu donné, en l'absence de tout apport extérieur spécifique, tel que l'activité humaine.

**GEOGENE:** issu du globe terrestre

**GRANULOMÉTRIE:** répartition des minéraux par catégorie de grosseur (diamètre).

**HISTOSOL:** sol très riche en matières organiques.

**IGNE:** qui est produit par l'action du feu.

**LES ROCHES ULTRAMAFIQUES** (roches ultrabasiques): sont des roches magmatiques et méta-magmatiques très pauvres en silice, moins de 45 % poids (caractère basique), et contenant plus de 90 % de minéraux riches en fer et magnésium (caractère mafique : Mg et Fe) : généralement plus de 18 % d'oxyde de magnésium, un taux d'oxyde de fer élevé, peu de potassium.

**LIMITE DE DETECTION (MÉTHODE):** plus basse concentration d'un élément ou d'une substance décelable pour une méthode et une matrice données.

**LIMITE DE QUANTIFICATION:** concentration au-dessus de laquelle dans une matrice définie, une mesure quantitative peut être réalisée par une méthode donnée, avec un niveau de confiance spécifié.

**MAFIQUE:** qualifie une roche magmatique ou un minéral contenant du fer et du magnésium

**MAGNETITE:** en minéralogie c'est une espèce minérale composée d'oxyde de fer ferrimagnétique de formule  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_4$ .

**NORME:** spécification technique approuvée par un organisme reconnu à activité normative, pour application rationnelle, répétée ou continue, sur la base des techniques opérationnelles du moment, mais dont l'observation n'est pas obligatoire.

**PEDOLOGIE:** étude scientifique des sols.

**PERIDOT:** pierre constituée de silicate de magnésium et de fer dont la variété la plus répandue est l'olivine.

**PNICTOGENE:** en chimie c'est la famille d'éléments chimiques, correspondant à la quinzième colonne du tableau périodique des éléments.

**PODZOLS:** sol acide (pH inférieur à 5) des régions tempérées froides, Il accumule la matière organique et l'aluminium.

**PYROXENE:** en minéralogie c'est silicate entrant dans la composition des roches volcaniques.

## GLOSSAIRE DES TERMES UTILISÉS DANS LA THÈSE

**ROCHES ERUPTIVES:** roches volcaniques.

**ROCHE MAGMATIQUE:** roche issue de la solidification de magmas.

**ROCHE GRANITIQUE:** de la nature du granite, roche plutonique composée de quartz, de mica et de feldspath cristallisés sous forme de grains visibles à l'œil.

**SEDIMENTAIRE:** qui résulte d'une sédimentation, ensemble des phénomènes d'érosion et de dépôt qui conduisent à la formation des sédiments.

**SILICATE:** combinaison de silice et d'oxydes métalliques variés /Famille de minéraux caractérisés par le motif élémentaire tétraédrique  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ .

**SPÉCIATION:** définition de la forme chimique ou de la phase porteuse, dans laquelle se trouve un élément (forme ionique, structure moléculaire, association physique, support minéral ou organique).

**SUPERGENE :** en géologie des gisements de minerais.

---

# Introduction Générale

---



### Introduction générale

Dans le contexte actuel de l'agriculture mondiale (concurrence exacerbée, exigences croissantes des consommateurs, principe de précaution), la qualité des produits agro-alimentaires prend de plus en plus d'importance, notamment en ce qui concerne les productions légumières. Cependant, ce type de développement soumet les sols à différentes formes de dégradation et de pollution, le plus souvent irréversibles tels que l'épandage de déchets agricoles, industriels, urbains, sur des surfaces de plus en plus grandes; l'intensification de l'agriculture avec la volonté d'augmenter de plus en plus artificiellement la productivité et la mise en culture de nouvelles surfaces, dans de mauvaises conditions, sans tenir compte des potentialités et des fragilités des sols. Par ailleurs, d'autres déchets de toutes natures sont également susceptibles d'être épandus sur les sols cultivés ou bien l'ont été dans le passé. Parmi les substances indésirables contenues dans ces divers déchets, figurent les " éléments traces métalliques " (ETM) souvent appelés également " métaux lourds ". Ainsi, il est intéressant de pouvoir reconnaître si un sol cultivé est indemne de contamination ou, au contraire, s'il a gardé la trace d'apports de métaux potentiellement dangereux et de bien distinguer la part de ce qui est naturel et de ce qui est contamination d'origine humaine. Malgré des flux et des concentrations plutôt faibles, le cadmium (Cd) est en tête de la liste des métaux potentiellement toxiques. Doivent aussi être surveillés dans tous les compartiments de notre environnement : le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le mercure (Hg), l'arsenic (As) et, dans une moindre mesure, le chrome (Cr), le nickel (Ni), le sélénium (Se), le thallium (Tl)... .

A l'heure actuelle, il y a une conjonction de facteurs imputables essentiellement à l'explosion démographique, à l'urbanisation anarchique ainsi qu'aux effets pervers d'une industrialisation accélérée qui a rarement pris en compte la donnée environnementale.

Le thème de l'environnement commence à prendre une importance en 1992 lors de la conférence des Nations Unies pour l'environnement et qui a donné lieu aux cours des dernières années à une évolution des attitudes et de la réflexion, et les différents débats ont dégagé un

consensus sur la nécessité d'intégrer à la croissance économique la protection de l'environnement, sur la base d'un concept nouveau «le développement durable ».

En Algérie, la situation en matière de dégradation de l'environnement constitue des menaces tangibles contre les ressources naturelles et la santé publique.

Depuis l'indépendance, l'Algérie a investi considérablement dans les différents secteurs économiques. Malheureusement, ces derniers ne bénéficièrent d'aucune stratégie qui permette la création d'un harmonieux équilibre avec la nature. L'essor industriel qui a amélioré le mode de consommation et l'augmentation exponentielle de la population, sont parmi les facteurs qui ont amplifié la crise environnementale. Ceci a contribué, d'une part à surexploiter les ressources naturelles, et d'autre part à une augmentation substantielle des déchets, qui a été estimée à 5.2 millions de tonnes par an. <sup>1,2</sup>

En effet, l'Algérie produit plus de 325,100 tonnes de déchets industriels spéciaux par an et plus de deux millions de tonnes de ces déchets sont stockés, <sup>2</sup> dont les hydrocarbures représentent 34%. Les régions de l'est détiennent la palme en matière de pollution en Algérie. 45% du total national des déchets spéciaux, soit 145,000 tonnes/an, sont produits dans ces régions, dont le stock est estimé aujourd'hui à 1,100,800 tonnes, ce qui représente 55% des déchets en stock au niveau national. La région ouest arrive en deuxième position avec 521,800 tonnes de déchets en stock, soit 26% du total national. "La zone d'Arzew - Oran est la plus forte génératrice de déchets avec 65,760 tonnes/an, suivie juste après par l'usine d'Alzinc - Ghazaouet - Tlemcen avec 18,500 t/an".

Toutefois, au niveau de la plupart de ces zones, il a été constaté une dégradation environnementale due en particulier à l'absence totale de gestion des déchets solides industriels. La pollution des sites et des sols notamment par les métaux lourds représente un risque important pour la santé publique en raison des pathologies variées que peuvent engendrer ces éléments. Les sols sont un vecteur important du transfert des métaux de l'environnement vers l'organisme vivant. Pour cette raison, il est essentiel de disposer de moyens de mesure de la teneur en métaux lourds dans les sols. Pour cela on se propose dans ce travail, d'évaluer, en se référant aux valeurs indicatives prises en considération, le risque (présumé ou avéré) de contamination ou de pollution métallique des sols. De mieux comprendre la sensibilité des sols aux dépôts des polluants métalliques d'origine atmosphérique. De prédire si ces sols joueront-ils un rôle d'immobilisation des éléments traces ou transféreront-ils ces éléments vers les végétaux et les animaux

(biodisponibilité) donc vers l'homme. De mettre en évidence le rôle de la végétation dans l'interception, la distribution et l'accumulation des métaux lourds.

Ainsi, l'objectif principal de cette thèse est de déterminer le taux d'accumulation des métaux lourds dans certains végétaux cultivés dans des parcelles agricoles situés près de la décharge industrielle de l'usine d'ALZINC – Ghazaouet – Tlemcen et qui sont aussi exposés aux rejets des déchets (solides et liquides) domestiques. Ces plantes alimentaires (raisin, poivron et artichaut) sont très consommées par les habitants de la ville de Ghazaouet. Selon la littérature, des études ont montré que le golfe littoral de Ghazaouet est très contaminé et pollué en Cd, Zn et Pb, <sup>2</sup> mais aucune étude n'a été réalisée pour quantifier la teneur et l'impact de la pollution métallique sur les terres agricoles situées aux alentours des sites de la décharge industrielle.

La division de la thèse et l'articulation des chapitres se feront comme suit :

**Chapitre I:** permet d'une part de hiérarchiser les problèmes environnementaux en Algérie, les différentes sources de pollution causées par les activités humaines et qui ont provoqué le dysfonctionnement de l'écosystème, et d'autre part donner quelques définitions et notions usuelles et scientifiques d'un sol, de ses constituants, des cycles biogéochimiques majeurs des éléments étudiés et de leurs interactions avec les sols.

**Chapitre II:** tenant compte de la méthodologie élaborée, traitera les méthodes et le matériel utilisés pour la détermination des teneurs en métaux lourds dans le sol et dans la végétation.

**Chapitre III:** expose les résultats d'analyse obtenus d'une part dans les trois sols agricoles étudiés en deux couches 0-20cm et 20-40cm, à distance variable du site de la décharge et d'autre part ceux des plantes.

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

---

# **CHAPITRE I. Synthèse Bibliographique**

---



## **I.1. L'ETAT D'ENVIRONNEMENT EN ALGERIE**

L'Algérie constitue le plus vaste pays africain, totalisant 2,381,741 Km<sup>2</sup> avec 2 millions de Km<sup>2</sup> de désert et plus de 381,000 Km<sup>2</sup> à dominance climatique semi-aride et sub-humide, son territoire s'étend sur plus de 2000 Km du nord au sud, de la méditerranée aux confins du Sahara. Toutefois, la question des ressources naturelles du pays reste une préoccupation majeure et sont loin de correspondre à ce que l'on pourrait attendre d'une telle superficie, car d'une part, elles sont limitées et fragilisées par les conditions climatiques, d'autre part, accélérées de plus en plus par les actions anthropiques.<sup>1,3,4</sup>

Sur le plan environnemental et à travers le travail de localisation des décharges publiques, il a été constaté qu'un grand nombre de ces dernières constituent une véritable menace dans la mesure où leur emplacement (à proximité d'oueds, de zones d'habitations et au-dessus de nappes phréatiques...) aggrave la situation; auxquelles s'ajoutent la pollution par les eaux usées, les rejets industriels, les déchets hospitaliers, etc.<sup>4,5</sup> Ceci a engendré des atteintes aux écosystèmes, qui malheureusement, ne sont plus des périls, mais des réalités tangibles et le plus grand de tous les dangers, c'est qu'elles deviennent banales, c'est-à-dire acceptées. C'est pour cela qu'il est impératif de se rendre compte de la nécessité d'avoir un équilibre à long terme entre l'environnement naturel et l'environnement créé par l'homme. Cela exigera sans aucun doute, que nous modifiions notre manière d'appréhender l'environnement et que nous adaptions notre comportement à ses besoins.

Afin de prendre conscience de la gravité de la crise environnementale en Algérie, il semblait prioritaire d'exposer la situation actuelle et l'impact sur les différents compartiments de notre environnement.

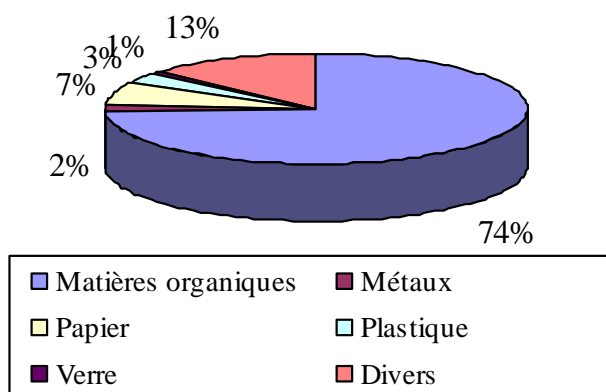
### **I.1.1. Pollution par les déchets ménagers**

On entend par déchet, tout résidu d'un procédé de production de transformation ou d'utilisation, toute substance, tout matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.<sup>6,7</sup>

La réglementation algérienne définit les déchets ménagers et assimilés comme l'ensemble des déchets dont l'élimination est prise en charge par les collectivités locales directement ou par le biais d'entreprises agréées.<sup>8,9</sup>

La gestion des déchets ménagers en Algérie s'effectue avec beaucoup d'insuffisance, dont la quantité générée annuellement est estimée à 5,2 millions de tonnes,<sup>1,2</sup> quotidiennement, elle est de l'ordre de 0,5 Kg par habitant de déchets solides.

Dans les grandes villes comme Alger, un citoyen génère environ 1,2 Kg de déchets par jour. Plus de deux tiers des rejets urbains générés par habitant par jour sont des éléments organiques. La figure.I-1 représente la répartition en pourcentage des déchets ménagers dans nos poubelles.

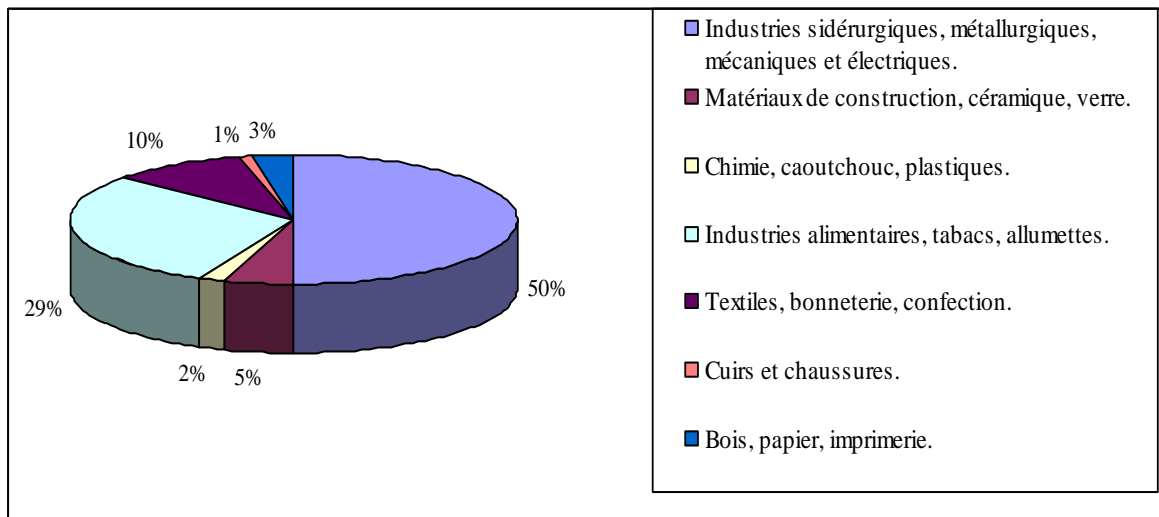


**Figure I-1:** La composition moyenne des déchets ménagers. <sup>1,2</sup>

Les déchets sont déposés au niveau des décharges sauvages qui n'obéissent pas à la réglementation, ils sont souvent incinérés à l'air libre. Aussi, ces décharges présentent un biotope adéquat pour la prolifération d'animaux errants (chiens, chats, rats, mouches et moustiques) et un vecteur de maladies.

### I.1.2. Pollution industrielle

L'industrie en Algérie a connue un développement soutenu tant dans sa diversité que dans sa capacité (Fig.I-2). Les industries sidérurgiques et métallurgiques occupent, à elles seules, la moitié des activités industrielles. Mais, les processus d'industrialisation n'ont pas respecté les préoccupations environnementales. Avant la promulgation de la loi 83-18 de 1983 relative à la protection de l'environnement, les projets industriels étaient réalisés sans études d'impact sur l'environnement: proche des réservoirs de main-d'œuvre, à proximité des voies de communication et disposant de toutes les commodités.<sup>10,11</sup> Cette situation a eu des effets préjudiciables sur l'environnement et sur la santé publique.



**Figure I-2:** Production de déchets par grands secteurs d'activités industrielles.<sup>1,4</sup>

De plus, l'activité industrielle produit des déchets toxiques qui sont récupérés et stockés avec beaucoup d'insuffisances. Ils ont été évalués en 1994 à environ 185,000 tonnes/an et la même étude a évalué 344,000 tonnes de déchets dangereux et toxiques, dont 90% dans les wilayas de Annaba et Tlemcen. En outre, l'ensemble des déchets dangereux produits est souvent stocké dans des dépôts de fortune et dans un état déplorable. Alors qu'une bonne partie de ces déchets se retrouvent dans la nature avec tous les risques de pollution des sols et des ressources hydriques qu'ils pourraient provoquer.

Le complexe électrolyse de zinc de Ghazaouet est prévu pour produire 40,000 tonnes/an de zinc, 90,000 t/an d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) et 150 t/an de cadmium. Il est à l'origine des rejets importants de métaux lourds dans l'environnement.<sup>1,12</sup> Des analyses faites, dans la région de Ghazaouet, par l'organisation mondiale « Greenpeace » le 09-09-1991 ont montré que le plomb, le cadmium, le mercure, le zinc et le cuivre se trouvent à des concentrations plus ou moins élevées engendrant une pollution du sol et une pollution marine importante.<sup>1</sup>

### I.1.3. Contamination des ressources en eau

L'eau, ressource naturelle de plus en plus rare, est une partie du patrimoine d'une nation d'une manière spécifique et patrimoine de l'humanité, d'une manière générale. En Algérie, la question des ressources en eau reste une préoccupation majeure, car 95% du territoire a un climat aride, aggravé par les risques de pollution qui rendrait inutilisable le peu de ressources dont dispose le pays.<sup>3,4</sup>

En effet, si la gestion de l'eau est bien maîtrisée pour les prochaines années, le problème de l'eau serait beaucoup plus vu sous l'angle de sa qualité et non pas seulement de sa quantité.<sup>13,14</sup>

Des cas de pollutions graves des eaux superficielles et souterraines ont été recensés à travers le territoire national. Une étude menée par l'ANRH montre que les déchets solides industriels sont généralement évacués avec les déchets ménagers, contribuant fortement à la pollution des ouvrages de mobilisation et les eaux souterraines et par la suite la pollution des sols.

### I.1.4. Contamination du sol

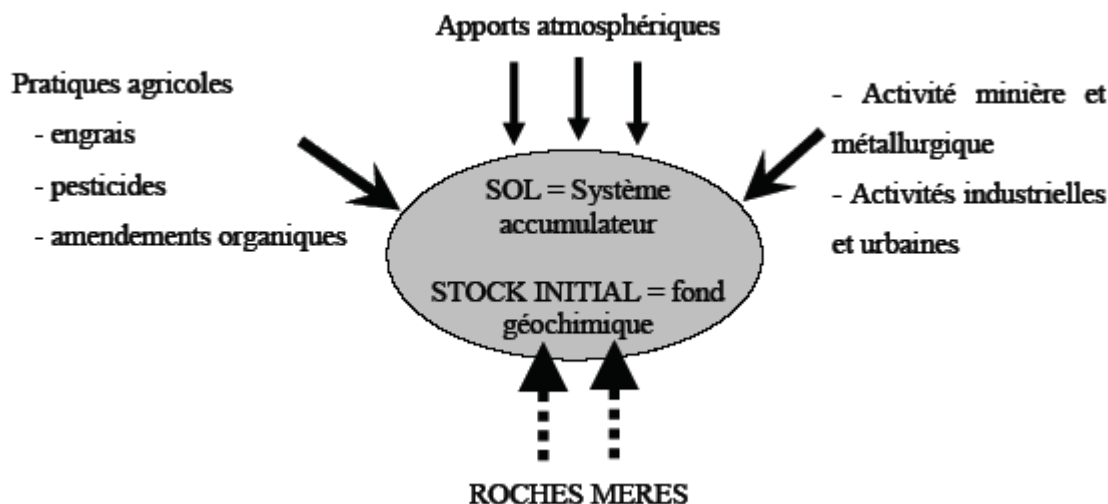
La dégradation des sols est définie comme étant une réduction de la qualité des sols causée par l'utilisation humaine.<sup>15,16</sup> En Algérie, la dégradation des sols constitue une problématique grave, touchant une partie importante des terres agricoles et des parcours steppiques. Elle comprend la dégradation chimique, physique et biologique comme la réduction de la fertilité, le déclin de la stabilité des agrégats, la salinité.

La dégradation des sols est largement utilisée comme indicateur de non-durabilité et comme évidence visuelle de la dégradation de l'environnement et de la diminution de la diversité biologique.<sup>1,11</sup>

Pendant longtemps, le sol joue un rôle éminent dans les grands cycles biogéochimiques et le devenir des substances polluantes, il accumule et met à la disposition des plantes et des animaux la plupart des éléments indispensables à la vie (air, eau, éléments nutritifs, etc). A côté de sa fonction alimentaire, le sol peut également constituer un filtre environnemental efficace en épurant l'eau qui le traverse de divers polluants pouvant contaminer la chaîne alimentaire et les nappes d'eau souterraine (Fig.I-3).Ce milieu complexe pose d'importantes interrogations concernant sa capacité à conserver les éléments tels que les métaux lourds.

Il n'y avait, en effet, pas un régime juridique bénéfique de la protection des sols, mais on considérait que la terre absorbait et « digérait » tout. Cette croyance naïve est aujourd'hui révolue.<sup>17,18</sup>

- soit la charge critique est dépassée et le sol ne joue plus son rôle tampon, de sorte que les polluants pénètrent jusqu'à la nappe phréatique et les fleuves;
- soit les polluants s'accumulent dans le sol jusqu'au point où un changement dans les conditions physiques et/ou chimiques, et/ou biologiques, entraîne un transfert des polluants.



**Figure I-3:** Stock et flux d'éléments en trace dans les sols. <sup>12</sup>

### I.1.5. Impact sur la santé

La prolifération des décharges sauvages a posé un véritable problème de dégradation de l'environnement, leurs impacts se résument comme suit:

- sur l'air, par le dégagement gazeux: gêne par les odeurs; intoxications; explosions (méthane/air);
- sur le sol, lors de la migration des polluants par ruissellement et infiltration : atteinte à l'esthétique du paysage; intoxication par la chaîne alimentaire par les polluants bioaccumulations (métaux lourds, dioxine etc.); odeurs, intoxications, explosions; dégradation des ouvrages souterrains (corrosion des bétons et/ou joints de parois moulées etc.);
- sur les eaux souterraines et cours d'eau, par infiltration ou ruissellement de lixiviations et contamination par les polluants dissous ou en suspension : intoxication par la chaîne alimentaire (métaux lourds, dioxine etc.); dégradation des installations de pompage des eaux.

Parmi ces polluants on peut citer:

- polluants inorganiques: As: Arsenic; Ba: Barium; Cd: Cadmium; Co: Cobalt; Cr: Chrome; Cu: Cuivre; Hg: Mercure; Mo: Molybdène; Ni: Nickel; Pb: Plomb; Se: Sélénium; Zn: Zinc;
- polluants organiques :HAP: Hydrocarbures aromatiques polycycliques; poly chlorobiphényl ( PCB) et poly- chlorotriphényl (PCT).<sup>6,19</sup>

L'organisation mondiale de la santé (OMS), considère que la santé publique dépend de plusieurs facteurs, dont la qualité de l'environnement, plus particulièrement de la teneur en

polluants du sol, de l'eau de l'air et des conditions de logement. Des enquêtes faites entre 1994 et 1995 par le secteur de la santé montre que l'Algérie présente à la fois les priorités des pays développés (maladie cardio-vasculaire, cancer, diabète) et celles des pays en développement (maladie infectieuses, endémiques et récurrentes, affection périnatales).<sup>19</sup>

### I.2. SYNTHÈSE ET CONNAISSANCE ACTUELLE SUR LES MÉTAUX LOURDS

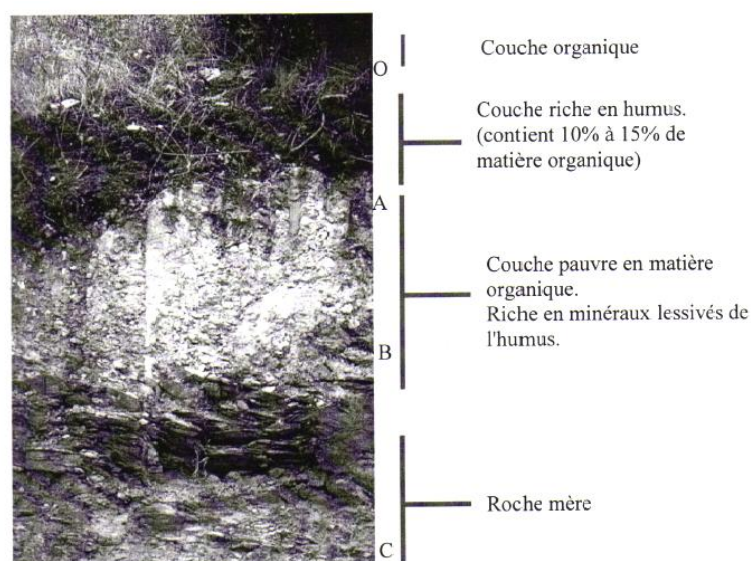
Le sol est un milieu complexe formé par une fraction organique et une fraction minérale. Ces deux fractions sont sensibles à la pollution, facteur généralement associé à une perturbation du milieu d'environnement. Les effets de ces perturbations ne sont pas tous maîtrisés à l'heure actuelle.

Dans cette partie, nous définirons dans un premier temps le milieu d'étude qu'est le sol, ses constituants et les modifications que peuvent entraîner son usage, et dans un second temps des notions sur la contamination des sols en ETM, afin de mieux comprendre en quoi une bonne connaissance de la spéciation d'un polluant métallique et de la nature complexe du milieu sont-ils indispensables pour appréhender le risque environnemental.

#### I.2.1. Le sol

##### I.2.1.1. Description

Le sol est formé de plusieurs couches (horizons), l'ensemble de ces horizons que l'on distingue sur une coupe se nomme "SOLUM" (ou profil) (Fig.I-4).



**Figure I-4:** Exemple des horizons du sol.<sup>20</sup>

Selon Baize,<sup>20</sup> le sol correspond à la couche supérieure meuble de la croûte terrestre. En dehors des constituants primaires issus de la roche mère (silicates, carbonates), le sol comprend des constituants secondaires minéraux (argiles, oxydes, hydroxydes), des constituants organiques formés à partir des résidus végétaux et animaux (humus), d'eau, d'air et d'organismes vivants (Fig.I-4). Ces divers constituants ont des propriétés de surface et de charge qui leur confèrent de remarquables capacités de rétention. Cependant le sol est un milieu vivant, complexe et dynamique, en évolution constante sous l'effet de différents paramètres tels que le climat, la topographie, la végétation et l'action de l'homme. Il joue un rôle d'interface entre les phases liquides et gazeuses dans l'environnement où il intervient comme système source, système transformateur, et système de transfert des éléments en trace.<sup>22,21</sup>

### I.2.1.2. Structure

Le sol est composé de constituants minéraux et organiques, d'eau et de gaz (Fig.I-5). Les constituants minéraux se divisent en deux catégories : des minéraux primaires résultant directement de la désagrégation de la roche mère, et des minéraux secondaires néoformés. Les matières organiques du sol, quant à elles, se composent d'une fraction organique vivante (flore du sol, faune et racines végétales) de taille grossière (20mm), non évoluée et d'une fraction organique morte (des résidus d'origine animale et végétale) en perpétuelle évolution, composées de substances humiques (acides humiques, fulviques et humine se distinguant principalement par leur solubilité en fonction de la méthode d'extraction) et de biomolécules issus d'organismes non transformées (polysaccharides).<sup>23</sup>

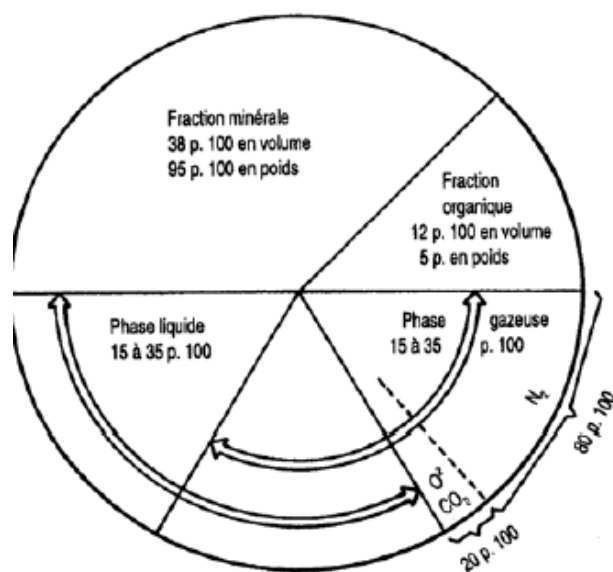
Les matières organiques dans les sols sont:

- sources et stocks d'énergie, d'éléments majeurs et en trace pour les microorganismes, les plantes et les animaux
- impliquées dans les phénomènes d'échange, de complexation, de réduction et d'oxydation de part leur réactivité chimique et physico-chimique
- à la base des propriétés physiques des sols par leur rôle dans leur organisation et leur structure.<sup>24</sup>

L'ensemble de ces constituants s'agrègent de façon plus ou moins stable et forment ainsi des structures poreuses dans lesquelles circulent la solution du sol, les phases gazeuses, les éléments dissous et les particules les plus fines des sols (colloïdes, matières en suspension particulières). Sur le plan environnemental le sol est un filtre remarquable possédant un pouvoir épurateur non négligeable.

Les transformations que l'homme apporte sur le paysage par la gestion et l'occupation des sols sont non négligeables. Ainsi le changement de l'occupation des sols entraîne des

modifications sur les propriétés physiques et chimiques (de matières organiques, pH, potentiel redox), hydriques (infiltrabilité, écoulements préférentiels, drainage du sol), et biologiques (activité de la micro, méso et macro faune et flore du sol).<sup>25-28</sup>



**Figure I-5:** Composition moyenne des sols d'après Morel.<sup>29</sup>

On distingue plusieurs fractions granulométriques dans le sol cité dans le tableau I-1.

**Tableau I-1:** Nature des composés du sol en fonction de leur granulométrie.<sup>29,30</sup>

Nature du composé	Tailles des particules
Cailloux	$X > 2\text{cm}$
Graviers	$2\text{mm} < X < 2\text{cm}$
Sables	$500\mu\text{m} < X < 2\text{mm}$
• sables grossiers	$200\mu\text{m} < X < 500\mu\text{m}$
• sables moyens	$50\mu\text{m} < X < 200\mu\text{m}$
• sables fins	
Limons	$20\mu\text{m} < X < 50\mu\text{m}$
• Limons grossiers	$2\mu\text{m} < X < 20\mu\text{m}$
• Limons fins	
Argiles	$0,2 - 2\mu\text{m}$

## I.2.2. Métaux lourdes

### I.2.2.1. Définition

Les éléments traces métalliques (ETM) sont les 80 éléments constituant de la croûte terrestre, dont la concentration est inférieure à 0,1%. Les éléments en traces peuvent être des métaux (Pb, Zn, Cu etc.), des métalloïdes (As, B, Se) ou des non métaux (N, F, Cl, Br).<sup>20</sup> Le terme métaux lourds regroupe les 65 éléments traces qui présentent une masse volumique supérieure à  $5 \text{ g/cm}^3$  pouvant avoir un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes végétaux et animaux. Dans les études environnementales, le terme est souvent associé au qualificatif de toxique en omettant de signaler qu'en faibles concentrations certains ETM sont des nutriments indispensables pour le vivant.



### I.2.2.2. Origine des métaux présents dans le sol

Le problème principal avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans des sols. Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique (Fig.I-6 et I-7).

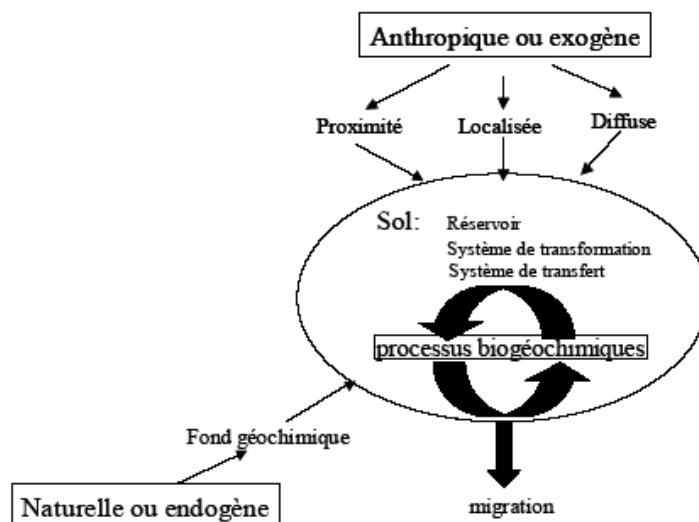


Figure I-6: Sources d'ETM dans les sols. <sup>31</sup>

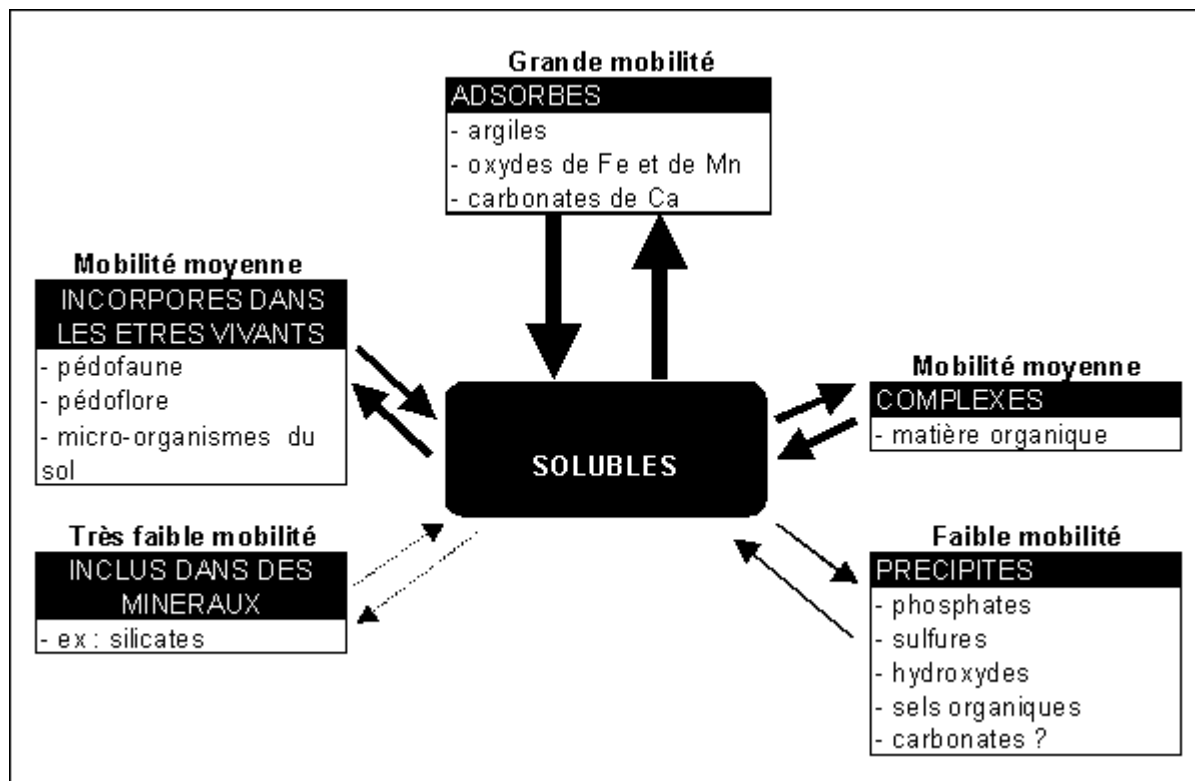


Figure I-7: Localisation des éléments traces métalliques dans le sol. <sup>32</sup>

### i. Origine naturelle

Les métaux lourds sont présents naturellement dans les roches, ils sont libérés lors de l'altération de celles-ci pour constituer le fond géochimique.<sup>33</sup> La concentration naturelle de ces métaux lourds dans les sols varie selon la nature de la roche, sa localisation et son âge.

### ii. Origine anthropique

Cependant, la source majeure de contamination est d'origine anthropique. Au cours des dernières décennies, l'apport de métaux lourds au sol dans le monde s'est étendu. A l'heure actuelle on l'estime à 22000 tonnes de cadmium, 939000 t de cuivre, 783000 t de plomb, et 1350000 t de zinc.<sup>31</sup> Les principaux types de pollutions anthropiques responsables de l'augmentation des flux de métaux, sont la pollution atmosphérique (rejets urbains et industriels), la pollution liée aux activités agricoles et la pollution industrielle (tableaux I-2 et I-3).

**Tableau I-2:** Contribution de différentes sources à l'enrichissement moyen annuel des terres émergées en ETM. <sup>32</sup>

	Cuivre	Zinc	Cadmium	Plomb
Total (milliers de tonnes)	216	760	20	382
Déchets agricoles	55%	61%	20%	12%
Déchets urbains	28%	20%	38%	19%
Engrais	1%	1%	2%	1%
Retombées atmosphériques	16%	18%	40%	68%

**Tableau I-3:** Flux des éléments trace dans l'environnement (tonne/an). <sup>35</sup>

Elément	Flux anthropogénique	Flux naturel
As	150	90
Cd	43	4,5
Cr	7810	810
Cu	9162	375
Pb	3665	180
Hg	17,8	0,9
Ni	1134	255
Zn	7467	540

Ainsi, les concentrations les plus importantes de métaux lourds sont liées à l'activité humaine. Ils se retrouvent dans notre environnement quotidien sous des formes chimiques très diverses, pouvant chacune conférer une propriété particulière (solubilité, toxicité, etc.) au

métal étudié. Ils sont fortement électropositifs et donnent par perte d'électrons des cations métalliques de charge variable.<sup>34</sup>

Ces métaux subissent dans les eaux naturelles comme dans la solution du sol de nombreuses réactions biologiques et chimiques, Ils existent sous forme d'ions libres (hydratés), sous forme de divers complexes avec des ligands inorganiques ou organiques, sous forme adsorbée, ou co-précipitée. Les métaux se concentrent donc dans la phase solide du sol, cette dernière est constituée de nombreuses espèces capables de fixer les ions présents dans la phase liquide (Fig.I-7).<sup>5,7</sup>

### **I.2.2.3. Distribution des ETM dans les constituants des sols**

Les formes chimiques des éléments en traces (spéciation), leurs interactions et associations avec les différents constituants du sol (argiles, oxy-hydroxydes, carbonates, phosphates et matières organiques) conditionnent leur biodisponibilité pour les végétaux ainsi que leur mobilité par le transfert dans la solution du sol.<sup>36</sup>

#### **i. Phyllosilicates**

Les phyllosilicates que l'on retrouve essentiellement dans la fraction argileuse (<2µm) des sol, sont des silicates d'alumine organisés en feuillets formés d'un empilement successifs d'octaèdres, Al (O, OH)<sub>6</sub> et de tétraèdres SiO<sub>4</sub>, des substitutions isomorphiques au sein de ces polyèdres se produisent et conduisent à la charge négative (charge permanente, indépendante du milieu) de la surface des argiles. Ce déficit de charge est alors compensé par des cations dans l'espace interfoliaire ou à la surface du minéral. A cette charge permanente s'ajoute une charge variable due à la présence de groupement hydroxyles sur les bordures. L'ensemble de ces groupements permet la fixation des ETM.<sup>37-39</sup>

#### **ii. Oxy-hydroxydes de fer et manganèse**

Les oxy-hydroxydes constituent avec les argiles une fraction importante du complexe d'altération.<sup>40</sup> La charge est uniquement due aux groupements hydroxyles de surface et est déterminée par les paramètres intrinsèques de la solution du sol.<sup>38,41</sup>

#### **iii. Les carbonates et les phosphates**

Les carbonates et les phosphates doivent leur réactivité à l'hydratation de leur surface qui conduit à la formation de groupements -CaOH, -POH.<sup>41,42</sup> La dissociation de ces composés entraîne l'adsorption des métaux à leur surface. La précipitation ou co-précipitation de certains ETM avec ces composés sont également responsables de leur rétention dans les sols.<sup>43</sup>

#### iv. Les matières organiques

Les matières organiques peuvent agir en tant que ligands sur les métaux, modifiant leur spéciation, leur dynamique et leurs impacts en tant que polluants. Les matières organiques interviennent dans la rétention des métaux par leurs groupements carboxyles R-COOH, phénol R-OH, amines R-NH<sub>2</sub> et thiols R-SH. L'ensemble de ces composés à fort capacité d'échange, sont chargés négativement en milieu neutre ou à pH>5 selon les groupements considérés, et sont donc très réactifs vis-à-vis des ETM. Bien que l'étude de ce compartiment du sol soit délicate, on peut distinguer dans cette famille de composés organiques: les matières organiques humifiées composées d'acides fulviques, d'acides humiques et d'humine, ainsi que des ligands organiques de faible poids moléculaire, essentiellement issus de l'activité biologique du sol (exsudats racinaires, etc.).<sup>38,42</sup>

Cependant, l'affinité entre ETM et constituants du sol varie selon le métal et le constituant considéré (tableau I-4).

**Tableau I- 4: Série d'affinité empirique des métaux pour les constituants du sol.**<sup>44</sup>

Matériel	Séquence d'affinité
Oxyde Al amorphe	Cu > Pb > Zn > Ni > Co > Cd
Oxyde Fe amorphe	Pb > Cu > Zn > Ni > Cd > Co
Goethite	(FeOOH) Cu > Pb > Zn > Cd
Hématite	Pb > Cu > Zn > Co > Ni > Mn
Oxydes Mn	Pb > Cu > Mn = Co > Zn > Ni
Acides fulviques	(pH5) Cu > Pb > Zn
Acides humiques (pH 4-6)	Cu > Pb >> Cd > Zn

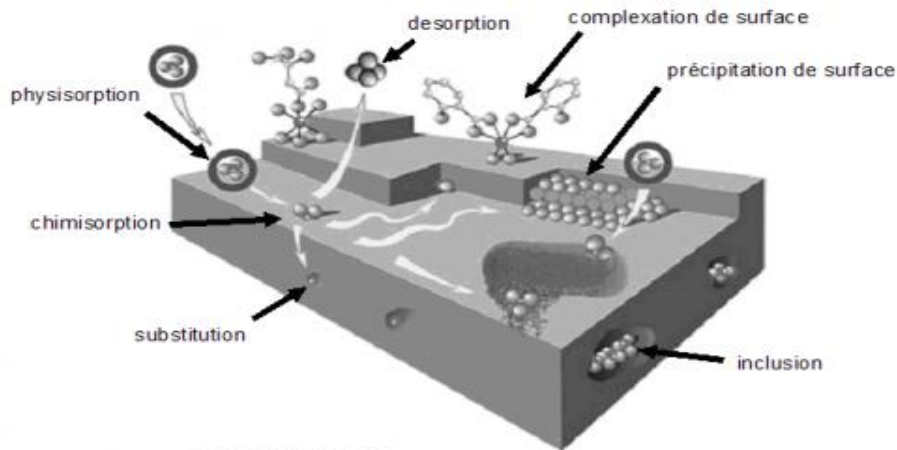
Un métal peut donc se trouver associé aux différents constituants du sol sous différentes formes. La figure I-8 illustre les principales interactions entre un atome (ou une molécule) et un solide.<sup>20,45, 46</sup> Les processus physico-chimiques à l'interface solide/liquide, qui peuvent permettre le piégeage des métaux lourds, sont les suivants:

- adsorption: phénomène de surface par lequel des atomes ou des molécules se fixent sur la surface solide d'un substrat selon divers processus. Certains minéraux, comme les argiles ou les zéolites, sont d'excellents adsorbants, grâce à leurs très grandes surfaces spécifiques. La désorption la transformation inverse de l'adsorption, par laquelle les molécules ou les atomes adsorbés se détachent du substrat. On distingue deux types d'adsorption, selon les mécanismes mis en jeu:

- adsorption physique (ou physisorption): elle est attribuable à l'attraction électrostatique d'un soluté par une surface polarisée, afin de maintenir l'électroneutralité. Les énergies de liaisons mises en jeu sont relativement faibles, du type force de Van der Waals. Les espèces ainsi adsorbées gardent les molécules d'eau qui leur sont associées. Plusieurs couches d'atomes ou de molécules peuvent se déposer de cette manière. L'adsorption physique est généralement facilement réversible.

- adsorption chimique (ou chimisorption): dans ce cas, la molécule adhère à la surface par des liaisons ioniques ou covalentes. Elle est souvent difficilement réversible et engendre une couche mono-moléculaire. Cette liaison est spécifique, c'est-à-dire qu'elle n'est possible qu'entre éléments ayant une configuration électronique adaptée.

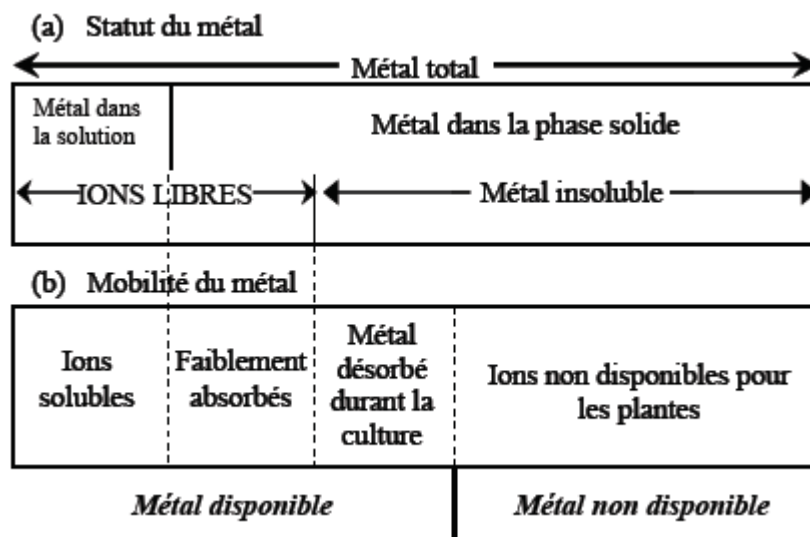
- complexation de surface s'effectue lorsqu'un ion métallique réagit avec un groupement anionique qui fonctionne comme un ligand inorganique (comme  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ); ainsi ces sites de surface forment des liaisons chimiques avec les ions en solution.
- précipitation: c'est le passage d'une espèce de l'état dissout à l'état solide. Les métaux peuvent précipiter dans l'eau des pores ou à la surface des particules solides. Dans un milieu naturel, les métaux précipitent principalement sous forme d'hydroxyde, de carbonates, de phosphates ou de sulfures. Les équilibres de précipitation sont gouvernés par les produits de solubilité ( $K_s$ ).
- substitution: un atome peut se substituer à un autre dans le réseau cristallin lorsque sa charge et sa taille sont similaires. C'est, par exemple, le cas d'un ion métallique incorporé dans le réseau cristallin lors de sa précipitation, ou bien qui diffuse dans le solide pour combler un vide ou remplacer un atome du solide.
- inclusion (piégeage mécanique): il s'agit d'impuretés piégées mécaniquement dans des pores non débouchant lors de la croissance des minéraux. Cela peut être sous forme dissoute ou solide.



**Figure I-8:** Principales interactions entre un atome ou une molécule et un solide à l'interface solide/liquide.

#### I.2.2.4. Mobilité et biodisponibilité des métaux lourds

La toxicité d'un métal dépend de sa spéciation (forme chimique) et des facteurs environnementaux.<sup>45</sup> Dans le sol, les métaux lourds peuvent exister sous forme d'ion libre ou sous forme liée à des particules de sol. Cependant, un métal n'est toxique pour les organismes vivants que s'il est sous forme libre; il est alors biodisponible. Comme tout élément chargé positivement, les cations métalliques peuvent interagir dans le sol avec toute particule organique ou minérale chargée négativement. De l'équilibre entre les formes libres et fixées de l'ion va dépendre sa biodisponibilité, directement liée à sa toxicité. Enfin, la biodisponibilité (Fig.I-9) des métaux lourds varie en fonction de plusieurs facteurs du sol. Parmi lesquels, la capacité d'échange de cation (CEC), le pH, le potentiel redox (Eh), la teneur en phosphate disponible, la teneur en matière organique et les activités biologiques.



**Figure I-9:** Mobilité des métaux dans le sol. <sup>45</sup>

### **i. La teneur en argile**

Les argiles, de par leurs propriétés physico-chimiques, jouent un rôle très important dans la disponibilité des métaux lourds.<sup>47</sup> Des études ont montré que les métaux lourds peuvent être absorbés et immobilisés par les minéraux argileux ou également être complexés par la matière organique du sol en formant alors un complexe organométallique.<sup>48,49</sup> En effet, la charge électronégative des argiles les rend aptes à contracter des liaisons électrostatiques avec toute entité chargée positivement, comme les cations métalliques. Ces liaisons sont réversibles et les cations fixés sont échangeables: ils peuvent être remplacés par d'autres cations présents dans la phase aqueuse du sol. Cette capacité d'échange de cations (CEC) exprimée en milliéquivalents pour 100 g est une caractéristique importante de chaque argile qui conditionne grandement la biodisponibilité d'un métal dans le sol.

### **ii. Le pH**

Le pH est un autre facteur important influençant la solubilité et la spéciation du métal et donc sa toxicité.<sup>45</sup> Quand le pH diminue d'une unité, la concentration des cations métalliques libres augmente d'environ un facteur de 2 dans la solution de sol et par conséquent améliore la phytoextraction.<sup>50</sup> Les organismes et les microorganismes eux-mêmes peuvent influencer la disponibilité des métaux lourds dans leur environnement proche par acidification locale lors d'une réaction métabolique ou par la production de composés complexant les métaux lourds.<sup>51</sup>

### **iii. Le potentiel redox (Eh)**

Le potentiel redox (Eh) permet de caractériser les échanges d'électrons entre les espèces chimiques. Ainsi, les faibles valeurs d'Eh favorisent la dissolution des hydroxydes et entraînent une augmentation de la concentration des métaux associés avec des composants.<sup>52</sup> De plus, la modification du degré d'oxydation des ligands ou des éléments se liant avec le métal influence indirectement la solubilité des métaux lourds. Par exemple, en conditions réductrices, les sulfates sont réduits en sulfure qui piègent volontiers les éléments métalliques tels que le Pb, le Cd et le Zn.<sup>53</sup> Bien que l'influence des conditions oxydo-réductrices du sol semble très importante au regard de la mobilité des éléments métalliques, il n'en demeure pas moins que ce facteur apparaît souvent comme secondaire par rapport au pH. En effet, pour un sol donné l'Eh varie en fonction inverse du pH, il augmente quand le pH diminue.<sup>53</sup>

### **iv. L'activité biologique**

La compréhension globale des phénomènes biologiques jouant sur la solubilité des métaux lourds dans les sols est rendue difficile par la multiplicité des actions et interactions à tous les niveaux. Parmi les microorganismes on retrouve de nombreuses populations

bactériennes et fongiques dont les activités métaboliques influencent la mobilité des métaux lourds.

Cependant, beaucoup de ces phénomènes sont également communs aux plantes. Les principaux modes d'action sur la mobilité des polluants métalliques sont la solubilisation, l'insolubilisation et la volatilisation:

- la solubilisation provient de la production de composés acides tels que les acides carboxyliques, phénoliques, aliphatiques, nitrique et sulfurique. Certaines bactéries chimiolithotrophes (*Thiobacillus*, *Leptospirillum*, *Galionella*) 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 lourds. 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.<sup>52,53</sup> Cette acidification favorise aussi la mobilité des autres éléments qui ne sont pas indispensables pour le métabolisme végétal. D'autre part plusieurs autres molécules organiques, capables de complexer spécifiquement certains éléments en solution, peuvent être également libérées en cas de carence nutritive.
- l'insolubilisation constitue le phénomène opposé. Bien que le phénomène de détoxification externe des métaux lourds par des exsudats racinaires n'ait jamais été démontré,<sup>54</sup> 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 (Se). La biométhylation permet le transfert de groupements méthyle directement aux atomes, Pb, Sn (étain), As, Sb (antimoine) et Se (sélénium), permettant leur volatilisation dans l'atmosphère.<sup>54</sup>

### I.2.2.5. Les métaux lourds: nature, toxicité et caractéristiques générales

#### i. Le plomb

##### i.1. Origine

La concentration moyenne du Pb dans la croûte terrestre serait de l'ordre de 13 à 16 mg/kg.<sup>20</sup> Baize,<sup>24</sup> propose un certain nombre de valeurs moyennes pour différentes roches: Gabbro= 1,9; Andésite = 8,3; Granite = 22,7; Schiste = 23; Grès = 10; calcaire et dolomie = 71. Les schistes noirs riches en pyrites et en matières organiques seraient riches en Pb (30 mg/kg).<sup>20</sup>



### **i.2. Le plomb dans le sol**

Le Pb dans le sol provient essentiellement – en système non anthropisé - de la roche mère. A l'heure actuelle la concentration de Pb des souches pédologiques mondiales est estimée en moyenne à 25ppm (de 22 à 28ppm pour la plus grande partie des sols, 44ppm pour les histosols).<sup>55,56</sup>

Les sulfures de Pb s'oxydent lentement au cours des processus d'altération des roches mères. Le Pb forme des carbonates et/ou s'incorpore au sein du réseau cristallin des argiles minéralogiques. Il peut également s'associer aux oxydes de Fe et de Mn, de même qu'aux substances humiques. Le comportement géochimique du Pb s'apparente à celui des cations bivalents alcalinoterreux, de sorte que le Pb peut remplacer le Ba et le Sr et éventuellement le Ca dans les structures cristallines des minéraux et sur leur site d'adsorption.

Aux teneurs naturelles, aux sols peuvent s'ajouter des apports anthropogènes:

- une utilisation des composés organométalliques (antidétonant des moteurs à explosion).
- les sources industrielles (usine de batterie, affinage du Pb...).
- les déblais de mines.
- les sources urbaines (boues des stations d'épuration).
- traitement pesticide à base de Pb.

D'après Sanders et al,<sup>50</sup> de nombreux auteurs s'accorderaient pour affirmer que les sols non contaminés contiendraient de 10 à 30 mg/kg (moyenne 15 mg/kg) tandis que les sols situés loin des centres urbains et industriels mais affectés par des contaminations diffuses présenteraient des concentrations comprises entre 30 et 100 mg/kg. Des teneurs supérieures à 110ppm de Pb traduiraient l'existence d'une source polluante à proximité.

### **i.3. Comportement du plomb dans le sol: spéciation et mobilité**

Le Pb introduit dans le sol ne subit que peu de transformation et migre relativement peu à travers les différents horizons. Etant peu mobile, il reste généralement fixé à la partie supérieure du sol. Il n'est pas entraîné en profondeur par le lessivage, il en résulte un gradient de concentration selon la profondeur.<sup>57,58</sup> Le Pb serait le micropolluant métallique le moins mobile dans le sol. Ainsi dans la gamme de pH de 5 à 9 et à concentration totale identique le Pb serait 100 fois moins mobile que le Cd. La grande affinité de la matière organique vis-à-vis de ce métal expliquerait l'accumulation préférentielle de ce métal dans les horizons de surface.<sup>50</sup> Ceci fait qu'il est très difficile de distinguer ce qui provient des retombées atmosphériques lointaines et ce qui provient du seul cycle biogéochimique naturel.

En règle générale l'horizon de surface humifère est l'horizon le plus riche en Pb au sein d'un même solum. Ce fait a été constaté par de nombreux auteurs, mais cette règle générale n'est pas toujours vraie.

Lorsque le solum dans son ensemble est vraiment très chargé en Pb (anomalie pédogéologique) l'horizon de surface n'est plus forcément celui qui montre la concentration maximale au sein du solum. Selon Pais et Benton,<sup>57</sup> une texture légère et un pH acide (4,1 à 4,3) provoqueraient un lessivage important et une contamination en profondeur. Le degré d'oxydation du Pb est de  $Pb^{++}$ , mais on connaît aussi des formes d'oxydation  $Pb^{4+}$ . Le Pb forme de nombreux composés insolubles dans l'eau.

### **i.4. Biodisponibilité du plomb**

L'absorption racinaire du Pb est actuellement considérée comme passive. Elle est réduite par le chaulage et les basses températures. Bien que le Pb soit dans le sol un élément très peu soluble, il peut s'accumuler dans les racines et particulièrement dans les membranes cellulaires. En règle générale, les concentrations en Pb d'une plante sont étroitement corrélées aux concentrations en Pb du sol, mais cette corrélation doit être nuancée et tenir compte en particulier de l'organe (racines, tiges, feuilles, etc.). La translocation de Pb vers les parties épigées d'une plante est un phénomène très limité. Ce qui fait que le Pb n'est pas un toxique systématique en ce sens qu'il ne diffuse pas dans le système vasculaire de la plante, son absorption racinaire n'est effective qu'au-delà de 1000ppm dans le sol, elle dépend entre autres facteurs de la concentration totale dans le sol, de la concentration dans la solution du sol et de la spéciation.<sup>50</sup> La plante peut également absorber le Pb par les feuilles. Le maximum "normal" dans les plantes, selon McKenzie<sup>59</sup> est de 8ppm.

### **i.5. Toxicité**

L'intoxication au Pb par l'intermédiaire de l'alimentation n'est pas un grand risque pour l'homme. Il n'est que très peu soluble dans le sol et les poussières contenant le Pb se déposent sur les fruits et légumes poussant près des sources atmosphériques fortement polluées (exemple autoroutes) sont retirées à 90% par lavage.<sup>50</sup> Le symptôme le plus marquant est le saturnisme: troubles digestifs (coliques), sanguins (anémie, perturbation de la synthèse d'hémoglobine), nerveux (paralysie des extenseurs de la main, encéphalopathie), troubles rénaux: néphrites.

## **ii. Zinc**

### **ii.1. Origine**

La teneur moyenne en Zn de la croûte terrestre serait comprise entre 70 et 132 mg/kg.<sup>20</sup> Le Zn apparaît distribué de manière relativement uniforme au sein des roches magmatiques. Les roches mafiques contiennent toutefois un peu plus de Zn (80 à 120ppm) que les roches acides (40 à 60ppm). Les roches des sédiments argileux et les schistes renferment comme les roches mafiques 80 à 120ppm de Zn. Les roches carbonifères et les grès en sont pauvres de 10 à 30ppm.

### ii.2. Le zinc dans le sol

Dans le sol, le Zn est présent le plus souvent sous forme de sulfure (Blende =ZnS) dans les filons hydrothermaux et les gîtes stratiformes imprégnant les roches sédimentaires où il se trouve associé au Pb, au Cu et au Fe. Il peut également substituer  $Mg^{2+}$  au sein du réseau cristallin des silicates. La teneur totale moyenne est de l'ordre de 50ppm, <sup>50</sup> Hettiarachchi et al, <sup>60</sup> donne une moyenne mondiale en Zn de 64ppm. Mckenzie, <sup>59</sup> trouve un maximum 'normal' de 300ppm avec une moyenne de 50ppm.

Le Zn est lié dans le sol aux oxydes de fer hydratés et aluminium (14 à 38% de Zn total) et aux argiles (24 à 63%). <sup>50</sup> Le sol peut être également enrichi par les apports anthropogènes: activités minières et industrielles, épandage agricole, activités urbaines et trafic routier. Il y a peu de sols contaminés de façon géogène par le Zn. A peu près toutes les surfaces contenant des quantités importantes de Zn sont les résultats d'activités humaines. Les apports du Zn par voie atmosphérique sont attestés par de nombreux travaux comme: Sanders et al, <sup>50</sup> et Babich et al. <sup>45</sup>

### ii.3. Comportement du zinc dans le sol: spéciation et mobilité

Le  $Zn^{++}$  est considéré comme très mobile.<sup>25</sup> Les formes les plus mobiles seraient facilement adsorbées par les constituants organiques et minéraux du sol, de sorte que le Zn tendrait à s'accumuler dans les horizons de surface de la plupart des solums. <sup>50</sup> Les minéraux argileux et les substances humiques sont capables de fixer le Zn très fortement de sorte que la solubilité de  $Zn^{2+}$  dans les sols apparaît moindre que celle de  $Zn(OH)_2$ ,  $Zn(CO_3)$ ,  $Zn(PO_4)$ . La fraction mobile de Zn représente 1 à 20% et ses complexes avec la matière organique 1,5 à 2,3%.<sup>46</sup> Selon Goulding et al, <sup>25</sup> en moyenne 65% de Zn soluble dans les sols se trouvent associés aux amines et aux acides fulviques, tandis que les complexes insolubles sont associés aux acides humiques.

### ii.4. Biodisponibilité

Le Zn est connu depuis longtemps comme un élément nécessaire aux plantes et aux animaux. Sa teneur dans les plantes reflète souvent la quantité disponible dans le sol. 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 (450 g de Zn/ha/an pour une culture de maïs, 670 g de Zn/ha/an pour une hêtraie de 130ans) et même des conditions édaphiques. <sup>56</sup>

Toutefois, en matière d'absorption du Zn une question reste controversée: l'absorption du Zn est-elle un phénomène actif ou passif, des présomptions sérieuses existent pour penser

que l'absorption racinaire est contrôlée par le métabolisme (active) bien que l'absorption passive puisse également exister.

Le Zn s'accumule dans la partie racinaire plus que dans la partie aérienne, surtout dans les sols riches en Zn. Dans les racines 90% de Zn total se présentent adsorbés sur la surface des parois cellulaires du cortex.<sup>39,20,50</sup> L'absorption de Zn peut être influencée par l'interférence entre Zn et les autres métaux lourds, surtout avec Cd aux effets antagonistes.<sup>56</sup> Des effets dépressifs ont été remarqués entre Zn d'une part et Cu, Fe, Cr et Mn d'autre part.<sup>62</sup> A des pH > 6 des carences peuvent apparaître sur des sols originellement pauvres en Zn.<sup>61</sup>

### **ii.5. Toxicité**

Les teneurs de Zn dans les plantes varient entre 25-200ppm. D'après Rousseau et al,<sup>40</sup> le maximum "normal" est de 150 mg/kg MS. L'excès de Zn peut provoquer une toxicité (coton sur sol acide). Chez l'homme on observe une toxicité aiguë par le Zn, mais à très forte concentration, se manifestant par des nausées, des vomissements, une rigidité musculaire et une irritation des muqueuses, alors qu'il occasionne dans l'eau une très forte astringence dès 5 mg/L.<sup>20</sup>

### **iii. Le cadmium**

#### **iii.1. Origine géogène**

Le Cd est peu abondant dans les roches ignées et sédimentaires, où il ne dépasse pas les 0,3ppm. Il se concentre préférentiellement dans les roches argileuses et schisteuses<sup>56</sup> et plus abondant dans les sédiments riches en carbonnes, sulfures et phosphates.<sup>20</sup>

Les calcaires jurassiques, bio détritiques (contenant de nombreux débris fossilisés) et récifaux sont nettement plus riches en Cd que les autres calcaires.<sup>24</sup>

La géochimie du Cd est étroitement liée à celle du Zn, mais elle diffère toutefois puisque le Cd présente une grande affinité pour le soufre.

#### **iii.2. Le cadmium dans le sol**

Sa teneur est principalement déterminée par la teneur de la roche mère. Les teneurs moyennes dans le sol se situent entre 0,06 et 1,1ppm.<sup>56</sup> McKenzie,<sup>59</sup> donne un maximum normal de 0,7 mg/Cd/kg MS. Les teneurs ne semblent pas être strictement reliées à une typologie, bien que les teneurs les plus fortes se rencontrent dans les histosols et les teneurs les plus faibles dans les podzols.

Ces teneurs naturelles sont sujettes à des augmentations suite à différents types d'apports anthropogènes:

- les retombées atmosphériques lointaines: contamination générale diffuse;
- les retombées atmosphériques locales: contamination locale;
- les apports directs gérés à la parcelle: contamination agricole résultant de trois groupes d'activité:
  - les épandages et amendements agricoles (le Cd peut être assez abondant dans les engrais phosphatés);
  - les sources industrielles: le Cd est un sous produit du raffinage du Zn. Il peut être libéré dans l'atmosphère lors de la métallurgie du fer et de l'acier;
  - enfin de nombreuses activités urbaines et le trafic routier libèrent le Cd dans l'environnement: incinération des déchets domestiques, combustion des carburants fossiles (pétrole, charbons, tourbes); boues des stations d'épuration; etc.

### iii.3. Comportement du cadmium dans le sol: spéciation et mobilité

Le Cd est fortement adsorbé par les argiles, les matières organiques, les boues et les acides humiques avec lesquels il forme des complexes. Sa rétention par la phase solide croît exponentiellement avec le pH croissant.<sup>60</sup>

En d'autres termes la mobilité du Cd dépendrait largement du pH et du Eh, mais Baize,<sup>20</sup> au cours de ses divers travaux, a pu constater plusieurs exemples de migrations en profondeur même en sols à pH neutre ou alcalin.

Le Cd est rapidement libéré des roches par altération. Il donne en solution  $Cd^{++}$  mais aussi des ions complexes comme  $CdCl^+$ ;  $CdOH^+$ ;  $CdHCO_3^+$ ;  $CdCl_3^-$ ;  $Cd(OH)_3^-$ ;  $Cd(OH)^-$  de même que les chélates organiques.<sup>56</sup> En conditions de forte oxydation, le Cd forme des oxydes ou des carbonates ( $CdO$ ,  $CdCO_3$ ). Il peut également s'accumuler dans des phosphates ou des phytocytés.<sup>61</sup> Le Cd est plus mobile dans le sol que le Cu et le Pb, donc plus disponible pour les plantes.  $Cd > Cu > Pb$ , de plus l'absorption du Cd peut être inhibée par le Cu et le Pb.

### iii.4. Biodisponibilité du cadmium

En règle générale, l'absorption du Cd est contrôlée par le pH et le potentiel rédox.<sup>62</sup> Dès que le pH du sol baisse, la mobilité, le transfert et l'accumulation du Cd qui en résultent sont favorisés, de même qu'ils le sont lorsque le sol est léger, riche en sable, pauvre en argile et matière organique. Lorsque le pH augmente la mobilité du Cd peut s'accroître au travers de la formation de complexes ou chélates mobiles. Sous ces conditions particulières, on démontre que l'absorption du Cd devient indépendante du pH.<sup>45</sup> Toutes les espèces cadmiées de la solution du sol sont, à priori, absorbables par les plantes. On a pu démontrer que l'absorption du Cd est plus ou moins importante suivant le genre ou la variété considérée.

L'absorption racinaire met ainsi en effet des processus d'absorption passive et conjointement d'absorption active.<sup>63</sup>

En règle générale, les plus hautes concentrations se trouvent dans les racines et les plus basses dans les organes de réserve (graines, fruits, tubercules) avec des séquences suivantes:<sup>50</sup> [Cd]<sub>racines</sub> > [Cd]<sub>tige</sub> > [Cd]<sub>feuilles</sub> > [Cd]<sub>graine</sub>. Généralement les racines contiennent 10 fois plus de Cd que les tiges. Les racines jouent en sorte le rôle de barrière.<sup>56</sup>

### iii.5. Toxicité du Cd

Malgré ses faibles teneurs dans le sol, cet ETM est le plus redouté car très toxique. Considéré comme assez mobile et assez facilement biodisponible, il risquerait soit de passer dans la chaîne alimentaire par l'intermédiaire des végétaux, soit de migrer en profondeur pour aller contaminer les nappes phréatiques. Les aliments (légumes, viande, lait) et le tabac constitueraient la principale source d'absorption du Cd pour l'homme. Le plus grand danger reste cependant l'ingestion directe de poussières contaminées dans certaines zones de loisirs comme les terrains de jeux ou les terrains de sport.

Dans les régions fortement exposées (à proximité d'industries métallurgiques) on constate dans les populations des lésions rénales très importantes. Le Cd est stocké dans le foie, les os, mais le rein est l'organe le plus sensible au Cd. La dose journalière admissible (DJA) est de 0,0057 mg/Cd/g selon les auteurs. Les symptômes de toxicité se manifestent par des troubles respiratoires, atteinte hépato digestive avec vomissement, douleurs abdominales et diarrhées.<sup>56</sup>

## iv. Le cuivre

### iv.1. Origine

Le Cu est un métal largement répandu dans la nature sa concentration moyenne dans la croûte terrestre serait comprise entre 45 et 70 mg/kg selon les auteurs,<sup>24</sup> elle est de l'ordre de 50ppm.<sup>56</sup> On peut le trouver dans la nature soit sous forme libre dans la cuprite (88,8%) soit sous forme d'oxyde de sulfure. Il est particulièrement abondant dans les roches mafiques et intermédiaires. Les teneurs les plus élevées (>80 mg/kg) seraient observées dans les roches magmatiques basiques riches en minéraux ferromagnésiens. Les roches granitiques contiennent en général beaucoup moins de Cu.<sup>33</sup> Parmi les roches sédimentaires, argiles et schistes présentent des concentrations plus fortes que les roches détritiques (grés, sable).<sup>50</sup> Il est au contraire très peu représenté dans les roches carbonatées.

### iv.2. Le cuivre dans le sol

Les teneurs moyennes en Cu d'un sol non contaminé, sont comprises entre 13 et 24ppm. <sup>56</sup> Goulding et al <sup>25</sup> donnent une concentration maximale 'normale' de 100ppm et une moyenne dans les sols de 20ppm. Les moyennes les plus élevées sont rencontrées dans les chernozems et les sols châtaîns. Les teneurs les plus basses sont observées dans les podzols et dans les histosols. Les ferrasols et les fluvisols peuvent également contenir des teneurs élevées en Cu. <sup>50</sup>

Aux teneurs naturelles, les sols se trouvent également enrichis par l'utilisation excessive de fertilisants et de produits agrosanitaires tels que: les insecticides, les fongicides, les algicides qui sont à la base de sels de Cu, notamment les sulfates de Cu; l'utilisation directe des boues d'épuration sans oublier l'activité industrielle (bains de décapage et bains de plaquage dans l'industrie du Cu et de ses alliages). Les eaux de drainage des régions minières, l'industrie électrique, les activités urbaines (ordures ménagères, brûlage de comestibles et circulation automobiles salage des routes, etc.

### iv.3. Comportement du cuivre dans le sol: spéciation et mobilité

Les nombreuses formes minérales libérées au cours des processus d'altération sont des composés très solubles <sup>56</sup> notamment en milieu acide. Le Cu est donc considéré comme l'élément le plus mobile des métaux lourds, par référence aux processus supergènes. Bien que la formule la plus commune soit, dans les sols,  $\text{Cu}^{2+}$ ; de nombreuses espèces chimiques sont également libérées au cours des processus d'altération. Parmi elles: Cu; CuOH;  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ; CuO;  $\text{Cu}(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ;  $\text{CuCO}_3$ ;  $\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{2-}$ ;  $\text{Cu}(\text{OH})_3^-$ ;  $\text{Cu}(\text{OH})_4^{2-}$ ;  $\text{CuO}_2^-$ . De même quelques formes incluses au sein des minéraux: Cu-O-Fe; Cu-O-Al; Cu-O-Mn. Tous les ions de Cu sont fortement liés aux sites d'échange minéraux et organiques. Selon Adriano <sup>56</sup> 98% du Cu soluble dans le sol se trouvent complexés par la matière organique, alors que Underwood et al, <sup>64</sup> estiment que seulement 80% du Cu soluble est sous forme chélatée. Le Cu réagit très facilement avec les surfaces sorbantes et les constituants organiques du sol. Il est facilement précipité en présence de différents anions, plus particulièrement les anions sulfures, carbonates, hydroxydes. De sorte que finalement le Cu est très peu mobile dans les sols, <sup>64</sup> sauf dans les conditions extrêmes d'acidité (podzols) ou de gleyfication.<sup>24</sup> Ceci fait que le principal danger du Cu vient de son accumulation à la surface des sols. Il semble que dans les sols cultivés très pauvres en argile, sable ou limon, les apports massifs opérés en surface (traitement fongicide) soient capables de migrer en profondeur.

### iv.4. Bio- et phytodisponibilité

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.

Par contre, il est toxique pour les champignons et les algues. Les plantes absorbent le Cu dans la solution du sol. Cependant, les mécanismes impliqués dans cette absorption sont encore flous. Si l'absorption active est, à l'évidence, le mécanisme le plus représenté, il n'en demeure pas moins qu'une absorption passive peut aussi se mettre en place, notamment dans les sols à forte contamination et présentant des signes évidents de phytotoxicité.<sup>64</sup> Le Cu présent dans les racines est entièrement sous forme complexée, mais la pénétration racinaire doit quand même se réaliser à l'état de formes dissociées. La vitesse de pénétration dans les racines est très faible. Elle est la plus faible des éléments essentiels pour les végétaux. Elle diffère en fonction de la spéciation du métal. Underwood et al,<sup>64</sup> ont pu montrer que le Cu anthropogène ajouté à un milieu sous forme de CuO était beaucoup mieux assimilé par une orge que le Cu géogène.

### iv.5. Toxicité – phytotoxicité

Le maximum "normal" rencontré dans les plantes, selon McKenzie,<sup>59</sup> est de 15ppm /MS. Le Cu représente un danger quand il est présent en concentration élevée dans l'environnement. Par son action sur les racines des plantes, le Cu altère leur développement et la perméabilité de leur membrane cellulaire causant le lessivage de certains ions ( $K^+$ ;  $PO_4^{2-}$ ).<sup>64</sup> Il en résulte des effets toxiques sur les plantes et des baisses de rendement.

D'après Pais et Benton,<sup>57</sup> des teneurs totales en  $Cu \leq 7ppm$  entraînent des carences cupriques et en revanche des toxicités apparaissent au-delà de 180ppm. Chez l'homme, des symptômes de toxicité aiguë se manifestent par des diarrhées, des nausées, des vomissements et des irritations intestinales. 1gramme de  $CuSO_4$  constitue une dose mortelle; pour plus de 44 mg/L d'eau de boisson, il y a manifestation de gastro-entérites. La toxicité chronique du Cu n'a pas été démontrée chez l'homme, mais une partie de la population y est sensible: maladie de Wilson.

## v. Le nickel

### v.1. Origine

La plupart des roches de la lithosphère renferme du Ni qui occupe la 23<sup>ème</sup> place dans l'ordre d'abondance des éléments minéraux de la croûte terrestre. Il présente environ 0,016% de celle-ci.



Les teneurs sont élevées dans les roches éruptives ultrabasiques (1400 à 2000ppm),<sup>64</sup> et relativement faible dans les roches éruptives acides (5 à 10ppm).<sup>65</sup> Les roches sédimentaires ont des concentrations qui vont de 5 à 90ppm, avec des concentrations plus élevées dans les roches argileuses et les plus basses dans les roches sableuses.<sup>50</sup>

D'après Mckenzie,<sup>59</sup> la concentration en Ni des roches sédimentaires serait comprise entre 20 et 40ppm. Elle dépasserait 100 mg/kg dans les roches éruptives mais serait très faible dans les roches granitiques (<10ppm). Ni est présent à forte concentration dans les roches ferromagnésiennes où il se substitue partiellement au fer et au magnésium. Il est particulièrement abondant dans les minéraux primaires silicatés et les roches magmatiques basiques et ultrabasiques (péridot, pyroxène) et dans les minéraux secondaires de type serpentinite.

### v.2. Le nickel dans le sol

Dans le sol la teneur totale moyenne de Ni est de 40ppm.<sup>64</sup> Pour Mckenzie<sup>59</sup> le maximum normal est de 80ppm, avec une moyenne de 40ppm. Ces variations sont fonction des roches mères, du type de sol, du degré d'évolution, des teneurs en fractions fines (argiles), en sesquioxides métalliques et surtout des teneurs en humus.<sup>65</sup> Le Ni géogène est fortement associé aux oxydes de fer et de manganèse, aux carbonates ou inclus comme impuretés au sein de divers réseaux cristallins. Pour la plupart des sols moins de 15 à 30 % de la totalité du Ni est extraite avec les oxydes de Mn. En revanche le Ni anthropogène aurait tendance à rester échangeable, à se lier aux matières organiques et aux carbonates (sols calcaires).<sup>20</sup> Le sol peut également se trouver enrichi par des apports dus aux activités industrielles, domestiques et agricoles. Dans la littérature il n'est pas fait mention d'apports atmosphériques.

### v.3. Comportement du nickel dans le sol: spéciation et mobilité

Durant le processus d'altération, le Ni est facilement mobilisable et co-précipite généralement avec les oxydes de fer et de Mn. Cependant à l'inverse des ions  $Mn^{2+}$  et  $Fe^{2+}$ , le  $Ni^{2+}$  est relativement stable dans les solutions aqueuses, et il est capable de migrer sur une grande distance.

Les informations sur la spéciation du Ni dans la solution du sol ne sont pas très fournies, mais les espèces telles que  $Ni^{2+}$ ,  $NiOH^+$ ,  $HNiO_2^{2-}$  et  $Ni(OH)_3^-$  sont présentes lorsque le Ni n'est pas complètement chélaté.<sup>56</sup> Généralement, la solubilité de Ni dans le sol est inversement reliée au pH.

### v.4. Biodisponibilité

Il a été postulé que le Ni associé aux oxydes de fer et de Mn semble être le plus disponible pour la plante.<sup>63</sup> Les plantes absorbent directement le Ni disponible dans la solution du sol jusqu'à ce qu'une certaine concentration soit atteinte (dans la plante). Cette absorption est liée positivement avec la concentration de Ni dans le milieu et le pH du sol,<sup>66</sup> l'espèce et les facteurs pédologiques jouent également un rôle dans l'absorption, mais le facteur le plus important reste le pH du sol. Le passage du pH du sol de 4,5 à 6,5 diminue la teneur en Ni des grains d'avoine d'un facteur de 8 environ. L'origine du métal joue également un rôle important dans sa disponibilité pour la plante. Les céréales absorbent une quantité nettement plus importante de Ni lorsque celui-ci est ajouté au sol, qu'en étant d'origine géologique.<sup>57</sup> Les grains d'avoine accumulent plus de Ni que la paille, alors que pour les autres métaux traces l'accumulation est généralement plus importante dans la paille.<sup>57,58</sup> La teneur en Ni des herbacées est très faible, elle varie entre 0,1 et 1,7 mg/kg. Des effets d'antagonisme sont remarqués entre Ni d'une part et Cu, Zn, Fe d'autre part.<sup>59</sup> Une concentration élevée en Ni dans le milieu diminue l'absorption des autres éléments nutritifs.<sup>65</sup> Selon McKenzie,<sup>59</sup> le maximum "normal" dans les plantes est de 8ppm / MS.

### v.5. Toxicité

Le Ni est un élément phytotoxique<sup>40</sup> une teneur de 50 mg/kg dans le ray-grass entraîne des symptômes de toxicité.<sup>63</sup> La combustion incomplète du charbon fournit du  $Cl_2Ni$  qui est particulièrement toxique<sup>40</sup> provoquant chez l'homme: une toxicité aiguë avec troubles digestifs, convulsions, manifestations asphyxiques et une toxicité chronique avec dermites eczématiformes.

## vi. Le chrome

### vi.1. Origine

La concentration moyenne du Cr dans l'écorce terrestre serait de 100 et 200mg/kg selon les auteurs. Mais cette concentration varie grandement selon le type de roches. D'après McKenzie,<sup>59</sup> le Cr représenterait 0,037%. Les roches magmatiques ultrabasiqes (dunites, serpentine, péridote) sont connues pour être extrêmement riches en Cr (de l'ordre de 1500 à 3000 mg/kg). Dans le cas des roches sédimentaires, la teneur en Cr sera beaucoup tributaire de la teneur en fer et éventuellement, de la présence de minéraux détritiques riches en Cr (augite, serpentine).<sup>33</sup> Le Cr est essentiellement obtenu à partir de la chromite ( $FeCr_2O_4$ ).

### vi.2. Le chrome dans le sol

La concentration du Cr dans les sols varierait de l'état de traces à 2,4%.<sup>59</sup> D'après Mckenzie, <sup>59</sup> le maximum "normal" dans les sols est de 150ppm; la moyenne est de 100ppm. Les sols peuvent également être enrichis par les rejets (retombées atmosphériques, les boues de stations d'épuration) en provenance des différentes sources traitant le Cr. Les minerais de Cr ont trois grands domaines d'application: l'industrie métallurgique (ferrochromes, silichromes et autres éléments d'addition); l'industrie des pierres réfractaires (fours métallurgiques et de verrerie, briquetage des hauts fourneaux); l'industrie chimique, qui assure en majeure partie la fabrication des diverses combinaisons du chrome, dont la plus importante est le bichromate de sodium. Ces industries constituent les principales sources de pollution par le biais des rejets de leurs effluents, les fumées, etc. <sup>40,63</sup>

### vi.3. Comportement du chrome dans le sol: spéciation et mobilité

Le Cr existe sous plusieurs degrés d'oxydation:  $\text{Cr}^{3+}$ ;  $\text{Cr}_2\text{O}_7^-$ ;  $\text{CrO}_4^-$ ;  $\text{CrOH}^{++}$ ;  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ;  $\text{CrO}_2^-$ ;  $\text{Cr}^0$ ; etc. D'après Mckenzie, <sup>59</sup> le Cr se trouve dans le sol sous deux formes: Cr (III) et Cr (VI). Le Cr (VI) est largement transformé en Cr (III) dans les sols et les sédiments (favorisé en conditions anaérobies et pH bas). Le Cr (III) est relativement immobile tandis que Cr (VI) serait mobile. Dans le milieu naturel, seul les oxydes de Mn seraient capables d'oxyder le Cr (III) en Cr (VI). D'après Giller et al, <sup>51</sup> le Cr est réputé comme présentant une très faible mobilité, qu'il ait une origine naturelle ou anthropique.

### vi.4. Bio et phytodisponibilité

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 maximum "normal" dans les plantes est de 0,1ppm /MS. <sup>59</sup>

### vi.5. Toxicité

Inhalé, le Cr (III) peut provoquer des cancers des voies respiratoires ; trouble du métabolisme du glucose; atteintes rénales. Le Cr (VI) provoque des hémorragies gastro-intestinales; il est responsable des ulcères cutanés et d'ulcères de la muqueuse nasale, de dermites, etc.

### vii. L'arsenic

L'arsenic est un élément chimique semi-métallique de la famille des pnictogènes, de symbole As et de numéro atomique 33, présentant des propriétés intermédiaires entre celles des métaux et des non-métaux.

Son nom vient du latin *arsenicum*, tiré du grec *arsenikon* (« qui dompte le mâle ») en raison de sa forte toxicité. Le prénom Arsène est tiré de la même racine grecque *arsen*"mâle".

### vii.1.Toxicologie

La toxicité de l'arsenic dépend de sa nature chimique : l'arsenic inorganique est plus toxique que l'« arsenic organique »<sup>64</sup>. Elle dépend de son degré d'oxydation:



L'arsenic a trois effets majeurs au niveau biochimique:

- il découple la « chaîne respiratoire » en se substituant au phosphore (dans le phosphate, dans la réaction de formation de l'ATP).
- les protéines coagulent quand la concentration en arsenic inorganique est forte: réaction arsenic/liens sulfures ou réaction arsenic/site actif.
- l'arsenic se complexe avec les groupes sulfhydriques des enzymes.

L'arsenic sous forme pure méthylée ou de composé minéral est dangereux même à faible dose, surtout en cas d'exposition répétée. Dans le cas d'une intoxication aiguë, les symptômes sont immédiats, avec comme signes caractéristiques des vomissements, des douleurs œsophagiennes et abdominales et des diarrhées sanguinolentes.

L'exposition chronique à l'arsenic à de petites doses (dans une eau de boisson polluée par exemple) est un facteur de risque:<sup>57</sup>

- de cancer du poumon, inscrit à ce titre dans les tableaux de maladies professionnelles;
- de cancer de la peau (en cas d'exposition prolongée);
- de cancer de la vessie;
- de cancer du rein;
- d'athérosclérose (notamment de la carotide),<sup>64</sup> ou responsable d'autres maladies cardiovasculaires.<sup>66</sup>
- probablement de maladies respiratoires.<sup>65</sup>

Par ailleurs, les teneurs en ETM admises pour définir une toxicité des plantes et une contamination des sols en éléments traces métalliques sont données dans les tableaux (I-5 - I-7).

*Tableau I-5: Teneurs critiques en métaux lourds (mg/kg/MS) pour les plantes.* <sup>54-57</sup>

	Déficienc	Toxicité
<b>Pb</b>	-	12-300
<b>Zn</b>	15-20	100-400
<b>Ni</b>	1-5	10-100
<b>Cu</b>	3-5	20-50
<b>Cd</b>	-	5
<b>Mn</b>	10-20	300-500
<b>Cr</b>	-	3
<b>As</b>	1-2	40
<b>Fe</b>	50	1000
<b>Co</b>	0,2	15-50

*Tableau I-6: Teneurs normales en métaux lourds (mg/kg/MS) pour les plantes.* <sup>50,52,53,57</sup>

	Teneurs dans les plantes
<b>Pb</b>	1,0
<b>Zn</b>	50
<b>Ni</b>	1,5
<b>Cu</b>	10
<b>Cd</b>	0,01–1
<b>Mn</b>	200
<b>Cr</b>	1,5
<b>As</b>	3 – 10
<b>Fe</b>	150
<b>Co</b>	0,2

**Tableau I-7: Différentes normes et références – teneurs totales des ETM dans les sols (en mg/kg/MS) les valeurs *en gras* sont celles prises en considération dans notre étude à titre comparative.** <sup>20,33,49,63,66</sup>

Norme	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Mn	As
<b>D. Baise, 1997 et 2002</b>										
Sol typique	<b>2,9</b>	-	<b>55</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>258</b>	<b>320</b>	<b>500-1000</b>	-	-
Sédiments	2,4	?	85	230	-	480	2550	-	-	-
Sol agricole	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>150</b>	<b>100</b>	<b>1-100</b>	<b>100</b>	<b>300</b>	<b>1000</b>	<b>270</b>	<b>40</b>
Valeurs d'intervention	12	300	380	190	250	530	720	2050	3000	-
<b>Article 11 de l'arrêté du 8/01/1998</b>	<b>2</b>	<b>23</b>	<b>150</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>300</b>	<b>40000</b>	<b>300</b>	<b>29</b>
<b>France (1985)</b>										
Norme AFNOR NF U44-041	<b>2</b>	<b>23</b>	<b>150</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>300</b>	<b>40000</b>	<b>300</b>	<b>29</b>
<b>France P. M, Godin (1983)</b>										
Seuil d'anomalie	2	30	150	100	50	100	300			
Seuil d'investigation	4	60	300	200	100	200	600	-	-	-
Seuil de traitement	10	150	750	500	250	500	1500			
Seuil d'urgence	10	300	1500	1000	500	1000	3000			
<b>Suisse (1986)</b>										
Valeurs indicatives (HNO <sub>3</sub> )	0,8	25	75	50	50	50	200			
Valeurs indicatives NaNO <sub>3</sub> 0,1M)	0,03	-	-	0,7	0,2	1	0,5	-	-	-
<b>Pays-Bas (1983)</b>										
valeurs de référence A	1,5	25	100	50	50	50	200	-	-	-
Valeurs de référence B	5	50	250	100	100	150	500			
Valeurs de référence C	20	300	800	500	500	600	3000			
<b>Pays-Bas (1987)</b>										
Valeurs de référence A	0,8	20	100	36	35	85	140	-	-	-
Proposition 1993 valeurs C	12	240	380	190	210	530	720			
<b>Québec (1988)</b>										
Critère indicatif A	1,5	15	75	50	50	50	100	-	-	-
Critère indicatif B	5	50	250	100	100	200	500			
Critère indicatif C	20	300	800	500	500	600	1500			
<b>Directive Européenne (1986)</b>										
Valeurs limites	1	?	?	50	30	50	150	-	-	-
Valeurs limites	3	?	?	140	75	300	300			
<b>Grande -Bretagne</b>										
Jardins familiaux	3	?	600	?	?	500	?			
Espaces de loisirs	15	?	100	?	?	2000	?	-	-	-
Production agricole (EDTA)										
<b>Canada</b>										
Federal remediation criteria	3	40	750	150	150	375	600	-	-	-
<b>Ontario clean up guidelines</b>										
Residential	3	50	1000	200	200	500	800	-	-	-
commercial	8	100	1000	300	200	1000	800			

### I.2.3. Place spécifique des métaux dans l'économie mondiale

Depuis la révolution industrielle au XIX<sup>ème</sup> siècle, les métaux occupent une place prépondérante dans l'activité économique mondiale. Les industries du fer, de l'acier, de l'aluminium et du cuivre ont majoritairement contribué à notre développement technologique, à travers la conception d'outils et de machines de plus en plus sophistiqués, eux-mêmes permettant ensuite la fabrication de produits toujours plus évolués. Il est toutefois remarquable qu'avant même le début de l'ère industrielle, les métaux ont eu un rôle stratégique dans les relations internationales: l'insuffisance en ressources minières des pays les plus avancés, notamment en Europe, a ainsi motivé la colonisation de territoires mieux dotés en richesses naturelles. Dans le cas de la France, on peut citer la Mauritanie pour le fer, la Nouvelle Calédonie pour le nickel, le Maroc pour les phosphates, la Guinée pour la bauxite, la Guyane pour l'or, etc.

Aujourd'hui, on distingue:

- les métaux d'usage courant, dont le Tableau I-8 recense les principales utilisations dans l'industrie. La fabrication d'alliages est naturellement l'application dominante, mais plusieurs métaux sont également employés dans le secteur de la chimie ou pour des applications spécifiques telles que les piles (pour le cadmium) ou les batteries (pour le plomb).
- les éléments plus rares qui sont l'objet d'un intérêt économique accru en raison de leur rôle stratégique pour certaines applications,<sup>67,68</sup> c'est notamment le cas du scandium<sup>69</sup> (fort potentiel dans l'aéronautique en remplacement du titane), du platine<sup>70</sup> (piles à combustible, catalyse Diesel), du rhénium<sup>71</sup> (utilisé pour fabriquer des superalliages dans l'aéronautique), du germanium, de l'indium ou du tantale.<sup>72</sup>

**Tableau I-8:** Utilisation actuelle courante des métaux dans l'industrie: abondance moyenne de chaque élément dans la croûte terrestre. <sup>73,74</sup>

Métal	Utilisation	Métal	Utilisation
Al (8,1%)	transport 25% bâtiment 20% emballage 20% construction électrique 10% autres 25%	Ni (75ppm)	acier inoxydable 65% alliages de nickel 15% aciers et fontes alliées 7,5% revêtements de surface 7,5% autres 5%
Cd (0,1ppm)	piles 70% pigments 13% autres usages industriels 17%	Hg (20ppb*)	cellules d'électrolyse 50% construction électrique 25% autres 25%
Cr (100ppm)	aciers inoxydables 65 % chimie et réfractaires 20% utilisations métallurgiques diverses 15%	Pb (10ppm )	batteries 70% laminés et munitions 10% chimie 10%, autres 10%
Co (25ppm)	superalliages 72,6% aimants 9% carbures cémentés 3,4% céramiques 9,6% chimie (pigments, catalyseurs, agents siccatifs... ) 5,4%	Zn (80ppm)	galvanisation 50% pièces moulées 15% laiton et autres métaux d'alliages 20% demi-produits 5% chimie et autres 10 %
Cu (50ppm)	construction électrique 55% bâtiment 20% équipement industriel 10% transport 5% autres 10%	Sn (ppm)**	fer blanc 30% soudure 30% chimie 15% étain ouvré et divers 25%
Fe (5,0%)	sidérurgie 99% autres 1%	Mo (1,5ppm)	ferro-molybdène et alliages 70% chimie (catalyseurs) 30%

\* ppb: partie par milliard ( billion ), soit  $10^{-9}$ . 1 ppb = 0,000 000 1%.

\*\* ppm: partie par million, soit  $10^{-6}$ . 1 ppm = 0,000 1%.



---

## **CHAPIRE II. Contexte expérimental et méthodes analytiques**

---

Afin d'étudier les risques d'accumulation, contamination et mobilité des métaux lourds (Pb, Cd, Zn, ... .) dans des plantes alimentaires cultivées, juxtaposées à la décharge industrielle d'ALZINC, nous avons sélectionné trois échantillons des sols à des régions différentes.

Dans ce chapitre on va présenter les méthodes analytiques utilisées au cours de notre étude. il regroupe les protocoles d'utilisation courante, comme: méthodes de prélèvement, caractéristiques physico-chimiques, la mise en solution de matériaux qui permet de déterminer les teneurs totales en éléments métalliques contenus dans les échantillons suivi par le protocole d'extraction séquentielle sélectionné y est également explicité, il permet s'établir la spéciation des différents éléments afin de mieux comprendre et d'expliquer le comportement des éléments traces dans le sol, ainsi que la méthode d'analyse misé à notre disposition comme ICP-AES.

**Protocoles expérimentaux:** la partie expérimentale de notre étude est divisée en deux parties distinctes:

- ✓ une partie, échantillonnage au champ;
- ✓ une partie, analyses au laboratoire.

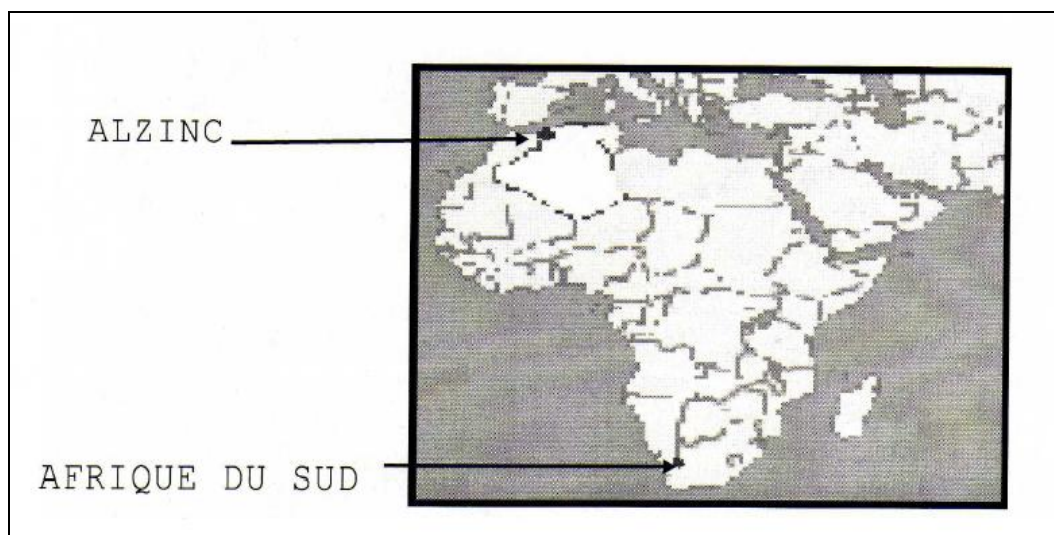
## II.1. TRAVAIL AU CHAMP

### II.1.1. Description de la zone industrielle d'ALZINC

#### II.1.1.1. Localité

La société algérienne de zinc (Alzinc), est une filiation de METANOF, rattachée au holding SGP TRANSOLB. La société ALZINC a pour objet conformément à ses statuts, la production et la commercialisation du zinc et de ses alliages (Zamac 3, Zamac 5 etc.) de l'acide sulfurique et du cuivre cathodique.

La zone industrielle d'ALZINC est l'unique producteur du zinc électrolytique au monde arabe et le deuxième en Afrique. C'est un pôle industriel de très grande dimension à vocation métallurgique, situé sur la rive ouest de la ville de Ghazaouet wilaya de Tlemcen étalé sur une superficie de 22 hectares (Fig.II-1).



**Figure II-1:** Localisation de l'usine d'ALZINC- Ghazaouet - Tlemcen.

#### II.1.1.2. Historique

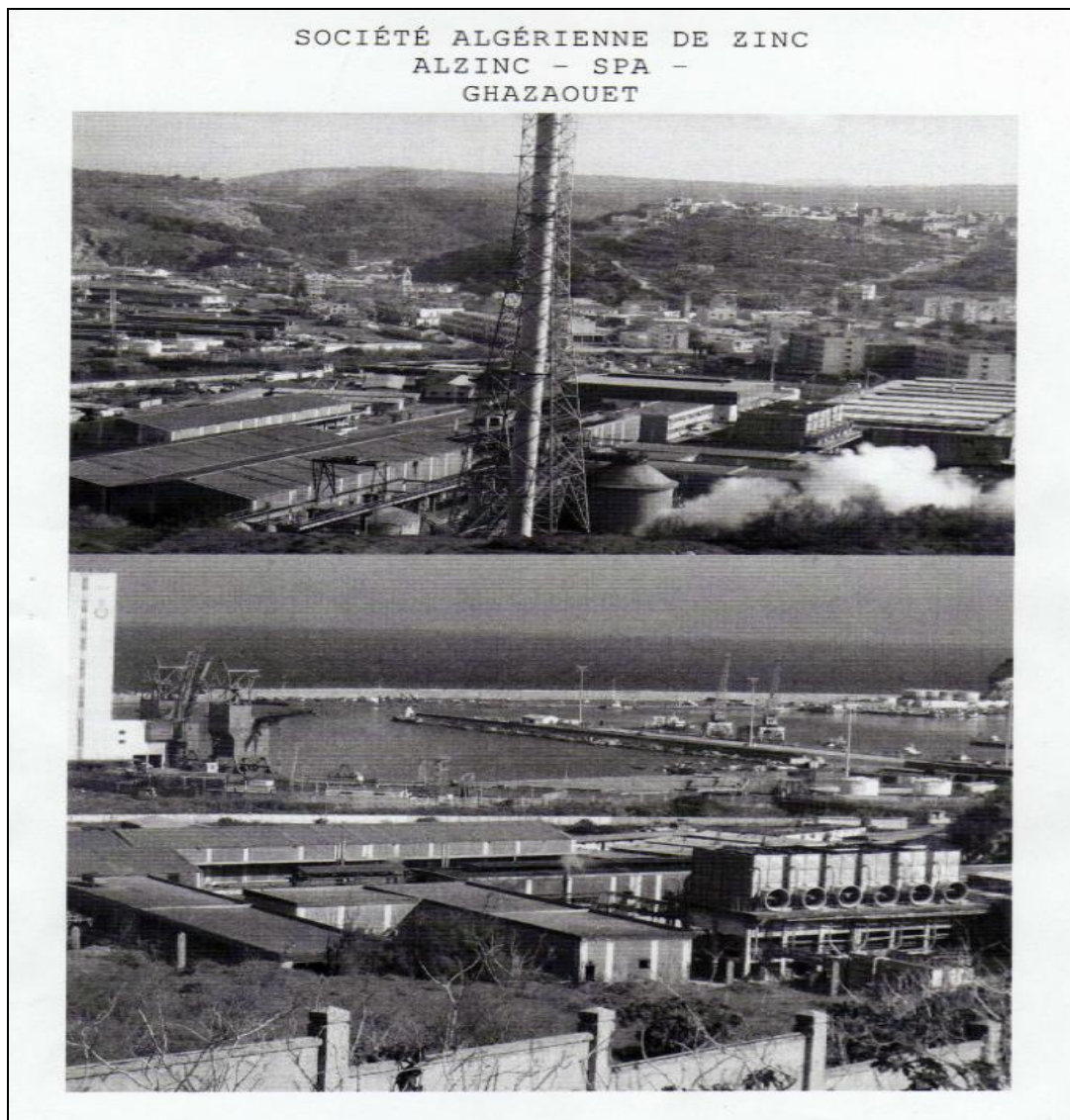
Les travaux de déblaiement de tracement de terrain ont débuté en 1968, ils ont été exécutés par les services spécialisés de la DNC / ANP.

Les travaux de génie civil, confiés à société nationale SONATIBA ont été lancés au début de l'année 1971, mais vu leur importance et leur complexité ils ont duré jusqu'à 1974.

Les essais de démarrage de l'atelier grillage acide et des installations ont débuté le troisième semestre de l'année 1974.

Tandis que les ateliers de lixiviation purification de l'électrolyse de la refonte de la poudre de zinc ont eu lieu en décembre 1974.

La première feuille de zinc cathodique a été produite le 16 décembre 1974.



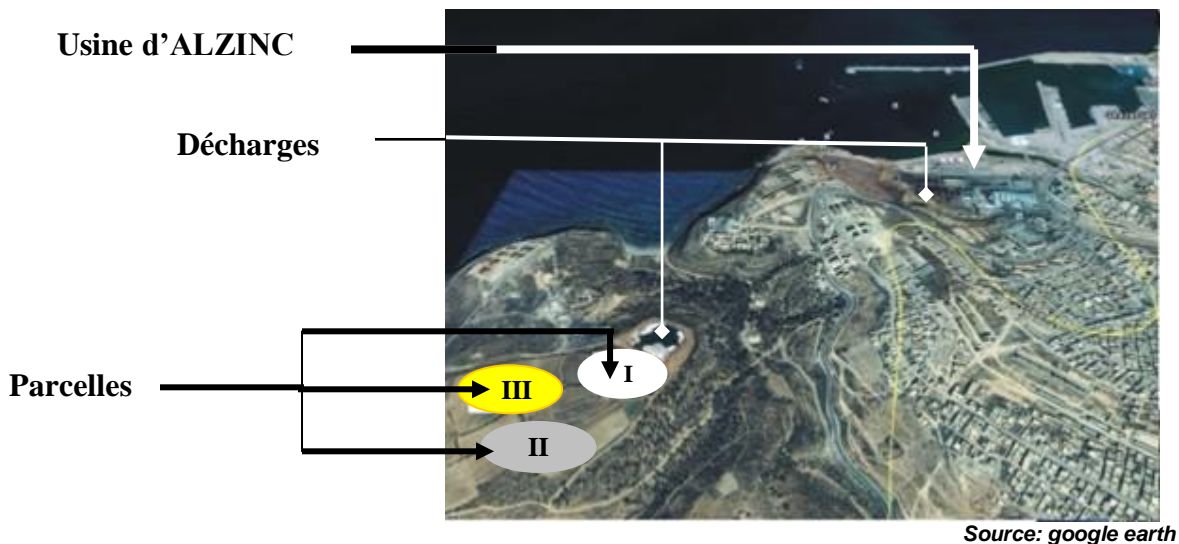
**Photo de l'usine d'ALZINC**

## II.1.2. Matériaux étudiés

### II.1.2.1. Origine des échantillons

Les échantillons sélectionnés pour cette étude sont trois sols provenant d'un site agricole situé près des rejets industriels d'usine d'ALZINC et aussi près des déchets domestiques solides et liquides (Fig.II-2). Pour cela, trois parcelles différentes où sont cultivés trois végétaux différents, deux légumes: artichaut et poivron et un fruit : raisin, (Fig.II-3) sont choisis.

- ✓ Echantillon I (**sol R**): une superficie d'environ 1,5ha; Pente: 2-6%, où sont cultivés les raisins.
- ✓ Echantillon II (**sol K**): une superficie d'environ 1ha; Pente: 10%, où sont cultivés les artichauts.
- ✓ Echantillon III (**sol F**): une superficie d'environ 1,5ha; Pente: 0-2%, où sont cultivés les poivrons.



**Figure II-2:** Zone d'étude: parcelles de prélèvement des échantillons.

Les plantes alimentaires: le poivron (*Capsicum annuum*), l'artichaut (*Cynara cardunculus* var<sup>♦</sup> *scolymus*) et le raisin (*Vitis vinifera*) ont été prélevés annuellement depuis été 2006 jusqu'à l'été 2010 au moment de leurs récoltes avec leurs sols correspondants en deux différentes profondeurs 0-20cm et 20-40cm.

Le prélèvement des deux couches du sol permet la comparaison de stocks des polluants métalliques.

♦ Var: variété



Poivron (*Capsicum annuum*)/ Famille: solanacées.



Artichaut (*Cynara cardunculus* var. *scolymus*)/ Famille: astéracées



Raisin (*Vitis vinifera*)/ Famille: vitacées.

### II.1.2.2. Sol

#### i. Prélèvement

Pour une analyse, une caractérisation ou un diagnostic, la date de prélèvement des sols importe peu au cours d'une année. Toutefois, après apport de matière fertilisante, il faut éviter de prélever tant que la couche n'a pas trouvé une homogénéité suffisante et, à cette fin, il est recommandé d'attendre 1 à 3 mois après apport d'engrais ou d'amendement minéral cuit et 6 mois après un apport de tout autre amendement.

Tous les sols et les plantes choisis à notre étude ont été prélevés respectivement quelques jours avant la récolte et la consommation.

Les échantillons ont été prélevés sur une épaisseur de 20 et 40cm en réalisant 5 prises afin de limiter l'hétérogénéité horizontale du milieu (Fig.II-3).

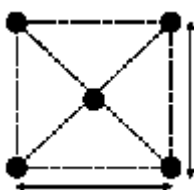


Figure II-3: Mode de prélèvement.

#### ii. Transport

Les échantillons sont transportés de façon à minimiser les modifications de la teneur en eau du sol et sont conservés à l'obscurité avec libre d'accès. Un sac de polyéthylène fermé de manière lâche est généralement suffisant. Il faut éviter des conditions environnementales extrêmes, le sol doit rester le plus frais possible sans toutefois qu'il ne puisse être déshydraté. Éviter de l'exposer à la lumière pendant longtemps car ceci favorise la formation des algues à sa surface, et aussi éviter de le tasser.

Une fois au laboratoire, les sols ont été traités dans les plus brefs délais après leurs prélèvements après avoir enlever la végétation, les pierres et les impuretés. Ensuite les sols ont été étalés pour faciliter l'opération de tamisage.

## II.2. MATÉRIEL ANALYTIQUE (Travail au laboratoire)

### II.2.1. Protocoles analytiques

L'analyse des sols est un procédé complexe de par la multiplicité des paramètres à mesurer pour caractériser complètement un échantillon: teneur en eau, granulométrie, composition minéralogique, caractérisation des matières organiques, composition élémentaire (organique et totale), pH, carbonates, capacité d'échange cationique et anionique,

concentration en métaux, etc. À cette fin, un arsenal de méthodes normalisées est mis au point pour mesurer tel ou tel paramètre.

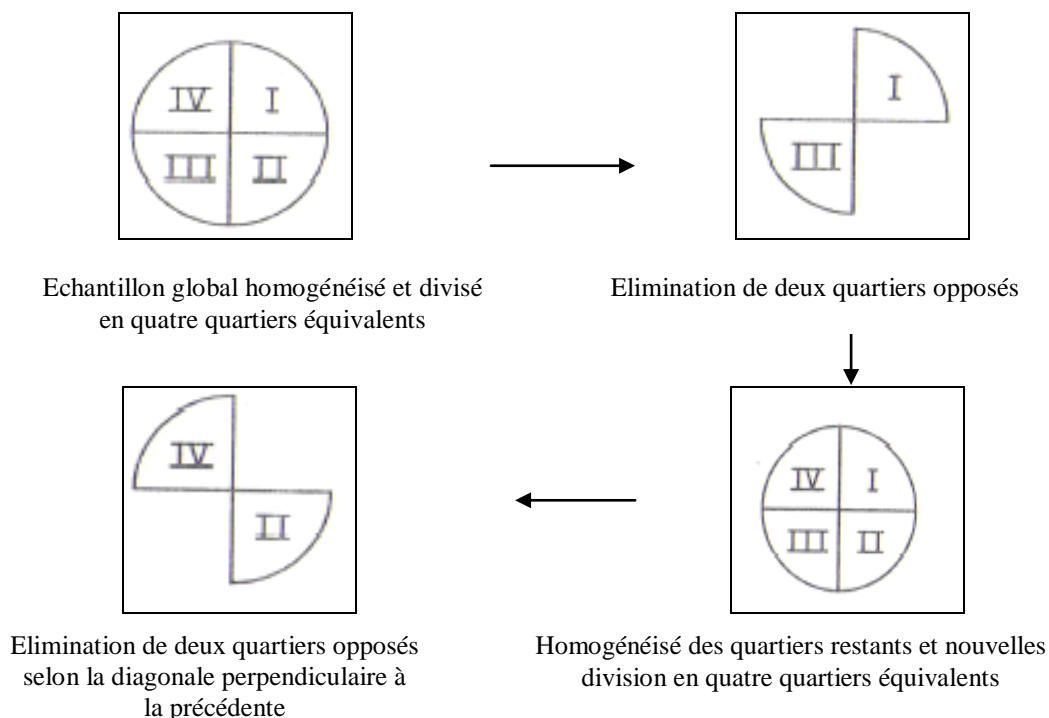
Pour les éléments traces métalliques dans l'échantillon des sols, des méthodes référencées qui consistent à mesurer leur teneur totale ainsi que leur spéciation sont utilisées. <sup>75,77,78</sup>

En chimie analytique, la plupart des analyses de métaux lourds dans les sols se font en deux étapes: une étape de mise en solution de l'échantillon, qui consiste à extraire l'élément d'intérêt sous une forme soluble facilement analysable, et la phase de mesure proprement dite, généralement une technique spectrométrique. Par ailleurs, il existe certaines techniques d'analyse telles que fluorescence par rayon-X qui s'appliquent directement à l'échantillon solide. <sup>75</sup>

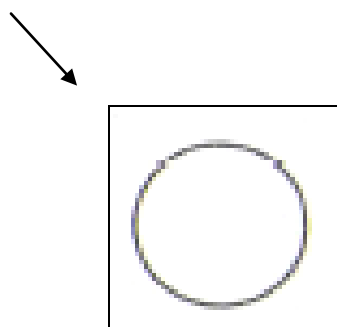
## II.2.2. Caractérisations physico-chimiques

### II.2.2.1. Préparations des échantillons avant l'analyse, norme AFNOR NF X 31-427

Un échantillonnage intermédiaire s'est fait selon la technique des quartages de façon à minimiser les risques d'erreur sur la composition des sols liés à leur hétérogénéité et pour obtenir la masse de résidus nécessaire pour les analyses et tests (Fig.II-4). Les particules de taille supérieure à 2 mm sont rejetées. Grâce à cette manipulation, l'erreur liée à l'échantillonnage ne dépasse pas 10%. Le résidu résultant des sols est ainsi préparé aux traitements chimiques.







Homogénéisation des quartiers restants et constitution de l'échantillon pour laboratoire (500g) ou poursuite du quartage

**Figure II-4:** Constitution de l'échantillon pour laboratoire (principe de quartage).

### II.2.2.2. Détermination de l'humidité résiduelle, norme AFNOR NF X 31-102 (1992)

L'humidité résiduelle est définie comme la masse perdue après séchage à 105°C d'un échantillon dont la masse est constante à 40°C. Sa mesure permet de déterminer la masse sèche d'un échantillon du sol. L'humidité résiduelle  $H$  est exprimée en pourcentage massique et elle est calculée par la relation suivante:

$$H = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100$$

- $m_0$ : étant la masse initiale d'échantillon séché à 40°C et ;
- $m_1$ : sa masse finale, après séchage à 105°C pendant 24 heures et refroidissement.

### II.2.2.3. Analyse granulométrique des sols, norme AFNOR NF X31-107

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 X31-107<sup>75</sup> dans le laboratoire d'analyses des sols de génie civil - Université de Tlemcen. Le protocole de fractionnement mettant ainsi en œuvre deux méthodes complémentaires (fractionnement par voie sèche jusqu'à 80 $\mu$ m puis séparation gravimétrique jusqu'à 2 $\mu$ m par sédimentation des particules (selon de la loi Stokes) permet de classer les particules de la façon suivante, en fonction de leur diamètre (tableau II-2).<sup>39</sup>

- ✓ Fraction grossière (diamètre ( $d$ ) des particules > 2 mm): cailloux, graviers.
- ✓ Fraction intermédiaire constituée de:
  - sables: particules de 2 mm à 50  $\mu$ m (sable grossiers: 2 mm à 0,2 mm; sable fins: 0,2 mm à 50  $\mu$ m);

- limons: particules de 50  $\mu\text{m}$  à 2  $\mu\text{m}$  (limons grossiers: 50  $\mu\text{m}$  à 20  $\mu\text{m}$ ; limons fins: 20  $\mu\text{m}$  à 2  $\mu\text{m}$ .)
- ✓ Fractions fine ( $d \leq 2 \mu\text{m}$ ): cette fraction est communément appelée argile.

*Tableau II-1: Types des sols selon la classification USCS/LCPC.*

Classe	Définition	Caractéristique	Sous-classe
<b>A</b>	Sols fins	$D_{\text{max}} \leq 50\text{mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} > 35\%$	A1 à A4 selon VBS ou IP
<b>B</b>	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{\text{max}} \leq 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} \leq 35\%$	B1 à B6 selon VBS, IP et tamisat.
<b>C</b>	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{\text{max}} > 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} \leq 35\%$	30 sous- classes selon VBS, IP et tamisat à 50mm
<b>D</b>	Sols insensibles à l'eau avec fines		D1 à D3
<b>R</b>	Matériaux rocheux	Voir la norme NF P 11-300	
<b>F</b>	Sols organiques et sous-produits industriels	Voir la norme NF P 11-300	

**D<sub>max</sub>** : diamètre pour le quel 95% des grains du sol ont une dimension inférieure.  
**VBS** : Valeur au bleu de méthylène du sol mesurée selon la norme NF P 94-068 et exprimée en grammes de bleu pour 100g de sol ;  
**IP**: Indice de plasticité mesuré selon la norme NF P 94-051 et exprimé en intervalle de teneur en eau (en pourcentage)

## i. Granulométrie par tamisage, norme AFNOR NF X31-101

### i.1. PRINCIPE

Le principe de cette manipulation consiste à prendre un échantillon de sol séché au préambule et de le verser dans une colonne de tamis classés dans l'ordre croissant des ouvertures de bas en haut (Fig.II-5). La pesée des refus des tamis permet de tracer la courbe granulométrie.



**Figure II-5:** Dispositif expérimental de la granulométrie par tamisage.

## i.2. CALCUL

Le calcul des pourcentages des fractions passantes (refus) se fait selon la formule indiquée dans le tableau II-2.

**Tableau II-2:** Calcul des pourcentages des fractions passantes (refus) ( M = 1000 g).

Ouverture des tamis (mm)	Echantillon	Masse des refus partiels Ri (g)	Masse des refus cumulés Rn (g)	Pourcentage des refus cumulés $R_n/P_s \cdot 100 \%$	Pourcentage des tamis cumulés $100 - (R_n/P_s) \%$	Poids sec de l'échantillon (g)
5		$m_1$	$m_1$	$R_1 = 100 * (m_1 / M)$	$T_1 = 100 - R_1$	M
3,15		$m_2$	$m_1 + m_2$	$R_2 = 100 * (m_1 / M)$	$T_2 = 100 - R_2$	M
2		$m_3$	$m_1 + m_2 + m_3$	$R_3 = 100 * (m_3 / M)$	$T_3 = 100 - R_3$	M
1		$m_4$	.....	$R_4 = 100 * (m_4 / M)$	$T_4 = 100 - R_4$	M
0,5		$m_5$	.....	$R_5 = 100 * (m_5 / M)$	$T_5 = 100 - R_5$	M
0,2		$m_6$	.....	$R_6 = 100 * (m_6 / M)$	$T_6 = 100 - R_6$	M
0,1		$m_7$	.....	$R_7 = 100 * (m_7 / M)$	$T_7 = 100 - R_7$	M
0,083		$m_8$	.....	$R_8 = 100 * (m_8 / M)$	$T_8 = 100 - R_8$	M
<0,083 (fond)		$m_9$	.....	$R_9 = 100 * (m_9 / M)$	$T_9 = 100 - R_9$	M

$P_s = M = 1000 \text{ g}$

## ii. Granulométrie par sédimentation, norme AFNOR NF X31-107 (1983)

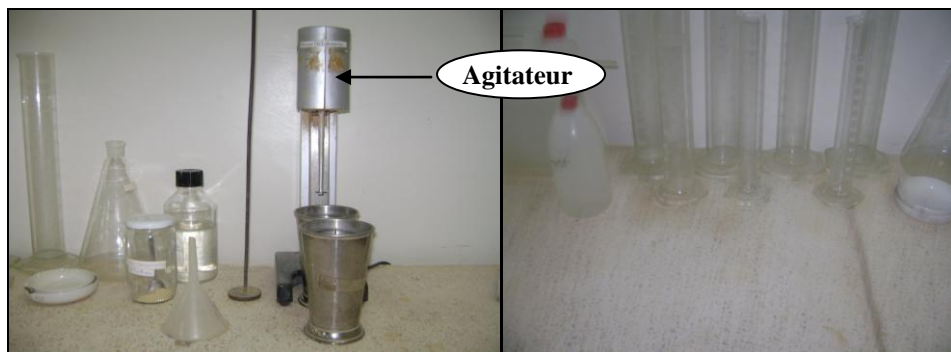
### ii.1. PRINCIPE

La sédimentation complète l'analyse granulométrique par tamisage, elle donne la répartition des grains de diamètre inférieur à 80 micromètres. (< 80  $\mu\text{m}$ ).

### ii. MODE OPÉRATOIRE

1. Prendre deux éprouvettes à essais de 1 litre de contenance.
2. Prendre 60 mL de la solution de défloculation et ajouter 440 mL d'eau distillée pour obtenir une solution 500 mL.
3. Diviser la solution obtenue (500 mL) entre les deux éprouvette à raison de 250 mL chacune.
4. Prendre l'une des deux éprouvettes et la compléter avec de l'eau distillée jusqu'à 1 litre. Cette éprouvette sera appelée dorénavant l'éprouvette B (l'autre éprouvette sera dite l'éprouvette A).
5. Prendre 20 g de sol
6. Verser ces 20 g dans le récipient de l'agitateur mécanique (Fig.II-6) et verser dessus une certaine quantité de la solution de l'éprouvette A.
7. Procéder à l'agitation mécanique pendant environ 3 minutes.

8. Verser la suspension dans l'éprouvette A (bien rincer le récipient et les ailettes pour ne pas perdre le matériau).
9. Compléter l'éprouvette A avec de l'eau distillée jusqu'à 1 litre.
10. Procéder à une homogénéisation de la suspension à l'aide de l'agitateur manuel.
11. Introduire le densimètre dans la suspension et procéder aux lectures (on les appellera  $R_t$ ).  
Les temps de lectures sont : 30sec; 1min; 2min; 5min; 10min; 60min.
  - Pour les 5 premières lectures, le densimètre n'est pas retiré de la suspension.
  - Après la 5ème lecture, une fois celle-ci effectuée, et ceci seront le cas pour le reste des lectures, le densimètre est retiré de la suspension, nettoyer et ranger soigneusement.
  - Pour reprendre les lectures et à chaque fois, le densimètre est introduite dans la suspension environ 30 seconde avant la lecture.
12. A la fin des lectures, le densimètre est retiré de l'éprouvette A, introduit dans l'éprouvette B.
13. Procéder à la lecture de la densité de la solution de l'éprouvette B (on appellera  $R_s$ ).
14. Retirer le densimètre, le nettoyer et le ranger définitivement.
15. A l'aide du thermomètre, procéder à la température de la solution de l'éprouvette B.



**Figure II-6:** Dispositif expérimental de la granulométrie par sédimentation (Laboratoire de génie civil, pole de Chetouane, université de Tlemcen).

### iii. CALCUL

Lors de la décantation des grains solides en suspension dans l'eau, les grains les plus gros chutent plus rapidement que les plus petites. La vitesse de chute est directement liée à leur diamètre (loi de Stokes), cette relation s'écrit:

$$V = D^2 \cdot g \cdot (\gamma_s - \gamma_w) / 18\eta$$

- V: vitesse de décantation de la particule,
- g: accélération de pesanteur,

- $\gamma_s$ : poids spécifique de la particule (valeurs: 26,5 kN/m<sup>3</sup>),
- $\gamma_w$ : poids spécifique de l'eau ( $\gamma_w = 10$  kN/m<sup>3</sup>),
- $\eta$ : viscosité du liquide de décantation.
- le diamètre des particules inférieur à 80  $\mu\text{m}$  est calculé comme suivant :

$$D = K (H_t / t)^{1/2} \text{ avec } K^2 = 18\eta / (\gamma_s - \gamma_w)$$

- $H_t$ : le profondeur du centre de poussée dans la suspension à t l'instant t (t= temps de lecture),
- $H_t = H - 100 H_1 (R_c - R_t) - H_c$ ,
- $H = 22,2\text{cm}$  (hauteur séparent le milieu du bulbe du densimètre 1,0000),
- $H_1 = 3,8\text{cm}$  (distance entre graduation 1,0000 et 1,0100),
- $R_c$  = la lecture du densimètre à t,
- $R_t$  = la lecture du densimètre dans l'éprouvette témoin,
- $H_c$  = la hauteur de déplacement du densimètre de la solution (Annexe 01, page: 241).

**Remarque:** La défloculation a été réalisé par une solution de sodium poly-phosphate ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>x</sub>, masse molaire égale 101,96 g/mol ( $50 \pm 0,005$  g dans un litre d'eau) pour séparer les particules.

#### II.2.2.4. Détermination du pH, norme AFNOR NF X31-103 (1992)

##### i. POTENTIEL D'HYDROGÈNE

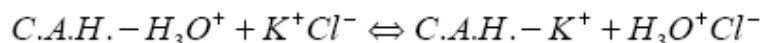
Le pH fait partie d'une des plus importantes caractéristiques physico-chimiques des sols, car la spéciation, et donc la mobilité et la biodisponibilité des éléments traces métalliques sont liées à sa valeur. Le pH est défini par la relation:

$$pH = -\log a_{H^+}$$

Où  $a_{H^+}$  est l'activité des ions d'hydrogène en solution. En solution diluée, l'activité peut être considérée égale à la concentration. Puisque le pH ne peut être mesuré qu'en solution, le pH du sol est en fait le pH d'une solution en équilibre avec lui. Ainsi, le principe de mesure du pH des sols est la mise en équilibre ionique entre la phase solide et la phase liquide. On mesure la différence de potentiel existant entre une électrode de mesure et une électrode de référence plongées dans une suspension aqueuse en équilibre. Ces mesures peuvent être réalisées dans des conditions différentes. Selon les méthodes, le rapport masse de sol / volume de la solution peut varier de 1/1 à 1/10.<sup>79</sup> De même, les suspensions peuvent être réalisées avec de l'eau distillée, détermination d'acidité réelle, ou bien avec des solutions salines telles que le chlorure de potassium ou le chlorure de calcium, détermination de

l'acidité potentielle. L'acidité réelle prend en compte uniquement les ions  $H_3O^+$  libérés dans la solution par le sol, contrairement à l'acidité potentielle qui prend en compte également les ions  $H_3O^+$  échangeables, retenus notamment par les complexes argilo - humiques (C.A.H.);<sup>80</sup> ces derniers sont susceptibles de fixer des ions  $H_3O^+$  capables de passer dans la solution du sol par l'échange avec des cations.

Dans ce cas, le pH du sol dans une solution de KCl est souvent plus acide que le pH du sol dans l'eau, des ions  $H_3O^+$  du sol étant libérés par échange avec le potassium de la solution.



Les normes AFNOR X 31-103 et AFNOR X 31-104 respectivement préconisent la détermination du pH du sol dans l'eau et dans une solution de KCl 1M et  $CaCl_2$  0,01M.

### ii. PRINCIPE

Une suspension de sol est préparée dans cinq fois son volume, au choix:

- d'eau;
- d'une solution de chlorure de potassium (KCl) à 1 mol/L;
- d'une solution de chlorure de calcium ( $CaCl_2$ ) à 0,01 mol/L.

Le pH est mesuré à l'aide d'un pH-mètre.

### iii. REACTIFS

Tous les réactifs utilisés sont de type uniquement analytique.

Eau, ayant une conductivité inférieure ou égale à 0,2 mS/m à 25°C et un pH supérieur à 5,6 (eau de grade conformément à l'ISO\* 3696/ 1987).

### iv. MODE OPÉRATOIRE

- $10 \pm 0,005$  g de sol sont mis en suspension dans  $50 \pm 0,1$  mL d'eau distillée, agités pendant 1 heure sur une plaque d'agitation. Puis laisser au repos pendant 2 heures.
- $10 \pm 0,005$  g de sol sont mis en suspension dans  $50 \pm 0,1$  mL de chlorure de potassium (KCl) à 1 mol/L, agités pendant 1 heure sur une plaque d'agitation. Puis laisser au repos pendant 2 heures.
- $10 \pm 0,005$  g de sol sont mis en suspension dans  $50 \pm 0,1$  mL de chlorure de calcium ( $CaCl_2$ ) à 0,01 mol/L, agités pendant 1 heure sur une plaque d'agitation. Puis laisser au repos pendant 2 heures.

---

\* ISO 3696: apparu en 1987. Eau pour laboratoire à usage analytique- spéciation et méthodes d'essais

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

### **II.2.2.5. Détermination de la quantité de bleu de méthylène, norme NF P 18-592 (1990)**

Elle est d'usage courant en géotechnique pour évaluer la fraction argileuse d'un sol ou d'un granulat, mais également dans l'industrie des bentonites. Le résultat de l'essai dépend directement de la nature minéralogique des argiles et de leur quantité dans le sol. Cette mesure permet d'évaluer rapidement l'activité colloïdale des matériaux argileux.

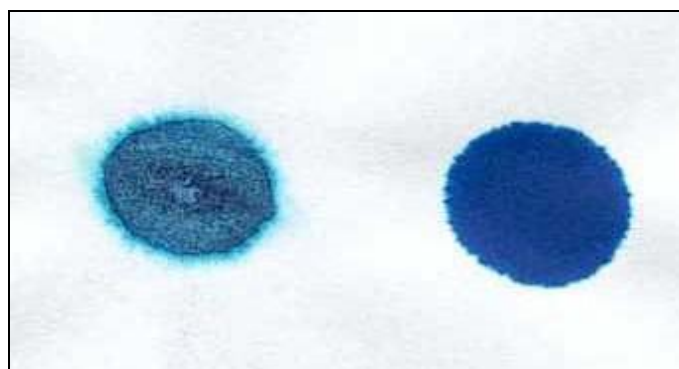
La quantité de bleu de méthylène adsorbé par un échantillon augmente lorsque sa surface spécifique augmente.

La valeur de bleu de méthylène (VBS) représente ainsi la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules de sol. Etant donné que dans un sol c'est avant tout, la surface spécifique de particule argileuse qui détermine sa surface spécifique totale, on peut considérer que la VBS exprime globalement la quantité et l'activité de l'argile contenue dans ce sol (tableau II-3).

**Tableau II-3:** Nature de sol en fonction VBS.

Valeur du bleu du sol (cm <sup>3</sup> /g)	Nature du sol
< 0,2	Sol sableux
0,2 – 2,5	Sol limoneux
2,5 – 6	Sol limoneux- sableux
6 -8	sols argileux
>8	sols très argileux

La VBS se détermine à partir de l'essai au bleu de méthylène à la tache sur la fraction 0/5 mm. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène. A chaque ajout on contrôle l'adsorption en prélevant une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre normalisé pour faire une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache (Fig.II-7).



**Figure II-7:** Essai au bleu de méthylène, gauche: test positif et droit: test négatif.

### i. MODE OPÉRATOIRE

Prélever une masse qui égale à  $10 \pm 0,01$  g de sol sec passé au tamis de 2 mm, puis la mettre dans un Becher de 100 mL, ensuite à l'aide de l'agitateur (700 tr/min), disperser la suspension pendant 5 min. à l'aide d'un dispositif de dosage (Fig.II-8), introduire 5 mL de bleu et agiter (400 tr/min) pendant une minute. Au bout de  $1 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$ , procéder à l'essai de la tache sur papier filtre de la manière suivante:

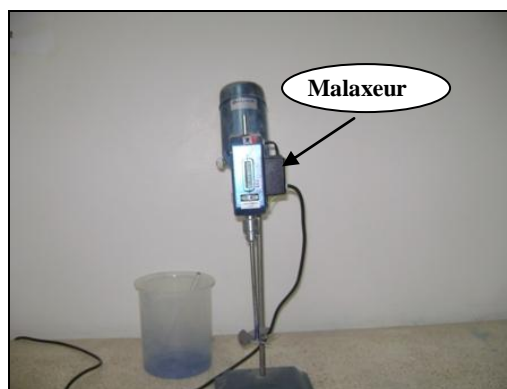
- poser le papier filtre sur un support adapté non absorbant;
- prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau coloré bleu sombre entouré d'une zone humide incolore (essai de tache),

La goutte prélevée doit former un dépôt central compris entre 8 mm et 12 mm de diamètre. Procéder à des injections successives par pas de 5 mL à 10 mL (selon l'argilosité du matériau) de solution de bleu jusqu'à l'apparition d'une auréole périphérique bleu clair, de largeur millimétrique, dans la zone humide de la tache. L'essai est dit alors positif (Fig. II-8). À partir de ce moment, laisser se poursuivre l'adsorption du bleu dans la solution et effectuer des taches, de minute en minute, sans ajout de solution. Si l'essai redevient négatif à la cinquième tache ou avant, procéder à de nouvelles injections de bleu avec des pas de 2 mL à 5 mL, selon l'argilosité du matériau, en lieu et place des pas de 5 mL à 10 mL introduits précédemment.

En effet, il est nécessaire de réduire les quantités injectées, car à ce stade de l'essai la suspension est en voie de saturation. Chaque addition est suivie des taches effectuées de minute en minute. Ces opérations sont renouvelées jusqu'à ce que l'essai reste positif pour cinq taches consécutives. Le dosage est alors terminé et l'on détermine le volume total (V) de la solution de bleu qui a été nécessaire pour atteindre l'adsorption totale.

Dans tous les cas, le volume V doit être supérieur à 10 mL. Si le volume V est inférieur à 10 mL, l'essai doit être recommencé avec une prise d'essai de masse supérieure. Le récipient et les accessoires en contact avec la suspension de sol et de bleu sont lavés et abondamment rincés à l'eau claire.





**Figure II-8:** Dispositif expérimental pour mesurer le VBS.

La valeur de bleu de méthylène du sol est calculé selon la formule suivante:

$$\boxed{\text{VBS} = V / M \text{ (cm}^3/\text{g)}}$$

- V: volume du bleu ajouté en cm<sup>3</sup>;
- M: la prise d'essai.

#### iv. PRÉPARATION DE LA SOLUTION DE BLEU DE METHYLENE A 10 g/L

Utiliser de l'eau déminéralisée ou distillée.

Utiliser du bleu de méthylène, de qualité pharmaceutique référence CODEX, degré de pureté  $\geq 98,5$  %, présenté sous forme de poudre et conditionné en flacon.

Déterminer la teneur en eau  $w$  de la poudre de bleu de méthylène contenue dans le flacon, comme suit:

- peser environ 5 g de poudre de bleu de méthylène à 0,01 g près et noter sa masse ( $m_h$ );
- sécher\* cette poudre à  $(90 \pm 5)^\circ\text{C}$  pendant au minimum 2h; cette masse sera la masse sèche (mg);
- calculer et noter la teneur en eau  $w$  à la troisième décimale près;
- ne pas réutiliser la poudre ayant servi à la détermination de la teneur en eau, la teneur en eau doit être déterminée pour la préparation de chaque nouveau bain de solution.

Choisir un récipient de forme évitant toute perte de solution par projection lors de l'agitation.

Verser 500 g à 700 g d'eau déminéralisée ou distillée dans le récipient. Si on utilise de l'eau chaude la température ne doit pas excéder  $50^\circ\text{C}$ ;

- prendre une masse de poudre de bleu de méthylène de  $(10 (1 + w) \pm 0,01)$  g (équivalent à 10 g de poudre sèche);

---

\*À des températures supérieures à  $100^\circ\text{C}$ , la structure chimique du bleu méthylène peut être modifiée.

- agiter le contenu du récipient en ajoutant lentement la poudre de bleu de méthylène dans l'eau;
- vérifier la complète dissolution de la poudre ; si elle n'est pas atteinte poursuivre l'agitation;
- compléter la masse de la solution avec de l'eau déminéralisée ou distillée jusqu'à une masse totale de solution de  $(1000 \pm 5)$  g puis agiter la solution pendant au moins 5 min. Dans le cas où on utilise une fiole jaugée de 1L, compléter avec de l'eau déminéralisée ou distillée jusqu'au trait repère en s'assurant que la température de la solution soit proche de  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$  ;
- conserver la solution ainsi préparée dans une bouteille de conservation fermée (en verre teinté de préférence) et placée à l'abri de la lumière.

La solution de bleu de méthylène ne doit pas être utilisée plus de un mois après sa préparation.

#### **II.2.2.6. Détermination de la teneur du carbonate, norme AFNOR NF P94-048 (1996)**

Le pourcentage massique en carbonate permet le classement des sols (tableau II-4).

*Tableau II-4: Classification des matériaux en fonction du pourcentage massique en carbonate.*

<b>Teneur en carbonate (%)</b>	<b>Classification</b>	<b>Exemple</b>
<10	Non calcaire	Argile, sable siliceux
10 à 29	Peu calcaire	Marne
30 à 69	Moyennement calcaire	Marne..
70 à 89	Fortement calcaire	Calcaire marneux..
$\geq 90$	calcaire	calcaire

#### **i. PRINCIPE**

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai.

#### **ii. PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON POUR ESSAI**

Pour un essai préliminaire, on ajoute un peu d'acide HCl sur une fraction de l'échantillon de sol déposé sur un verre de montre, la teneur de carbonates de l'échantillon peut être estimée sur la base de l'intensité et du temps de l'effervescence ainsi produit (tableau II-5).

Tableau II-5: Masse de prise d'essai en fonction de la teneur présumée en carbonate.

Intensité de l'effervescence	Teneur en carbonates (g/kg)	Masses de la prise d'essai (g)
Aucune ou simplement limité	< 20	10
Faible de courte durée	20 à 80	5
Forte de longue durée	80 à 100	2,5
Très fort de longue durée	> 160	< 1

### iii. MODE OPÉRATOIRE

La détermination de la teneur en carbonate a été faite par calcimètre Bernard (Fig.II-9).

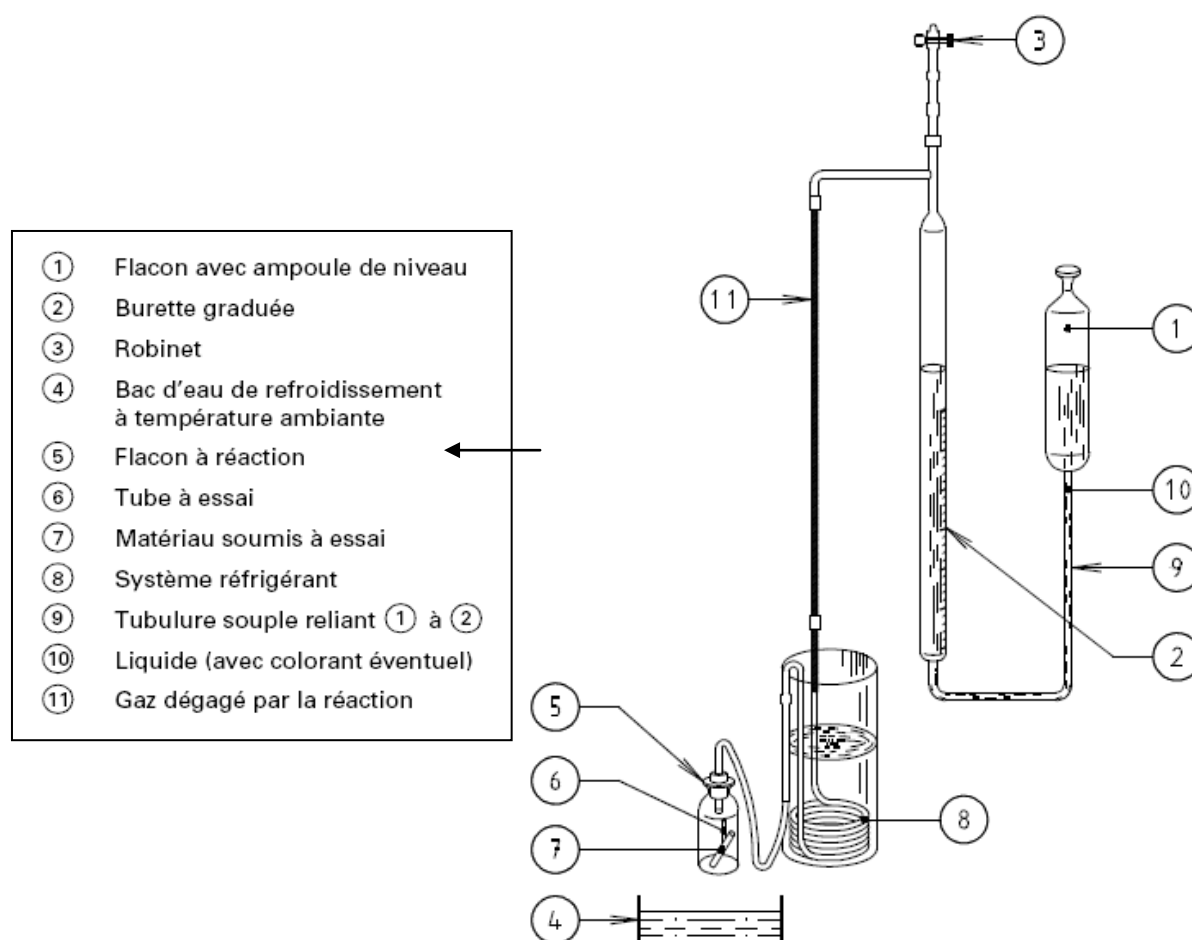


Figure II-9: Calcimètre de Bernard (Laboratoire de génie civil, Université de Tlemcen,).

On prend  $0,5 \pm 0,005$  g de chaque sol (sol poivron (F), sol artichaut (K) et sol raisin (R)), broyé et tamisé à 0,1 mm, puis on suit les étapes décrites ci-dessous.

- Une fois pesée introduire la prise d'essai, dans le flacon «5» propre et sec.
- Mettre en place le système réfrigérant.
- Remplir le flacon «1» et la burette «2» d'eau distillée.
- Faire coïncider le niveau bas du flacon «1» avec le zéro en partie haute de la burette «2».
- Introduire environ 10 mL d'acide HCl concentré dans un tube à essai «6» placé dans le flacon «5».
- Obturer le flacon à réaction «5» au moyen de son bouchon ; la tubulure qui traverse ce dernier est relié par «11» à la partie supérieure de la burette «2».
- On lit le volume  $V_1$ .
- Mettre en contact l'acide HCL contenu dans le réservoir du flacon «5» ou dans le tube à essai avec le matériau.
- Agiter le flacon «5» jusqu'à ce que le niveau d'eau ne varie plus.
- Attendre 5min environ et placer le flacon «5» dans le bac d'eau de refroidissement «4» à la température ambiante.
- Après équilibre de la température (environ 5 min) amener les niveaux «1» et «2» dans le même niveau et lire le volume  $V_2$ , sur la burette «2».

### iv. CALCUL

$$\boxed{\text{Teneur en carbonate : } 1,2 V_b P / m (\varnothing + 273)}$$

Avec:

- P: pression atmosphérique en kilo pascals
- m: en kilogramme, prise d'essai
- $\varnothing$ : température en degré Celsius
- $V_b$ : en centimètres cube (volume du HCl dégagé)

### II.2.2.7. Détermination de la matière organique (MO), norme NF ISO 10694

#### i. PRINCIPE

La teneur en matière organique a été déterminée par la norme décrite ci-dessus, les sols ont été calcinés à une température de 500°C dans un four pendant 5h.

La teneur en matière organique représente la différence entre les deux masses (avant – après calcination) (la teneur ensuite a été rapportée à 100g de l'échantillon initial).

$$\boxed{\% \text{MO} = (M_0 / M_1) * 100}$$

- $M_0$ : étant la masse initiale d'échantillon séché à  $40 \pm 5^\circ\text{C}$ , en gramme;
- $M_1$ : masse finale, après calcination à  $500 \pm 5^\circ\text{C}$ , en gramme.

## ii. PRISE D'ESSAI

100 ± 0,005 g pour chaque sol sec tamisé à 2 mm (préparé selon la norme NF ISO11464).

### II.2.2.8. Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC), norme AFNOR NF X 31-130 (1993)

La capacité d'échange est une mesure de la quantité d'ions susceptibles d'être retenus par échange sur un solide, en présence d'un excès des ions échangeurs en solution. Cela correspond en fait à la charge nécessaire pour atteindre l'électroneutralité du solide. Cette capacité peut être soit cationique (CEC) soit anionique (CEA), selon que la surface du milieu est chargée négativement ou positivement. Déterminer la CEC d'un solide consiste à mesurer un paramètre caractérisant un état d'équilibre entre l'échantillon de sol et un environnement expérimental donné. Les valeurs obtenues sont fonction du milieu (cation saturant, pH, force ionique, présence d'autres ions, etc.),<sup>81</sup> ainsi que des conditions de réalisation influençant le rendement des réactions d'échange. La CEC est initialement liée à la présence d'argile, de matière organique et par même occasion aux métaux lourds.

Pour évaluer le nombre total de sites disponibles à l'échange, la méthode par titrage acido-basique peut être utilisée.

#### i. PRINCIPE

Dans les conditions déterminées:

- échange (percolation) entre les cations d'un échantillon de sol et les ions ammonium d'une solution aqueuse molaire et neutre d'acétate d'ammonium;
- élimination de l'ammonium en excès (percolation) au moyen d'alcool éthylique;
- extraction (agitation) des ions ammonium fixés, par une solution aqueuse et molaire de chlorure de sodium;
- détermination de la capacité d'échange cationique par dosage des ions ammonium échangés.

#### ii. PROTOCOLE

On utilise une colonne de percolation (qui ressemble à la colonne de chromatographie) (Fig.II-10), on ajoute du coton, puis une prise d'essai pour chaque sol égale à 2,5 ± 0,005 g tamisé à 2 mm, puis on ajoute environ 75 mL d'acétate d'ammonium (C<sub>2</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>, pH=7, 1mol/L), que l'on laisse percoler. Au total, il faut réaliser cinq percolations.

L'échantillon est ensuite rincé à l'alcool éthylique. Il est généralement nécessaire d'effectuer six rinçages pour obtenir une élimination complète des ions ammonium en excès. A la suite du rinçage, l'échantillon est mis à sécher pendant 24h à température ambiante.

L'échantillon est placé dans un récipient à agitation. L'extraction des ions ammonium est réalisé grâce à  $(50 \pm 0,1)$  mL de NaCl (1 mol/L). L'agitation dure 1 heure.

La solution ensuite est filtrée (sur des filtres sans cendres). Vingt-cinq millilitres du filtrat sont versés dans le ballon d'un appareil à distiller à l'aide d'une pipette, ainsi que 10 ml de soude NaOH (33% dans l'eau (m/v)), ensuite on complète à 200 mL par l'eau distillée et on ajoute des régulateurs d'ébullition (comme par exemple des pierres pense).

Ajouter dans le récipient de récupération du distillat,  $40 \pm 0,1$  mL de l'acide borique (40 g/L) et quelques gouttes d'indicateur de Toshiro, plonger l'extrémité du réfrigérant sur une profondeur d'au moins de 1mL, dans le liquide de récupération, ajouter quelques gouttes de phénophtaléine dans le ballon de l'appareil à distiller. (Vérifier l'étanchéité d'assemblage de l'appareil).

On chauffe progressivement le ballon de façon à distiller environ 150 mL, en 30min. après ce de temps, vérifier la neutralité du filtrat qui s'écoule à l'extrémité du réfrigérant au moyen d'un papier pH ou phénophtaléine. Si la réaction est alcaline, on poursuit la distillation.

Procéder au titrage d'ammoniaque par la solution sulfurique de 0,025 mol/L. Et en parallèle on effectue un essai à blanc (sans filtrat du départ), et on calcul comme suit.

$$T = \frac{(V1-V2) * 2C * 50 * 100}{V * m}$$

- V1: volume de l'acide sulfurique utilisé pour l'essai, exprimé en mL
- V2: volume de l'acide sulfurique utilisé pour l'essai à blanc, exprimé en mL;
- C: est la concentration de l'acide sulfurique, en mol/L;
- V: volume de prise d'essai pour la distillation, en mL;
- m: prise d'essai, en g.

La valeur de capacité d'échange cationique T est exprimée en centimoles de charges positives par kilogramme (cmoles<sup>+</sup>/ kg).

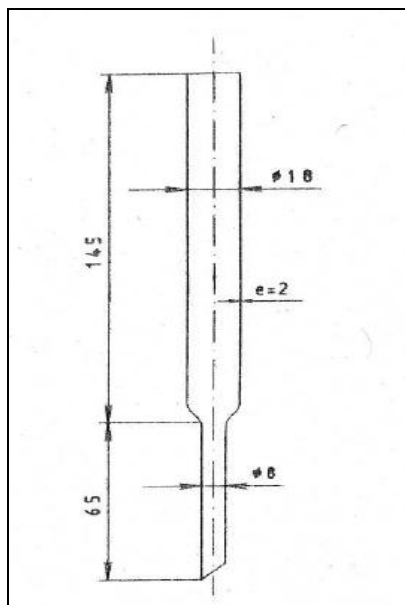


Figure II-10: Allonge de percolation

**Remarque:** on peut effectuer le dosage par spectrophotométrie à une longueur d'onde de 600 nm au lieu de faire un dosage par une solution sulfurique.

### iii. PRÉPARATION DES REACTIFS

- D'acétate d'ammonium à pH=7,00 et de concentration 1mol/l:

Dissoudre  $77 \pm 0,005$  g d'acétate d'ammonium dans une fiole de  $1000 \pm 0,1$  mL, contenant environ  $900 \pm 0,1$  mL d'eau. Ajustage du pH à  $7,00 \pm 0,05$  au moyen des solutions d'ammoniaque ( $\text{NH}_4\text{OH}$ , 1 mol/L) ou d'acide acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ , 1 mol/L) ensuite on complète le volume à 1L.

- Indicateur de Toshiro:

Dissoudre 2 g de rouge de méthyle et 1g de bleu méthylène dans 1000 mL d'éthanol à 95°.

- Phénophtaléine:

Dissoudre 1g de phénophtaléine dans 1000 mL d'éthanol à 95°.

## II.2.2.9. Teneurs totales en éléments majeurs et éléments traces métalliques

### i. Les sols, norme AFNOR NF X31-151 (1993) ( NF ISO 11466)

#### i.1. EXTRACTION TOTALE OU/ MINÉRALISATION

Les procédures d'extraction simple sont des méthodes qui s'exécutent en une seule étape. Elles sont retenues en sciences des sols afin de quantifier la disponibilité potentielle des métaux lourds pour les végétaux, pour prévoir la prise des éléments essentiels,

pour diagnostiquer l'insuffisance ou l'excès des éléments dans les sols ou encore pour pouvoir étudier le comportement physico-chimique des ETM dans les sols. Elles sont encore aujourd'hui, largement employées en raison de leur facilité de mise en œuvre.<sup>79,80</sup>

De nombreux protocoles ont été développés ces dernières décennies.<sup>81,82</sup>

### i.2. PRÉTRAITEMENT DES ECHANTILLONS

Les échantillons sont homogénéisés et quartés (Fig.II-2), puis séchés à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  selon la norme NF ISO 11465 d'août 1994. Les échantillons sont ensuite tamisés à 2 mm (élimination des végétaux, plastique, verres, cailloux, etc.) selon la norme NF ISO 11464 de décembre 1994. Homogénéisation par un broyage de tamis 0,315 mm (315  $\mu\text{m}$ ) pour augmenter la surface de contact entre les métaux et les réactifs.

**Remarque:** NF ISO 11465 et 11464 leurs indices de classement dans AFNOR sont: X31-102, X31-101.

### i.3. PRINCIPE

Le dosage consiste, dans un premier temps, à mettre en solution les éléments par un mélange d'acide chlorhydrique et nitrique par un rapport 3V/V (i.e. la phase de minéralisation). On dose ensuite les éléments par ICP-AES.

### i.4. MODE OPÉRATOIRE

Les échantillons sont minéralisés par digestion acide à l'eau régale. Chaque échantillon fait l'objet de 3 prises d'essai de  $0,5 \pm 0,005$  g. Chaque prise est placée dans un erlenmeyer en verre ou elle reçoit 2-3ml d'eau déminéralisée pour obtenir un produit bateau, puis ajout de 7,5 mL d'acide chlorhydrique (37% (m/m), densité 1,19 g/mL, Merck Supra pur max Hg 0,005ppm) et 2,5 mL d'acide nitrique (65%(m/m),  $\rho=1,38$  g/mL Merck Supra pur max Hg 0,005ppm). Le mélange est fermé hermétiquement et laissé à température ambiante pendant 12h. Le minéralisât est ensuite concentré par ébullition pendant 2h. Après refroidissement, on filtre sur des papiers filtre sans cendre, le volume obtenu est ajusté à 25 mL avec l'eau distillée.

Hernandez et al.<sup>80</sup> ont également mis en évidence l'efficacité d'une minéralisation à l'eau régale. Les teneurs en métaux obtenues sont similaires à 5% d'erreurs près.

**Remarque:** toutes les verreries ont été immergées et nettoyer par une solution d'acide nitrique de concentration 0,5 mol/L (dilution de 32 mL de  $\text{HNO}_3$  concentré dans 1L de l'eau distillée) pendant 6 h puis rincés avec l'eau bistillée.



## **ii. Végétaux**

### **ii.1. PRÉLÈVEMENT**

Les prélèvements des légumes (poivron et artichaut) et des fruits (les raisins) ont été réalisés quelques jours avant la récolte. Les végétaux en bordure des allées sont écartés de façon à limiter les biais dus aux dépôts de poussières. Ces échantillons ont été transportés dans des sacs en polypropylène.

### **ii.2. PRÉPARATION DES ECHANTILLONS**

On découpe et on élimine les extrémités, ainsi que les feuilles abîmées des végétaux (artichaut, poivron et raisin), puis on les lave doublement à l'eau de robinet.

Ensuite, on les coupe par un couteau en inox comme suit: en petits morceaux les tiges des artichauts et du poivron, en rondelle les tiges des raisins et en fines tranches les fruits du poivron. Enfin on les sèche à l'étuve à une température qui ne dépasse pas les 50°C.

### **ii.3. BROYAGE**

Tous les échantillons ont été broyés au broyeur oscillant à anneaux en carbure de tungstène et tamisé à 315 µm.

### **ii.4. STOCKAGE**

Une fois que ces opérations sont effectuées, les échantillons sont placés dans des flacons inertes, puis rangés et stockés à l'abri de la poussière. Les échantillons ainsi donc conditionnés sont prêts pour la minéralisation et dosage chimique des métaux.

## **ii.5. Minéralisation**

### **ii.5.1. CALCINATION**

La calcination est une étape indispensable pour pouvoir réaliser la mise en solution des différents éléments métallique (ETM et EM) par attaque acide à l'eau régale.

### **ii.5.2. PROTOCOLE**

On pèse dans une capsule de porcelaine 20 à 30 ± 0,005 g de poudre végétale. La capsule est placée dans un four à moufle. Les meilleurs résultats sont obtenus en gardant le four à 300°C jusqu'à ce que le carbone cesse d'être incandescent. La température du four est alors montée à 400-450°C. Le temps de minéralisation est variable, il dépend de la nature du matériel pour obtenir des cendres blanches friables.

L'oxydation des dernières traces de matériel organique est alors réalisée en ajoutant 1 à 2 mL de HNO<sub>3</sub> (1N) après refroidissement de la capsule. On évapore à sec sur une plaque chauffante ou au bain de sable et on replace au four à 400°C pendant une heure.

### ii.5.3. RAPPORT volume de réactifs/ masse de prise d'essai

Comme pour les sols, la prise d'essai conditionne la répétitivité et la reproductibilité de l'analyse. En effet plus elle est petite, plus les erreurs risquent d'être importantes et la teneur en ETM à doser trop faible pour être détectés. D'un autre côté, plus la prise d'essai est grande (nécessaire dans le cas des végétaux fibreux), plus les interférences et les risques d'erreurs sont nombreux. Donc pour optimiser la mise en solution, il est possible de jouer directement sur la masse de l'échantillon ainsi que sur le volume final de liquide (par augmentation ou diminution du volume de réactifs utilisés).

### ii.5.4. MODE OPÉRATOIRE

La mise en solution en vue du dosage des métaux lourds a été réalisée par attaque acide d'une quantité de  $0,5 \pm 0,005$  g d'échantillon de la plante par  $10 \pm 0,1$  mL d'eau régale ( $7,5 \pm 0,1$  mL de HCl de 37% (m/m), densité 1,19 g/mL, Merck Supra pur max Hg 0,005ppm et  $2,5 \pm 0,1$  mL HNO<sub>3</sub> de 65% (m/m),  $\rho=1,38$  g/mL, Merck Supra pur max Hg 0,005ppm, par un rapport volumique (3/1). En suite le tout est porté à l'ébullition sur une plaque chauffante pendant 3 heures (en utilisant un chauffage à reflux). Après refroidissement, on filtre dans une fiole jaugée de  $25 \pm 0,1$  mL puis on complète avec de l'eau distillée au trait de jauge.

**Remarque:** toutes les méthodes de mise en solution sont issues et basées sur les protocoles des normes NF ISO 11466 de juin 1995, NF X 31-147 de juillet 1996, et NF X 31-151 de juin 1993).

### I.2.2.10. Extraction séquentielle (spéciation) pour nos sols agricoles

La mobilité se définit comme la capacité d'un élément à changer de phase, c'est à dire dans le cas présent, de passer de la phase solide de l'échantillon à la phase liquide de la solution extractante.

La mobilité est donc fonction de plusieurs facteurs tels que la composition et la concentration de la solution extractante, le rapport de masse et/ou de volume échantillon solide/solution extractante, la durée de l'extraction, la température... .

Enfin, la spéciation est la répartition d'un élément entre les différents compartiments d'un échantillon solide tels qu'ils ont été définis par le protocole d'extraction séquentielle.<sup>83</sup>

Le principe d'extraction séquentielle (extraction sélective) consiste à soumettre un échantillon à une série ordonnée de réactifs pour solubiliser les différentes formes ou phases d'un métal dans un échantillon solide.

L'extraction s'appuie donc sur la réalisation d'attaques chimiques successives, en utilisant des réactifs appropriés, capables de détruire la liaison entre les éléments inorganiques étudiés et une fraction solide spécifique du sol.

Cette réflexion met en œuvre trois types de réactions:

- le réactif, présent en excès, s'échange avec le métal sur la phase solide;
- le réactif a plus d'affinités pour le métal que la phase solide;
- le réactif dégrade la phase liante, libérant ainsi le métal.

Les espèces chimiques libérées sont ensuite mesurées par des procédures analytiques appropriées. De nombreux schémas d'extraction séquentielle ont été développés dans l'objectif d'appréhender qualitativement la nature des liaisons sols - polluants inorganiques.

Parmi les procédures d'extractions séquentielles les plus couramment utilisées pour l'analyse des éléments traces à comportement cationique présents dans les sols et sédiment, nous citons celui de Tessier et al, 1979.<sup>84-89</sup>

Ce protocole a été destiné à l'étude des sédiments, son application a été élargie par la suite aux sols. C'est le plus couramment utilisé car il couvre une grande variété de phases de sol. Pour distinguer l'élément se trouvant sous différentes formes dans le sol, l'extraction se fait en cinq étapes (tableau II-6).

**Tableau II-6:** Protocole d'extractions séquentielles adapté de Tessier et al, pour 1g du sol sec.<sup>88</sup>

Fraction	Conditions D'extraction	réactifs	Température	Temps d'extraction	Modes D'agitation	pH
F1	sorption / désorption	8 mL MgCl <sub>2</sub> 1 mol/L	température ambiante	1 h	agitation continue	7
F2	condition acide	8 ml CH <sub>3</sub> COONa 1 mol/L avec CH <sub>3</sub> COOH pur	température ambiante	5 h	agitation continue	5
F3	condition réductrice	20 mL NH <sub>2</sub> OH.HCl (0,04 mol/L) dans CH <sub>3</sub> COOH à 25% (V/V)	96 ± 2°C	6 h	agitation occasionnelle	2
F4	condition oxydante	3 mL de HNO <sub>3</sub> 0,02 mol/L et 5 mL de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 30%	bain-marie à 85 ± 2°C	3 h	agitation occasionnelle	6,1- 6,7
		puis 5 mL de CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> 3,2 mol/L dans HNO <sub>3</sub> 20% (V/V) + l'eau distillée pour un volume final de 20 mL	température ambiante	½ h		
F5	dissolution de la matrice	8 mL de HF/HClO <sub>4</sub> (v/v)	séchage à l'étuve (30 ± 2°C) pendant 48h	2h	agitation occasionnelle	< 0

**Remarque:** pour la fraction F5 l'expérience a été déroulée dans des béchers en Téflon.

#### i. FRACTION ÉCHANGEABLE (F1)

Les métaux dans cette fraction regroupent les ions fixés par une liaison non spécifique, facilement re-mobilisables par échange d'ion. L'extraction se fait dans un milieu à pH neutre. Les fractions solides des sols sorbants concernées sont le plus souvent les minéraux argileux, la matière organique et les matériaux amorphes.

Des sels neutres (MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>, NaNO<sub>3</sub>) sont couramment utilisés comme extractifs pour favoriser le déplacement des ions physiquement liés par attraction électrostatique aux sites chargés négativement de la surface des particules.

**ii. LA FRACTION ACIDO-SOLUBLE (F2)**

Les espèces métalliques précipitées ou co-précipitées avec les carbonates peuvent être remobilisées par l'attaque d'acide, solution extractive généralement utilisé est un acétate acidifié.

**iii. LA FRACTION RÉDUCTIBLE (F3)**

Cette fraction représente les métaux associés à des oxydes de fer, d'aluminium et de manganèse faiblement cristallisés ou amorphes. On les retrouve dans les sols dispersés sous formes de concrétions ou de pellicules sur les particules détritiques. Le principe expérimental consiste à une réduction des oxydes qui a pour but la libération des métaux liés.

Le réactif le plus utilisé est le chlorhydrate d'hydroxyle amine dans l'acide acétique à pH = 2.

**iv. LA FRACTION OXYDABLE (F4)**

Les métaux considérés sont liés à la matière organique. Les liaisons principales incluent la complexation, l'adsorption et la chélation. La technique utilisée se fait par oxydation de la matière organique à l'aide de l'eau oxygénée (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), qui permet de détruire la matière organique et donc de remobiliser les métaux fixés.

**v. LA FRACTION RÉSIDUELLE (F5)**

Elle correspond aux métaux restants fixés après les quatre étapes d'extraction précédentes. Elle constitue le fond géochimique naturel du sol, c'est-à-dire les métaux présents dans la matrice silicatée des minéraux ou provenant de substitutions isomorphiques. Des acides forts sont utilisés pour déduire cette fraction résiduelle.

**vi. Limitation / ou critique de la méthode**

Bien que la méthode d'extraction séquentielle constitue une approche fondamentale pour la caractérisation des éléments métalliques dans le sol, elle fait l'objet de controverse relative à la précision et la fiabilité pour fournir des résultats significatifs.

**vi.1. MANQUE DE SÉLECTIVITÉ**

Les extractants ne sont pas parfaitement sélectifs. En effet, chaque solution d'extraction utilisée pour dissoudre une phase peut entraîner une solubilisation des métaux présents dans d'autres phases de l'échantillon.

## vi.2. READSORPTION DES METAUX

Des études ont montré que les éléments traces remobilisés pendant l'attaque des solutions d'extraction peuvent être ré-adsorbés dans une large mesure sur les phases solides restantes, ceci a été mis en évidence dans des sédiments synthétiques,<sup>89,91</sup> et dans des sédiments naturels.<sup>92</sup>

**Remarque:** malgré tous ces inconvénients, l'extraction séquentielle reste à ce jour la seule approche chimique expérimentale disponible pour appréhender la mobilité potentielle des métaux lourds associés au sédiment et sol. En effet, Cependant, elle permet de fournir une appréciation qualitative de la capacité des différents constituants du sol à accumuler des métaux lourds et ainsi de spéculer sur leur potentiel de re-largage dans l'environnement.

### II.2.3. Détermination quantitative de la $\rightarrow$ fraction mobilisable des éléments métalliques par l'EDTA

#### II.2.3.1. Principe

L'EDTA est couramment utilisé pour estimer la biodisponibilité des métaux tels que Cu, Zn, Cd, Pb, Co, Ni, Cr, As et les éléments majeurs tels que Fe, Mn, Ca, N..., à pH= 7 dans les sols agricoles.

C'est un agent complexant très puissant qui forme avec les espèces métalliques de composés stables et solubles.<sup>93,94</sup>

#### II.2.3.2. Préparation de la solution d'extraction (EDTA)

La solution extractive est obtenue par dissolution à froid de  $3,723 \pm 0,005$  g d'EDTA et  $77g \pm 0,005$  g d'acétate d'ammonium ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) dans  $400 \text{ mL} \pm 0,1 \text{ mL}$  d'eau en fiole jaugée de 1000 mL. Après dissolution ajouter 450 mL d'eau distillée puis amener la température à 20 °C. Maintenir cette température, mesurer le pH et, si nécessaire, l'ajuster à  $\text{pH}=7 \pm 0,05$  à l'aide des solutions d'ammoniaque ou d'acide acétique. Ajuster le volume. Homogénéiser. Le choix du pH de 7 constitue un compromis entre le maximum de solubilité de nombreux anions et l'augmentation de la chélation des cations, ce qui fait de ce type d'extraction une procédure applicable aux espèces formant des oxy-anions (As, Cr, Mn...) comme aux cations (Cd, Pb, Zn...).<sup>95</sup>

---

$\rightarrow$  : Fraction mobilisable désigne la fraction maximale extraite et désigne aussi une mobilité à court et long terme.

### II.2.3.3. Mode opératoire

Introduire  $5 \pm 0,01$  g de sol préparé selon la norme NF ISO 11464, dans un flacon de 100 mL, puis ajouter 50 mL de la solution extraction à  $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$ . Boucher hermétiquement sans attendre. Agiter vigoureusement de manière à ce qu'il ne reste pas de grumeaux de sol collés aux parois du flacon. Agiter pendant 2 heures exactement en maintenant la température à  $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$ . Filtrer aussitôt et récupérer le filtrat dans un flacon propre et sec et fermer hermétiquement (ou centrifuger dans des conditions optimales de séparation et transférer aussitôt le surnageant dans un flacon propre et fermer immédiatement).<sup>95-97</sup>

## II.3. ANALYSE INSTRUMENTAL DES ELEMENTS METALLIQUES DANS LES SOLS ET LES VÉGÉTAUX

Le dosage des métaux a été réalisé par spectroscopie d'émission atomique par plasma à couplage inductif (Fig II-11).

### II.3.1. Spectroscopie d'émission atomique par plasma à couplage inductif [ICP-AES]

#### II.3.1.1. Prélèvements et conditionnement d'analyse

Tous les filtrats obtenus par l'extraction totale, l'extraction à l'EDTA et l'extraction séquentielle ont été filtrés. Les filtrats récupérés sont acidifiés à 1% par  $\text{HNO}_3$  (supra pur) puis conservé au réfrigérateur à  $4^\circ\text{C}$  avant le dosage.



**Figure II-11:** Photographie de l'appareil d'ICP-AES.

Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman (LASIR) / Université de Lille, France.

#### II.3.1.2. Principe de l'ICP-AES

La source utilisée en ICP-AES est un plasma généré par couplage inductif. Un plasma est un gaz atomique électriquement neutre mais très ionisé.

Il est constitué d'atomes neutres (atomes du gaz) et d'autant de charges positives (cations du gaz) que négatives (électrons). Le plasma le plus utilisé est le plasma d'argon (Fig II-12) car l'argon ne se recombine pas avec les espèces chimiques d'une façon stable et possède un potentiel d'ionisation très élevé (15,6 eV), ce qui permet l'excitation de la majorité des ions. De plus, il s'agit d'un gaz rare, il est ainsi difficile à ioniser et peut atteindre une température de plasma très élevée (de l'ordre de 10000 K). En outre, l'argon possède l'avantage d'être un des gaz les plus présents sur terre. L'hélium pourrait être utilisé, mais possède l'inconvénient d'être cher.

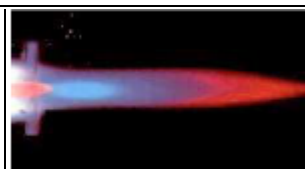


Figure II-12: Photographie d'un plasma d'argon.

### II.3.1.3. Le système d'atomisation et d'excitation

Le système d'excitation représente tous les phénomènes se produisant dans le plasma. Le nébulisat, obtenu après nébulisation de l'échantillon, subit différents processus (désolvatation, vaporisation, atomisation et éventuellement ionisation) avant l'excitation des atomes ou des ions de l'échantillon (Fig.II-13).<sup>98-100</sup>

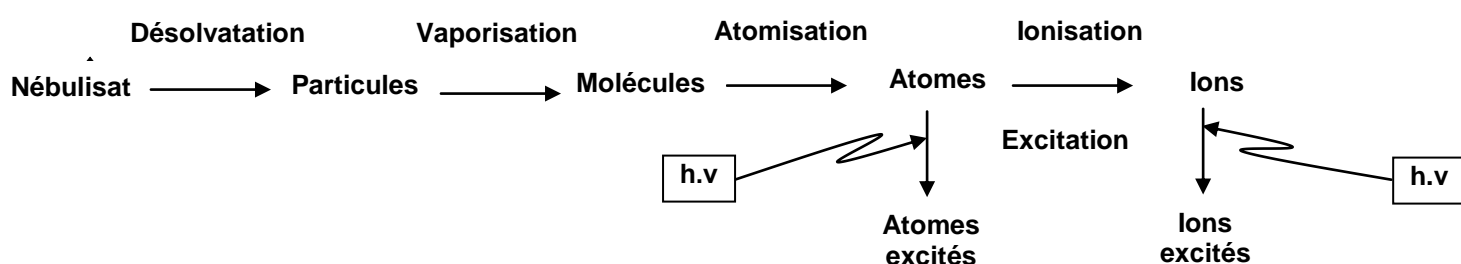


Figure II-13: Schéma représentant les différents processus lors de l'atomisation et l'excitation.

Lors de la collision d'une particule et d'un atome pendant l'atomisation et l'ionisation, trois processus peuvent se produire:

- excitation:  $\text{Ar} + \text{M} \rightarrow \text{Ar} + \text{M}^*$  ou  $\text{Ar}^+ + \text{M} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{M}^*$ ;
- ionisation:  $\text{Ar} + \text{M} \rightarrow \text{Ar} + \text{M}^{*+} + \text{e}^-$  ou  $\text{Ar}^+ + \text{M} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{M}^{*+} + \text{e}^-$ ;
- transfert de charge:  $\text{Ar}^+ + \text{M} \rightarrow \text{Ar} + \text{M}^+$ .

♦ Suspension de très fines gouttes liquides dans l'argon de nébulisation.



L'excitation et l'ionisation se produit à haute vitesse de collision, de ce fait dans la partie la plus chaude du plasma, tandis que le transfert de charge a lieu à faible vitesse, de ce fait dans la partie la moins chaude du plasma.

#### **II.3.1.4. Présentation de l'ICP-AES utilisée**

Le laboratoire où nous avons effectué les analyses des échantillons se dispose d'appareils ICP-AES type Vista Pro du fournisseur (société) Varian (à présent Agilent Technologies) (Fig.II-11) avec une capacité d'analyse atteindre jusqu'aux 400 échantillons par jour, ou le délai d'analyse moyen est de 5 jours.

#### **i. CONDITION OPÉRATOIRE**

Les conditions opératoires sont les suivantes:

- débit du gaz auxiliaire: 1,5 L/min;
- temps de lecture global de tous les éléments: 5s;
- Pression à l'intérieur du nébuliseur: 180-220 kPa;
- débit du nébulisât dans le nébuliseur: 0,6-0,8 L/min;
- puissance de la génératrice haute fréquence: 1,2-1,3 kW;
- débit du plasma: 15,0 L/min;
- Volume d'échantillon prélevé: 4 mL.

Les échantillons sont placés sous le passeur dans des tubes polypropylènes Chaque échantillon est lu trois fois. La valeur moyenne est ensuite prise. La durée d'analyse d'un échantillon est d'environ trois minutes. La solution de rinçage est une solution d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique à 5%.

#### **II.3.1.5 Limite de détection, quantification et longueur d'onde**

Tous les données concernant les longueurs d'ondes ( $\lambda$ ) et les limites de détection (LD) sont figurés dans le tableau II-7 pour les EM et le tableau II-8 pour les ETM.

**Tableau II-7:** Longueur d'onde et LD utilisés dans le dosage par ICP-AES.

Elément	Longueur d'onde utilisée ( $\lambda$ ) nm	Limite de détection en ppm (mg/L)
<b>K</b>	769,897	0,07
<b>Fe</b>	259,940	0,008
<b>Ca</b>	317,933	0,130
<b>Mg</b>	279,553	0,008
<b>Na</b>	589,592	0,04

**Tableau II-8:** Longueur d'onde, LQ et LD utilisés dans le dosage par ICP-AES.

Elément	Longueur d'onde utilisé ( $\lambda$ ) nm	Limite de détection (ppb)* (LD)	Limite de quantification (LQ)
<b>As</b>	193,696	12	0,1
<b>Cd</b>	214,439	1,5	0,01
<b>Co</b>	238,892	5	0,03
<b>Cr</b>	205,560	4	0,05
<b>Cu</b>	324,754	2	0,13
<b>Mn</b>	257,610	0,3	0,008
<b>Ni</b>	216,555	5,5	0,03
<b>Pb</b>	220,353	14	0,1
<b>Zn</b>	213,857	0,9	0,1

**Remarque:** le dosage par spectromètre d'émission atomique par plasma à couplage inductif est utilisable pour presque tous les éléments de la classification périodique. Il est utilisé pour de larges gammes de concentrations.

### II.3.2. Expression des résultats obtenus (sols et végétaux) <sup>96,101</sup>

L'expression des résultats en mg/kg par rapport à la matière sèche (Ms) est donnée par la formule suivante:

$$C \text{ (échantillon) (mg/kg)} = \frac{C \text{ (échantillon) (mg/l). V (minéralisation) (L). D (dilution)}}{\text{Masse de prise d'essai (Kg)}}$$

\* ppb: Partie par Billion = 0,000000001

---

## **CHAPIRE III. Résultats et Discussions**

---

### III.1. LE SOL

#### III.1.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SOLS AGRICOLES ETUDIÉS

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 tamisats cumulés.

##### III.1.1.1. Tamisage

La répartition granulométrique par tamisage des différentes fractions obtenues pour les trois sols pendant cinq années d'étude en deux profondeurs (0-20cm) et (20-40cm) est donnée dans les tableaux (III-1 à III-10) et exprimée par les courbes granulométrique (Fig.III-1 à III-10).

*Tableau III-1: Résultats de la granulométrie par tamisage des sols étudiés en (0-20cm) de l'année 2006.*

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol F</b>	<b>5</b>	16,09	16,09	98,39
	<b>3,15</b>	6,65	22,74	97,73
	<b>2</b>	6,86	29,60	97,04
	<b>1</b>	23,81	53,41	94,66
	<b>0,5</b>	15,87	69,28	93,07
	<b>0,2</b>	439,51	508,79	49,12
	<b>0,1</b>	463,32	972,11	2,79
	<b>0,083</b>	15,44	987,56	1,24
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	22,33	999,79	0,02

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol R</b>	<b>5</b>	5,28	5,28	99,47
	<b>3,15</b>	4,44	9,71	99,03
	<b>2</b>	11,62	21,33	97,87
	<b>1</b>	38,44	59,77	94,02
	<b>0,5</b>	18,37	78,14	92,19
	<b>0,2</b>	202,11	280,25	71,97
	<b>0,1</b>	669,69	949,95	5,01
	<b>0,083</b>	31,47	981,41	1,86
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	22,45	999,37	0,06

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol K</b>	<b>5</b>	32,03	32,03	96,80
	<b>3,15</b>	45,66	77,70	92,23
	<b>2</b>	58,09	135,79	86,42
	<b>1</b>	102,20	237,99	76,20
	<b>0,5</b>	45,18	283,17	71,68
	<b>0,2</b>	282,57	565,74	43,43
	<b>0,1</b>	373,42	939,16	6,08
	<b>0,083</b>	37,53	976,69	2,33
<b>&lt;0,083 (fond)</b>	22,47	999,16	0,08	

*Tableau III-2: Résultats de la granulométrie par tamisage des sols étudiés en (0-20cm) de l'année 2007.*

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol F</b>	<b>5</b>	18,17	18,17	98,18
	<b>3,15</b>	7,81	25,98	97,40
	<b>2</b>	7,41	33,38	96,66
	<b>1</b>	24,68	58,07	94,19
	<b>0,5</b>	17,46	75,53	92,45
	<b>0,2</b>	438,49	514,02	48,60
	<b>0,1</b>	442,94	956,96	4,30
	<b>0,083</b>	16,96	973,92	2,61
<b>&lt;0,083 (fond)</b>	25,27	999,19	0,08	

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol R</b>	<b>5</b>	5,63	5,63	99,44
	<b>3,15</b>	4,51	10,14	98,99
	<b>2</b>	11,63	21,76	97,82
	<b>1</b>	37,89	59,65	94,03
	<b>0,5</b>	17,97	77,62	92,24
	<b>0,2</b>	200,81	278,44	72,16
	<b>0,1</b>	665,32	943,76	5,62
	<b>0,083</b>	31,89	975,65	2,44
<b>&lt;0,083 (fond)</b>	22,35	998,00	0,20	

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol K</b>	<b>5</b>	34,28	34,28	96,57
	<b>3,15</b>	47,28	81,56	91,84
	<b>2</b>	57,88	139,45	86,06
	<b>1</b>	104,16	243,60	75,64
	<b>0,5</b>	48,44	292,04	70,80
	<b>0,2</b>	286,26	578,30	42,17
	<b>0,1</b>	357,87	936,17	6,38
	<b>0,083</b>	37,89	974,06	2,59
<b>&lt;0,083 (fond)</b>	25,55	999,61	0,04	

*Tableau III-3: Résultats de la granulométrie par tamisage des sols étudiés en (0-20cm) de l'année 2008.*

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol F</b>	<b>5</b>	18,76	18,76	98,12
	<b>3,15</b>	7,78	26,54	97,35
	<b>2</b>	7,31	33,85	96,61
	<b>1</b>	25,85	59,70	94,03
	<b>0,5</b>	17,32	77,03	92,30
	<b>0,2</b>	437,51	514,53	48,55
	<b>0,1</b>	441,33	955,87	4,41
	<b>0,083</b>	17,96	973,83	2,62
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	24,51	998,34	0,17

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol R</b>	<b>5</b>	6,37	6,37	99,36
	<b>3,15</b>	3,84	10,21	98,98
	<b>2</b>	11,10	21,31	97,87
	<b>1</b>	38,26	59,57	94,04
	<b>0,5</b>	19,47	79,04	92,10
	<b>0,2</b>	199,21	278,25	72,18
	<b>0,1</b>	666,60	944,85	5,52
	<b>0,083</b>	30,97	975,82	2,42
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	23,97	999,79	0,02

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol K</b>	<b>5</b>	32,54	32,54	96,75
	<b>3,15</b>	47,65	80,19	91,98
	<b>2</b>	56,24	136,43	86,36
	<b>1</b>	102,70	239,14	76,09
	<b>0,5</b>	46,78	285,92	71,41
	<b>0,2</b>	289,47	575,39	42,46
	<b>0,1</b>	363,14	938,53	6,15
	<b>0,083</b>	35,74	974,27	2,57
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	24,71	998,99	0,10

*Tableau III-4: Résultats de la granulométrie par tamisage des sols étudiés en (0-20cm) de l'année 2009.*

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol F</b>	<b>5</b>	17,14	17,14	98,29
	<b>3,15</b>	8,87	26,01	97,40
	<b>2</b>	7,54	33,55	96,64
	<b>1</b>	27,13	60,69	93,93
	<b>0,5</b>	18,76	79,45	92,05
	<b>0,2</b>	438,79	518,24	48,18
	<b>0,1</b>	440,75	958,99	4,10
	<b>0,083</b>	15,91	974,90	2,51
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	24,62	999,52	0,05

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol R</b>	<b>5</b>	6,93	6,93	99,31
	<b>3,15</b>	3,25	10,18	98,98
	<b>2</b>	11,82	22,00	97,80
	<b>1</b>	37,37	59,37	94,06
	<b>0,5</b>	20,11	79,47	92,05
	<b>0,2</b>	196,49	275,97	72,40
	<b>0,1</b>	667,93	943,90	5,61
	<b>0,083</b>	29,19	973,08	2,69
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	25,36	998,45	0,16

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol K</b>	<b>5</b>	31,50	31,50	96,85
	<b>3,15</b>	49,88	81,38	91,86
	<b>2</b>	54,45	135,84	86,42
	<b>1</b>	103,97	239,80	76,02
	<b>0,5</b>	48,31	288,11	71,19
	<b>0,2</b>	287,91	576,02	42,40
	<b>0,1</b>	361,54	937,57	6,24
	<b>0,083</b>	35,24	972,81	2,72
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	26,01	998,82	0,12

*Tableau III-5: Résultats de la granulométrie par tamisage des sols étudiés en (0-20cm) de l'année 2010.*

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn / Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol F</b>	<b>5</b>	17,73	17,73	98,23
	<b>3,15</b>	8,29	26,02	97,40
	<b>2</b>	8,68	34,70	96,53
	<b>1</b>	26,27	60,96	93,90
	<b>0,5</b>	18,02	78,98	92,10
	<b>0,2</b>	440,13	519,11	48,09
	<b>0,1</b>	441,39	960,49	3,95
	<b>0,083</b>	14,89	975,38	2,46
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	24,21	999,59	0,04

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn / Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol R</b>	<b>5</b>	7,65	7,65	99,24
	<b>3,15</b>	3,89	11,53	98,85
	<b>2</b>	13,08	24,61	97,54
	<b>1</b>	38,11	62,72	93,73
	<b>0,5</b>	19,37	82,09	91,79
	<b>0,2</b>	193,62	275,71	72,43
	<b>0,1</b>	668,91	944,63	5,54
	<b>0,083</b>	28,24	972,86	2,71
	<b>&lt;0.083 (fond)</b>	24,94	997,80	0,22

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn / Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol K</b>	<b>5</b>	31,88	31,88	96,81
	<b>3,15</b>	48,75	80,63	91,94
	<b>2</b>	52,27	132,91	86,71
	<b>1</b>	106,56	239,47	76,05
	<b>0,5</b>	47,33	286,80	71,32
	<b>0,2</b>	289,48	576,29	42,37
	<b>0,1</b>	362,11	938,40	6,16
	<b>0,083</b>	33,18	971,58	2,84
	<b>&lt;0.083 (fond)</b>	28,06	999,64	0,04



*Tableau III-6: Résultats de la granulométrie par tamisage des sols étudiés en (20-40cm) de l'année 2006.*

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn / Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol F</b>	<b>5</b>	16,36	16,36	98,36
	<b>3,15</b>	6,76	23,13	97,69
	<b>2</b>	6,98	30,10	96,99
	<b>1</b>	24,21	54,32	94,57
	<b>0,5</b>	16,14	70,46	92,95
	<b>0,2</b>	438,02	508,47	49,15
	<b>0,1</b>	461,74	970,22	2,98
	<b>0,083</b>	15,05	985,27	1,47
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	23,56	997,20	0,28

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn / Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol R</b>	<b>5</b>	5,37	5,37	99,46
	<b>3,15</b>	4,52	9,89	99,01
	<b>2</b>	11,82	21,70	97,83
	<b>1</b>	39,09	60,80	93,92
	<b>0.5</b>	18,68	79,48	92,05
	<b>0,2</b>	201,42	280,90	71,91
	<b>0,1</b>	667,41	948,31	5,17
	<b>0,083</b>	30,68	979,00	2,10
	<b>&lt;0.083 (fond)</b>	20,50	996,50	0,35

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn / Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol K</b>	<b>5</b>	32,57	32,57	96,74
	<b>3,15</b>	46,44	79,01	92,10
	<b>2</b>	59,08	138,09	86,19
	<b>1</b>	103,94	242,03	75,80
	<b>0.5</b>	45,95	287,97	71,20
	<b>0,2</b>	281,61	569,58	43,04
	<b>0,1</b>	372,15	941,73	5,83
	<b>0,083</b>	36,59	971,33	2,17
	<b>&lt;0.083 (fond)</b>	21,91	999,23	0,08

*Tableau III-7: Résultats de la granulométrie par tamisage des sols étudiés en (20-40cm) de l'année 2007.*

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol F</b>	<b>5</b>	18,48	18,48	98,15
	<b>3,15</b>	7,94	26,42	97,36
	<b>2</b>	7,54	33,96	96,60
	<b>1</b>	25,10	59,06	94,09
	<b>0,5</b>	17,76	76,81	92,32
	<b>0,2</b>	437,00	513,81	48,62
	<b>0,1</b>	441,43	955,25	4,48
	<b>0,083</b>	16,54	971,78	2,82
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	24,64	996,42	0,36

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol R</b>	<b>5</b>	5,73	5,73	99,43
	<b>3,15</b>	4,59	10,31	98,97
	<b>2</b>	11,83	22,14	97,79
	<b>1</b>	38,53	60,67	93,93
	<b>0,5</b>	18,28	78,95	92,11
	<b>0,2</b>	200,13	279,08	72,09
	<b>0,1</b>	663,06	942,13	5,79
	<b>0,083</b>	31,09	973,23	2,68
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	21,79	995,02	0,50

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol K</b>	<b>5</b>	34,86	34,86	96,51
	<b>3,15</b>	48,08	82,95	91,71
	<b>2</b>	58,86	141,81	85,82
	<b>1</b>	105,93	247,74	75,23
	<b>0,5</b>	49,26	297,00	70,30
	<b>0,2</b>	285,29	582,29	41,77
	<b>0,1</b>	356,65	938,94	6,11
	<b>0,083</b>	36,94	974,89	2,41
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	24,91	999,8	0,02

*Tableau III-8: Résultats de la granulométrie par tamisage des sols étudiés en (20-40cm) de l'année 2008.*

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol F</b>	<b>5</b>	19,08	19,08	98,09
	<b>3,15</b>	7,91	26,99	97,30
	<b>2</b>	7,43	34,43	96,56
	<b>1</b>	26,29	60,71	93,93
	<b>0,5</b>	17,61	78,33	92,17
	<b>0,2</b>	436,02	514,35	48,56
	<b>0,1</b>	439,83	954,18	4,58
	<b>0,083</b>	17,51	971,69	2,83
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	23,90	995,59	0,44

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol R</b>	<b>5</b>	6,48	6,48	99,35
	<b>3,15</b>	3,91	10,38	98,96
	<b>2</b>	11,29	21,67	97,83
	<b>1</b>	38,91	60,58	93,94
	<b>0,5</b>	19,80	80,38	91,96
	<b>0,2</b>	198,53	278,92	72,11
	<b>0,1</b>	664,33	943,25	5,68
	<b>0,083</b>	30,20	973,45	2,66
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	23,37	996,82	0,32

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol K</b>	<b>5</b>	33,09	33,09	96,69
	<b>3,15</b>	48,46	81,55	91,84
	<b>2</b>	57,20	138,75	86,13
	<b>1</b>	104,45	243,20	75,68
	<b>0,5</b>	47,58	290,77	70,92
	<b>0,2</b>	288,49	579,26	42,07
	<b>0,1</b>	361,91	941,16	5,88
	<b>0,083</b>	34,85	971,01	2,40
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	24,09	999,1	0,09

*Tableau III-9: Résultats de la granulométrie par tamisage des sols étudiés en (20-40cm) de l'année 2009.*

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol F</b>	<b>5</b>	17,43	17,43	98,26
	<b>3,15</b>	9,02	26,45	97,35
	<b>2</b>	7,67	34,12	96,59
	<b>1</b>	27,59	61,71	93,83
	<b>0,5</b>	19,08	80,79	91,92
	<b>0,2</b>	437,30	518,09	48,19
	<b>0,1</b>	439,25	957,34	4,27
	<b>0,083</b>	15,51	972,85	2,71
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	24,00	996,86	0,31

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol R</b>	<b>5</b>	7,05	7,05	99,30
	<b>3,15</b>	3,31	10,35	98,96
	<b>2</b>	12,02	22,37	97,76
	<b>1</b>	38,01	60,38	93,96
	<b>0,5</b>	20,45	80,83	91,92
	<b>0,2</b>	195,82	276,65	72,33
	<b>0,1</b>	665,66	942,31	5,77
	<b>0,083</b>	28,46	970,77	2,92
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	24,73	995,50	0,45

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol K</b>	<b>5</b>	32,04	32,04	96,80
	<b>3,15</b>	50,73	82,76	91,72
	<b>2</b>	55,38	138,14	86,19
	<b>1</b>	105,74	243,88	75,61
	<b>0,5</b>	49,13	293,01	70,70
	<b>0,2</b>	286,93	579,94	42,01
	<b>0,1</b>	360,31	940,25	5,98
	<b>0,083</b>	34,36	971,61	2,54
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	25,36	998,97	0,11

*Tableau III-10: Résultats de la granulométrie par tamisage des sols étudiés en (20-40cm) de l'année 2010.*

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol F</b>	<b>5</b>	18,03	18,03	98,20
	<b>3,15</b>	8,43	26,46	97,35
	<b>2</b>	8,83	35,29	96,47
	<b>1</b>	26,72	62,01	93,80
	<b>0,5</b>	18,33	80,33	91,97
	<b>0,2</b>	438,63	518,97	48,10
	<b>0,1</b>	439,89	958,86	4,11
	<b>0,083</b>	14,52	973,37	2,66
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	23,60	996,98	0,30

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol R</b>	<b>5</b>	7,78	7,78	99,22
	<b>3,15</b>	3,96	11,74	98,83
	<b>2</b>	13,30	25,04	97,50
	<b>1</b>	38,76	63,80	93,62
	<b>0,5</b>	19,70	83,50	91,65
	<b>0,2</b>	192,96	276,46	72,35
	<b>0,1</b>	666,64	943,09	5,69
	<b>0,083</b>	27,53	970,63	2,94
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	24,32	994,94	0,51

Echantillon	Maille des tamis en (mm)	Masse des tamis en (g)		Tamisats cumulés (100 – (Rn/ Ps)) en (%)
		Partiels (Ri)	Cumulés (Rn)	
<b>Sol K</b>	<b>5</b>	32,42	32,42	96,76
	<b>3,15</b>	49,58	82,00	91,80
	<b>2</b>	53,16	135,16	86,48
	<b>1</b>	108,37	243,53	75,65
	<b>0,5</b>	48,13	291,67	70,83
	<b>0,2</b>	288,50	580,16	41,98
	<b>0,1</b>	360,88	941,04	5,90
	<b>0,083</b>	32,35	971,39	2,66
	<b>&lt;0,083 (fond)</b>	27,36	998,75	0,03

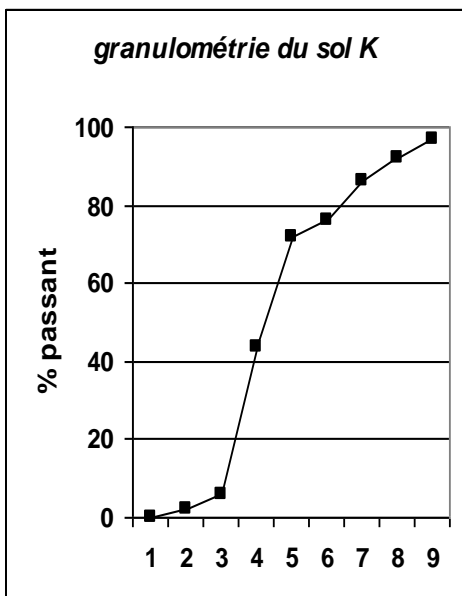
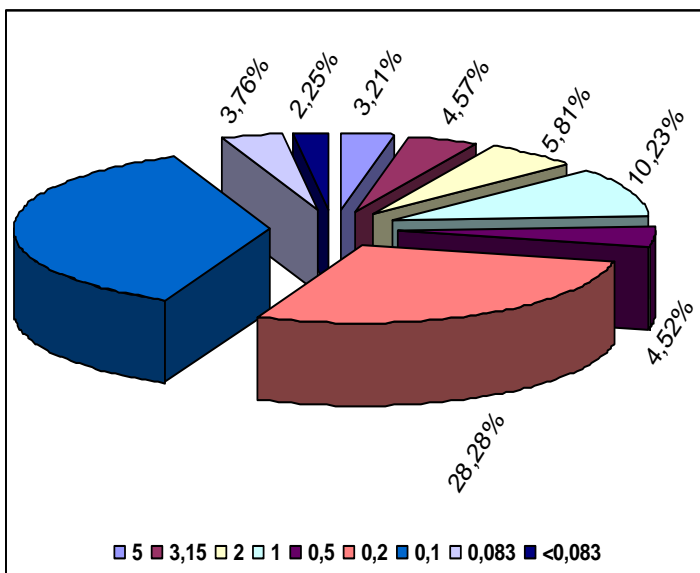
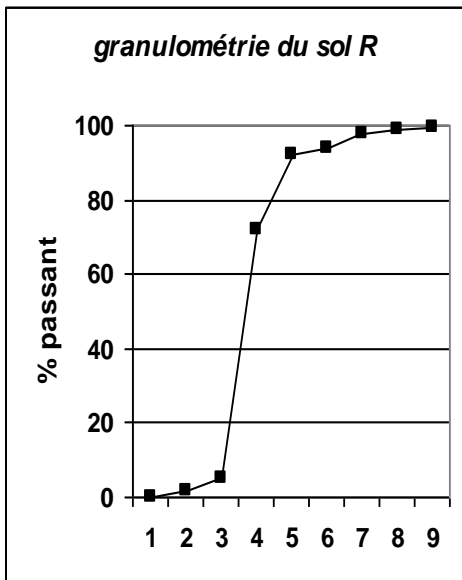
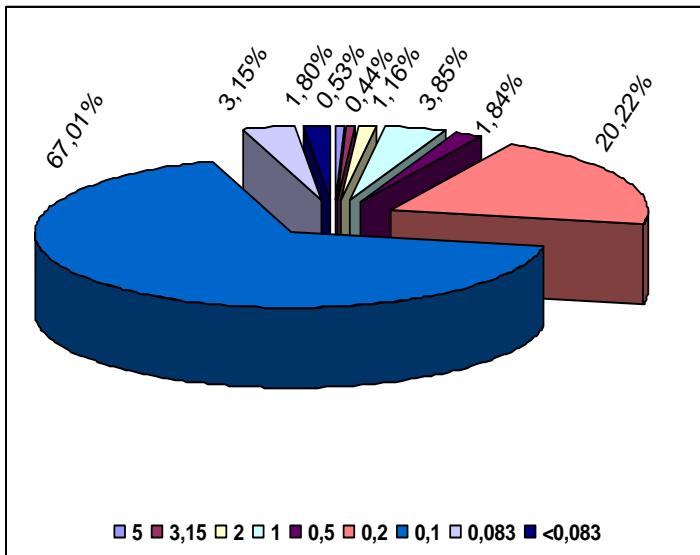
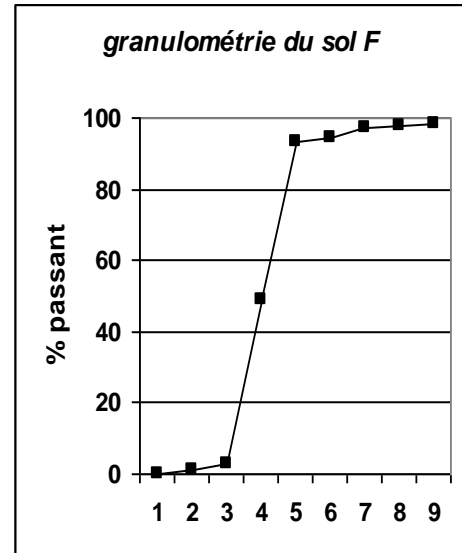
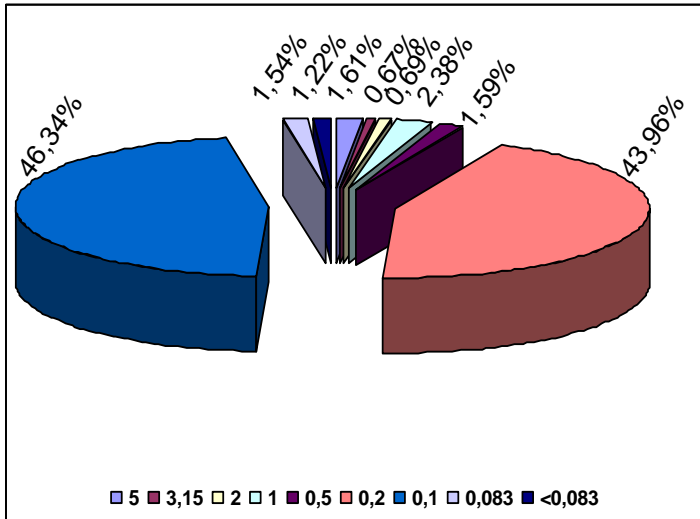


Figure III-1: Granulométrie, colonne de tamis des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2006.

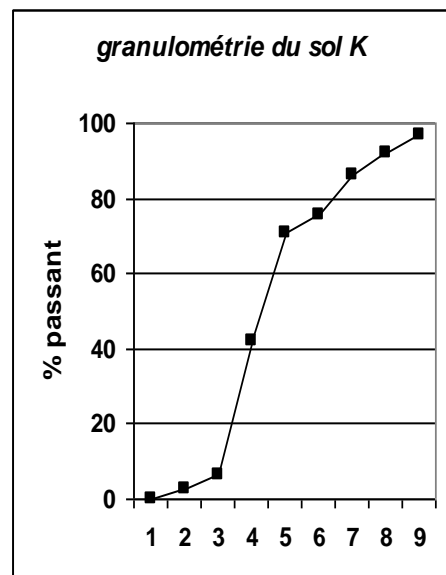
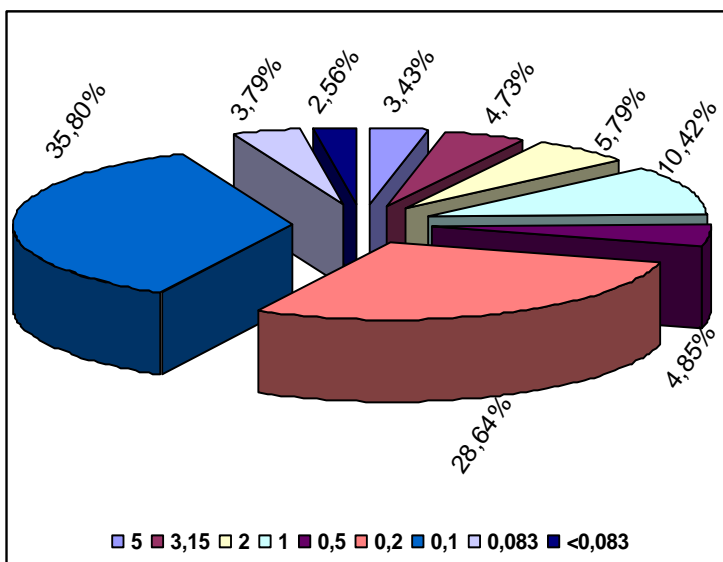
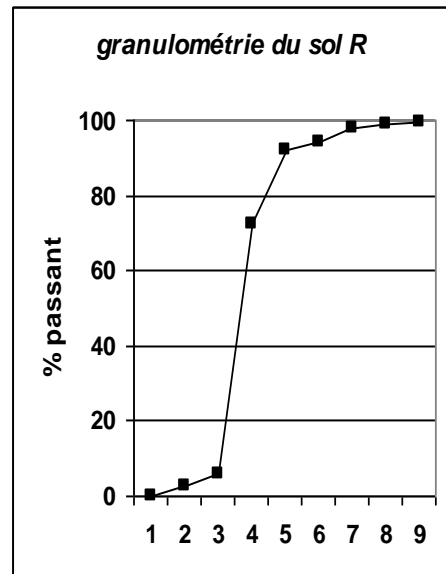
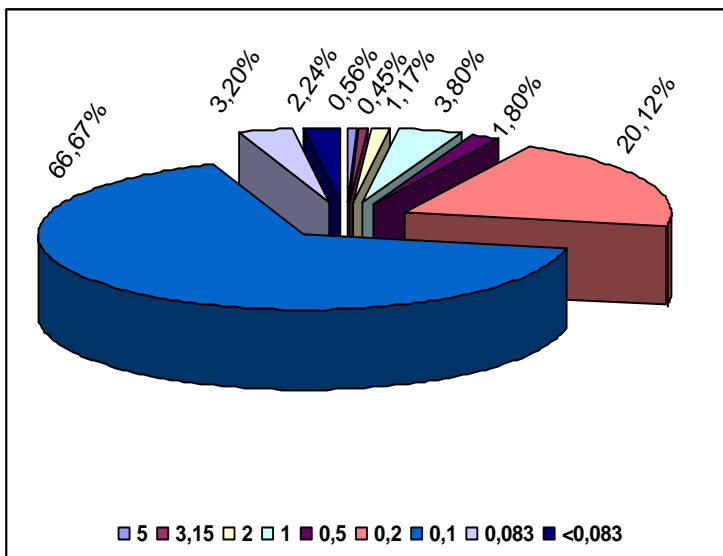
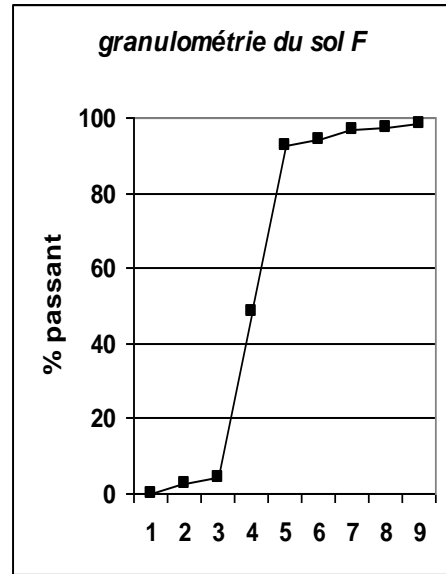
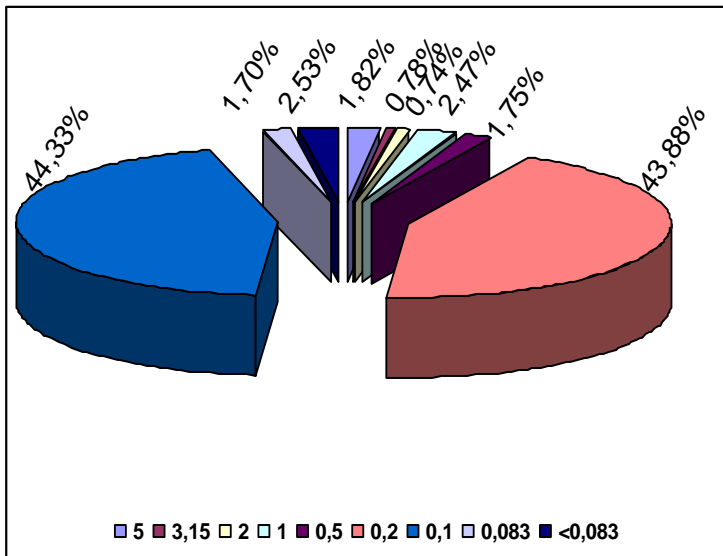


Figure III-2: Granulométrie, colonne de tamis des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2007.

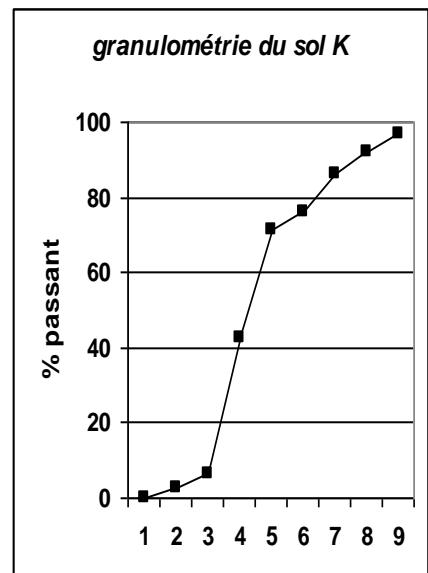
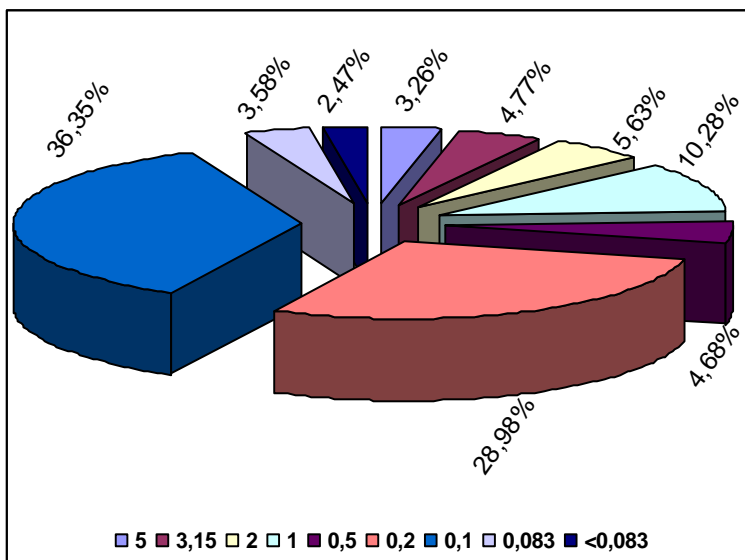
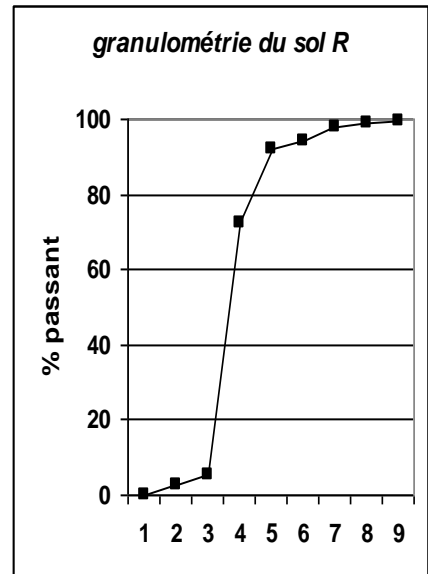
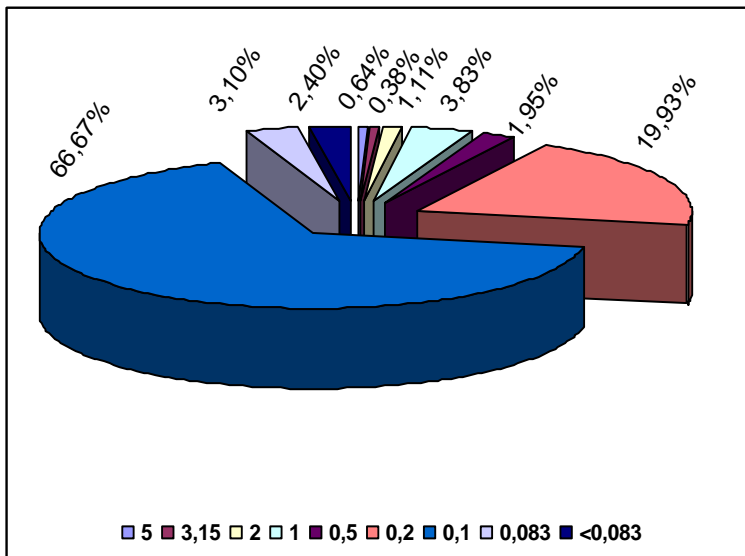
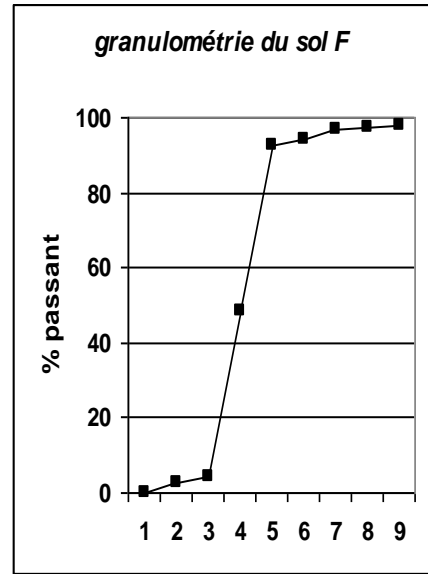
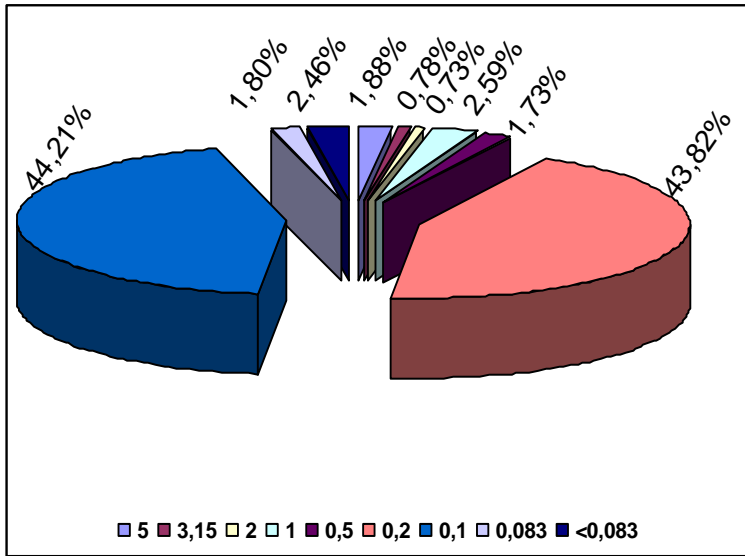


Figure III-3: Granulométrie, colonne de tamis des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2008.



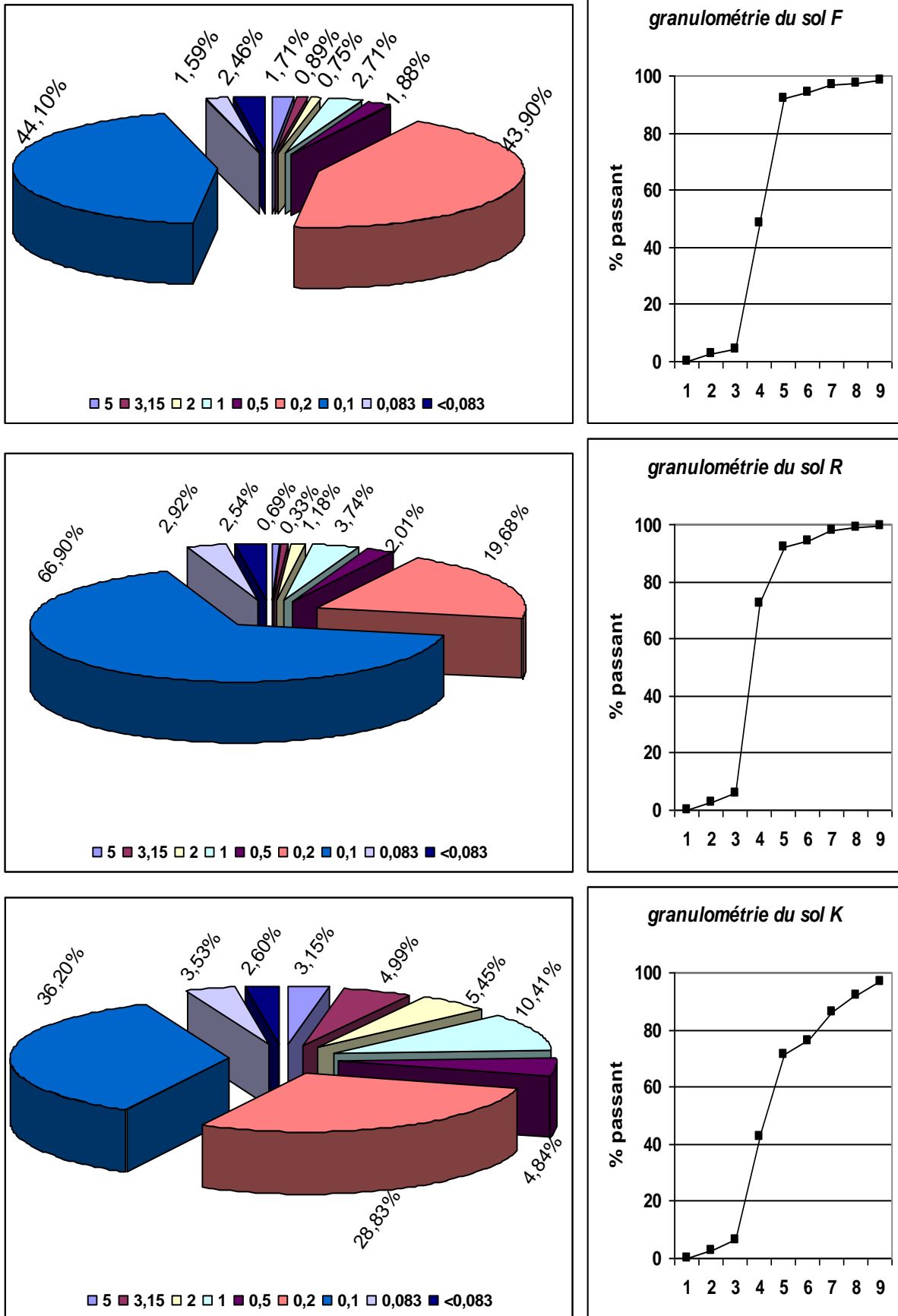


Figure III-4: Granulométrie, colonne de tamis des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2009.

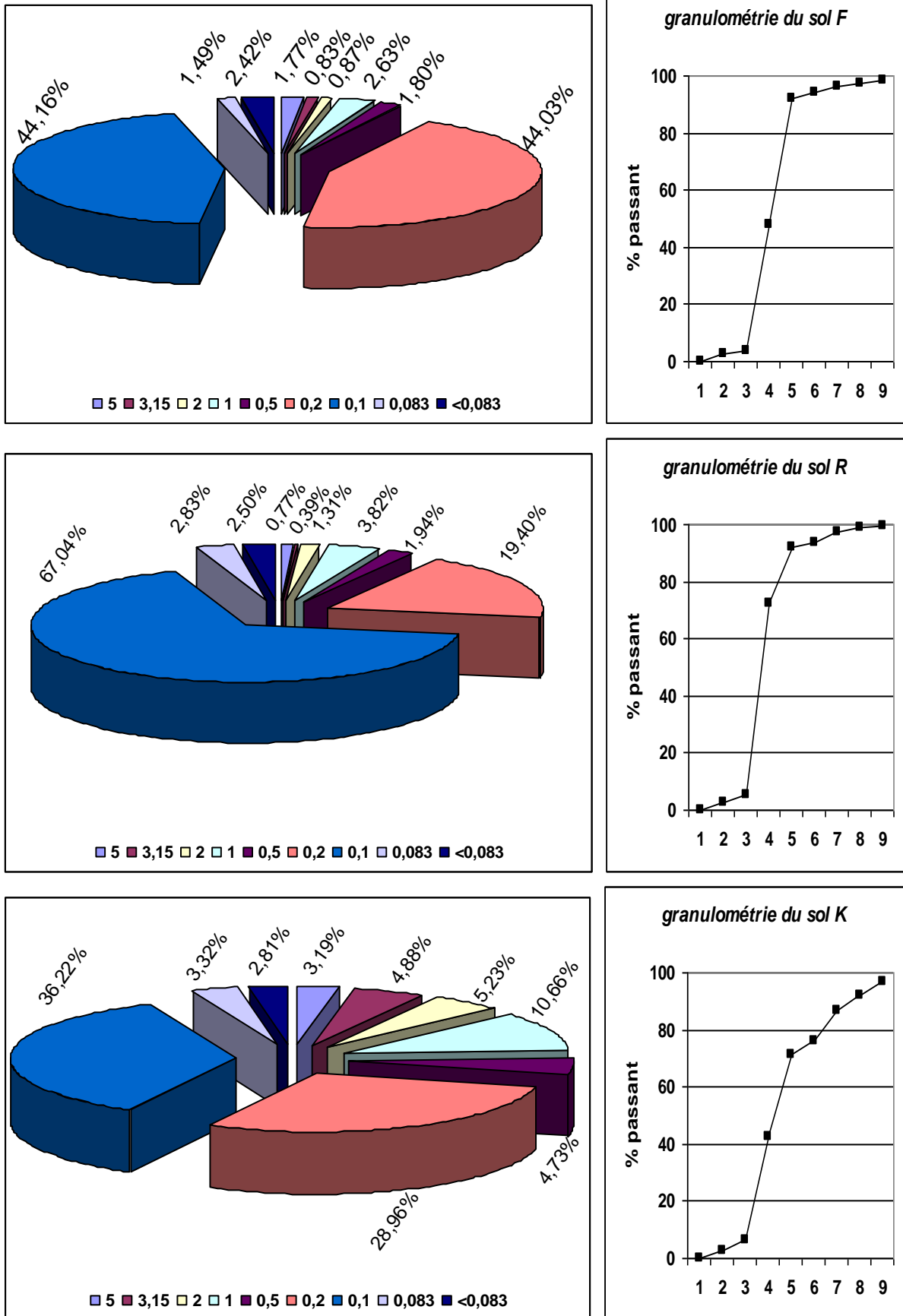


Figure III-5: Granulométrie, colonne de tamis des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2010.

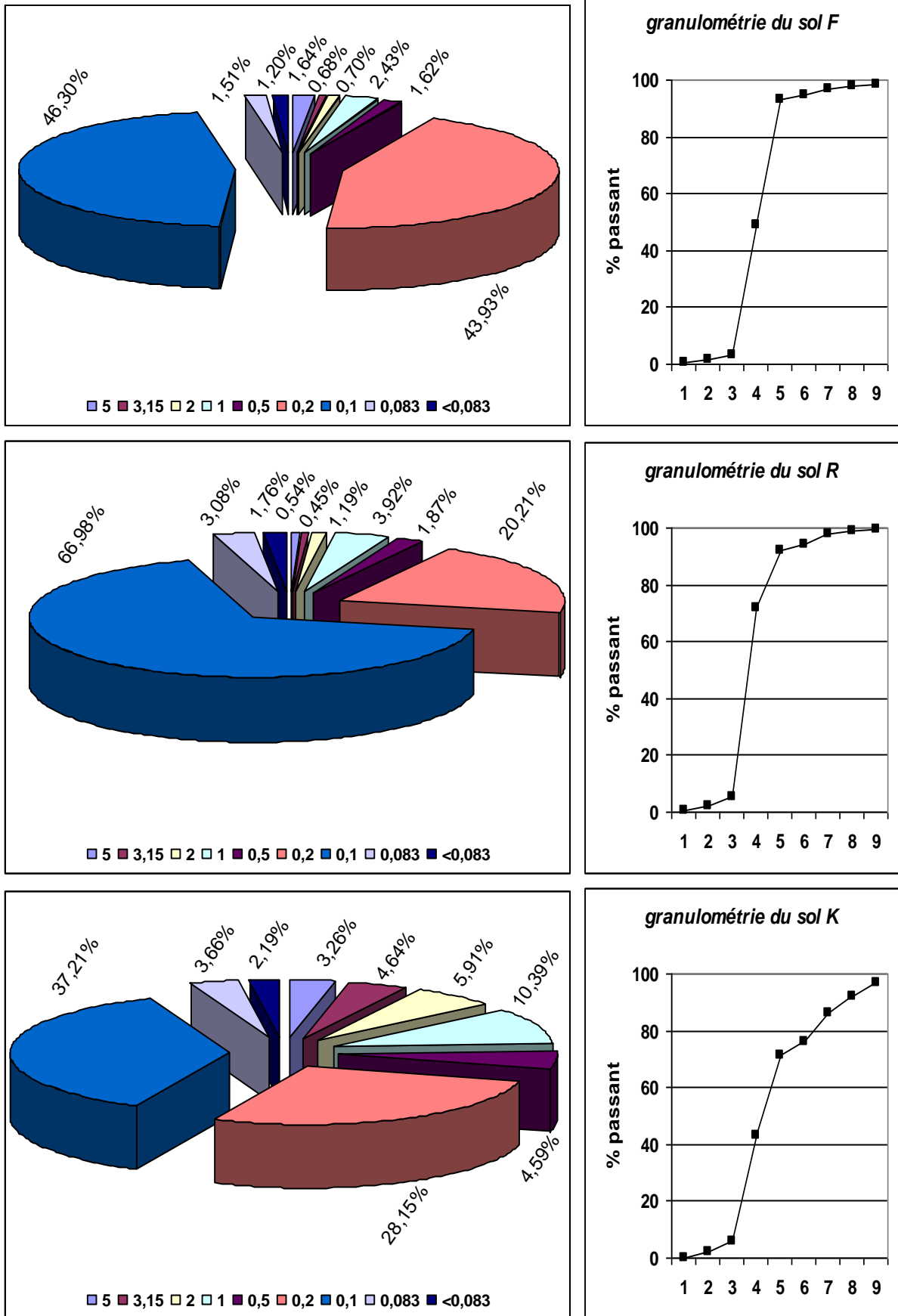


Figure III-6: Granulométrie, colonne de tamis des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2006.

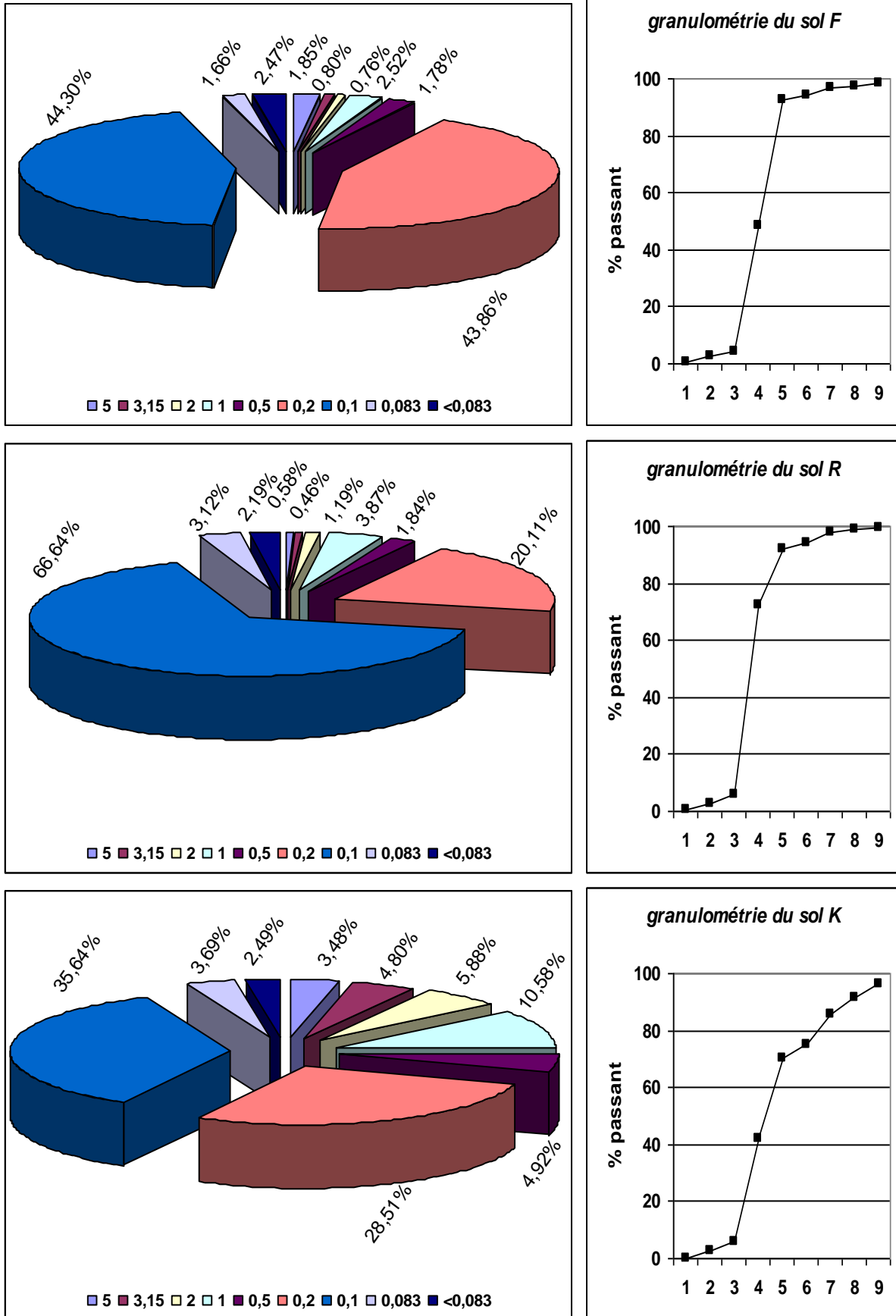


Figure III-7: Granulométrie, colonne de tamis des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2007.

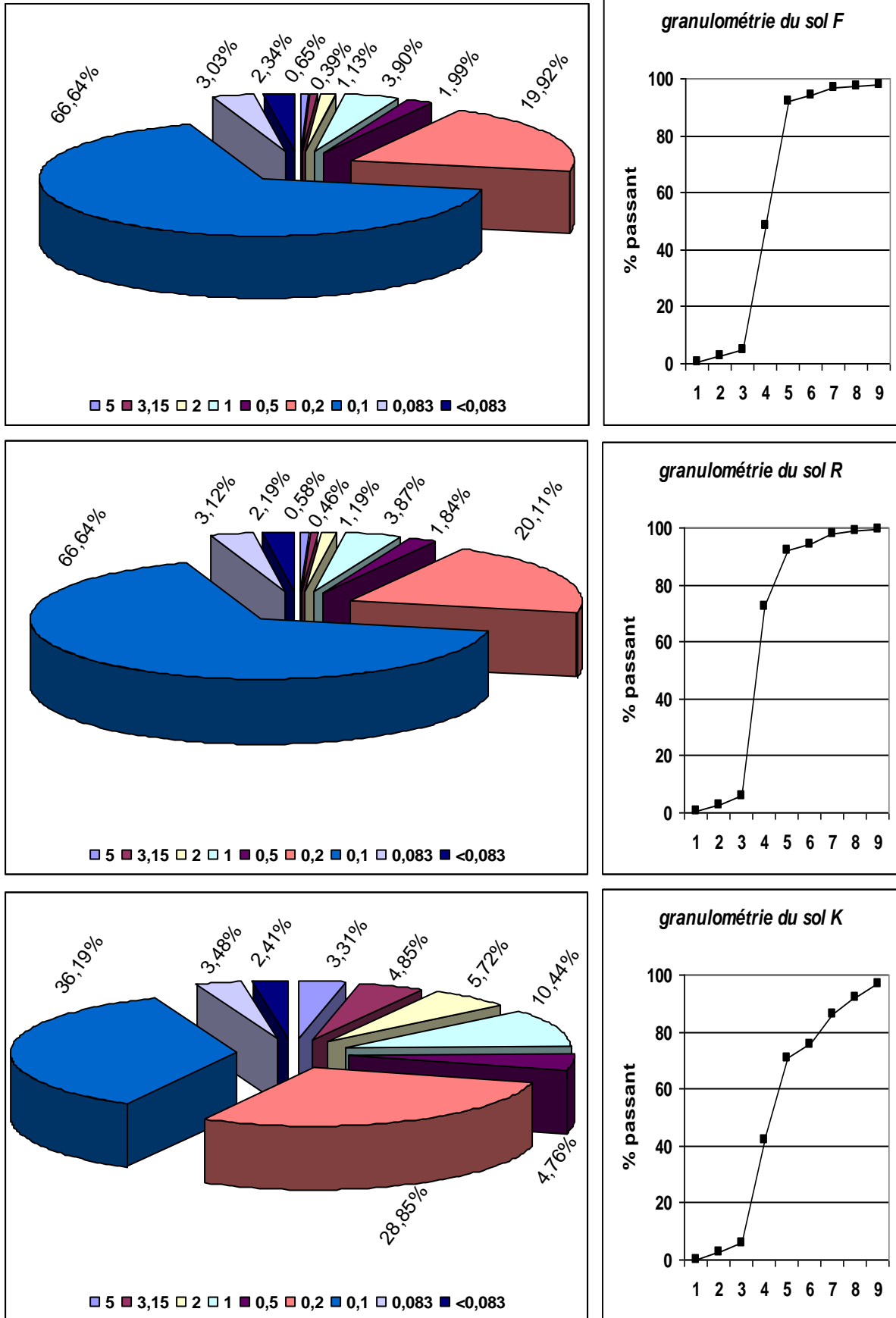


Figure III-8: Granulométrie, colonne de tamis des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2008.

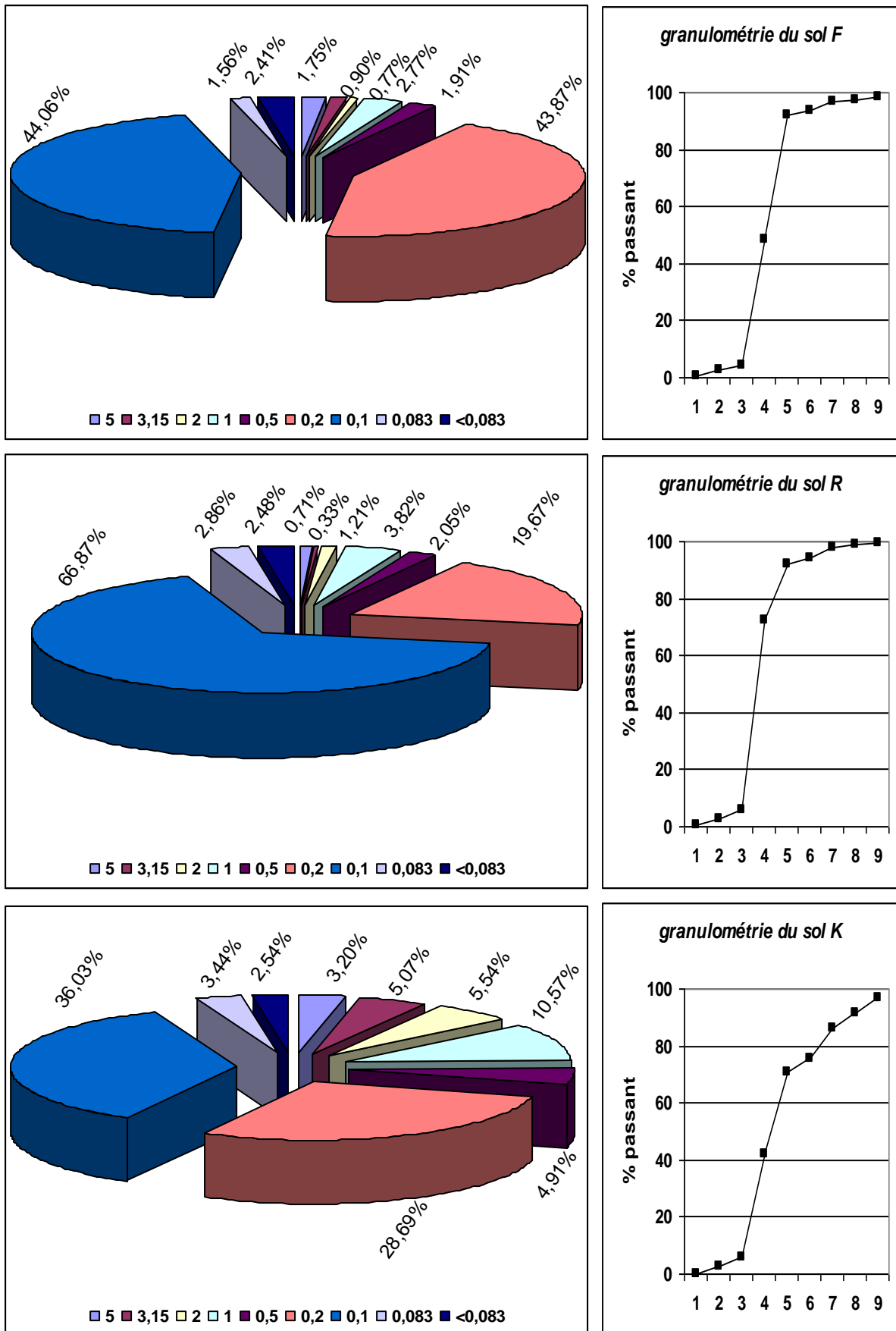


Figure III-9: Granulométrie, colonne de tamis des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2009.

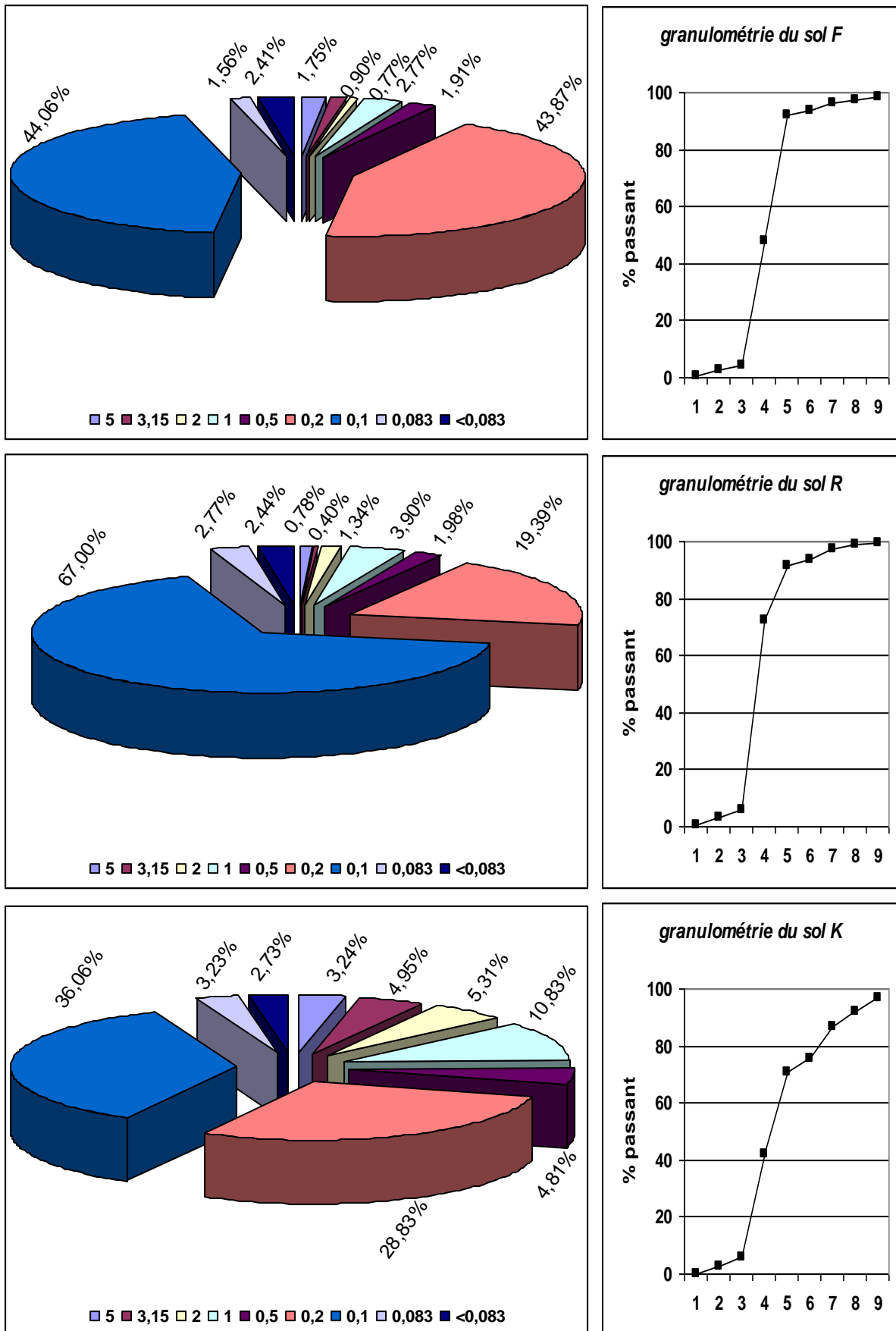


Figure III-10: Granulométrie, colonne de tamis des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2010.

A la lumière de ces résultats, on peut dire que:

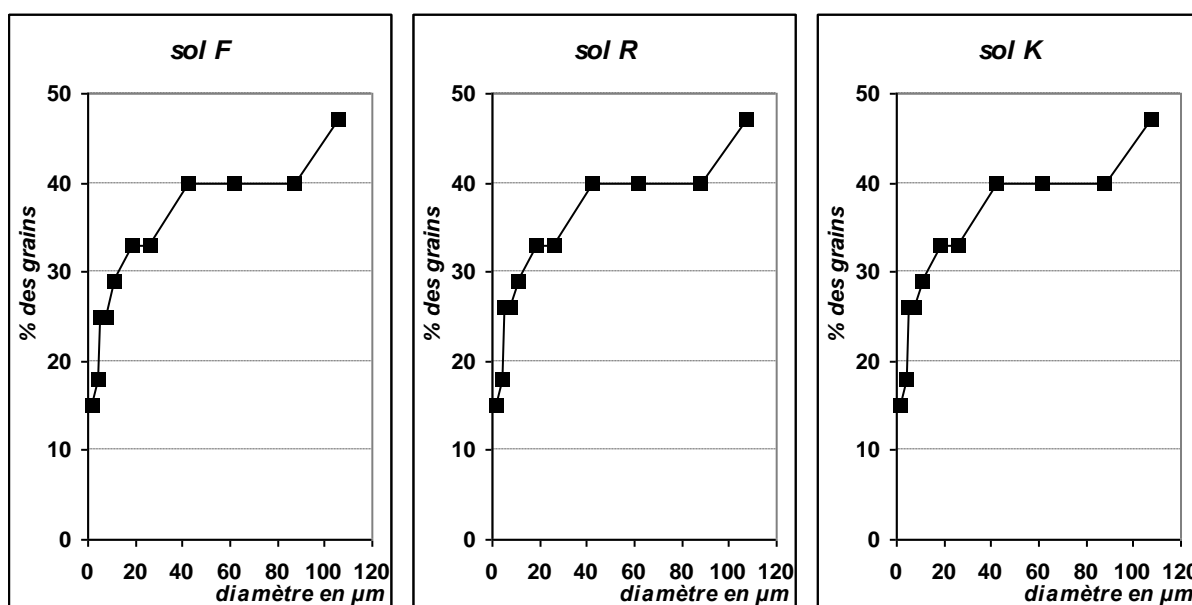
Les trois sols (F, K, R) ont des profils semblables. Ils sont majoritairement composés de la fraction de taille 0,1 mm et de la fraction 0,2 mm avec respectivement des pourcentages suivants: 44% et 43%; 36% et 28%; 66% et 10%, donc leurs texture d'après les données de la littérature indiquées dans le tableau I-1 est celle d'un sable fin.

De plus, d'après le tableau II-1 (partie expérimentale) les trois sols appartiennent donc à la classe « **B** » (sols sableux).

### III.1.1.2. Sédimentation

La répartition granulométrique par sédimentation des différentes fractions obtenues pour les trois sols pendant cinq années d'étude en deux profondeurs (0-20cm) et (20-40cm) est donnée dans les tableaux (Annexe 01) et exprimée par les courbes granulométrique (Fig.III-11 à III-20).

#### i. Profondeur 0-20cm



**Figure III-11:** Histogrammes illustrant la sédimentation des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2006.



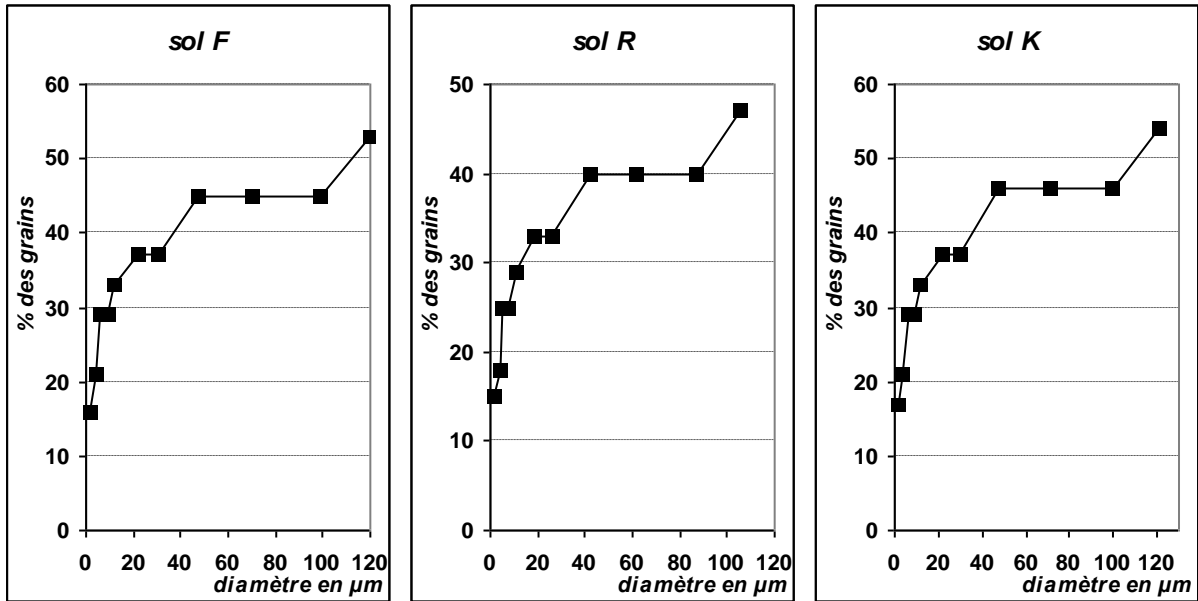


Figure III-12: Histogrammes illustrant la sédimentation des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2007.

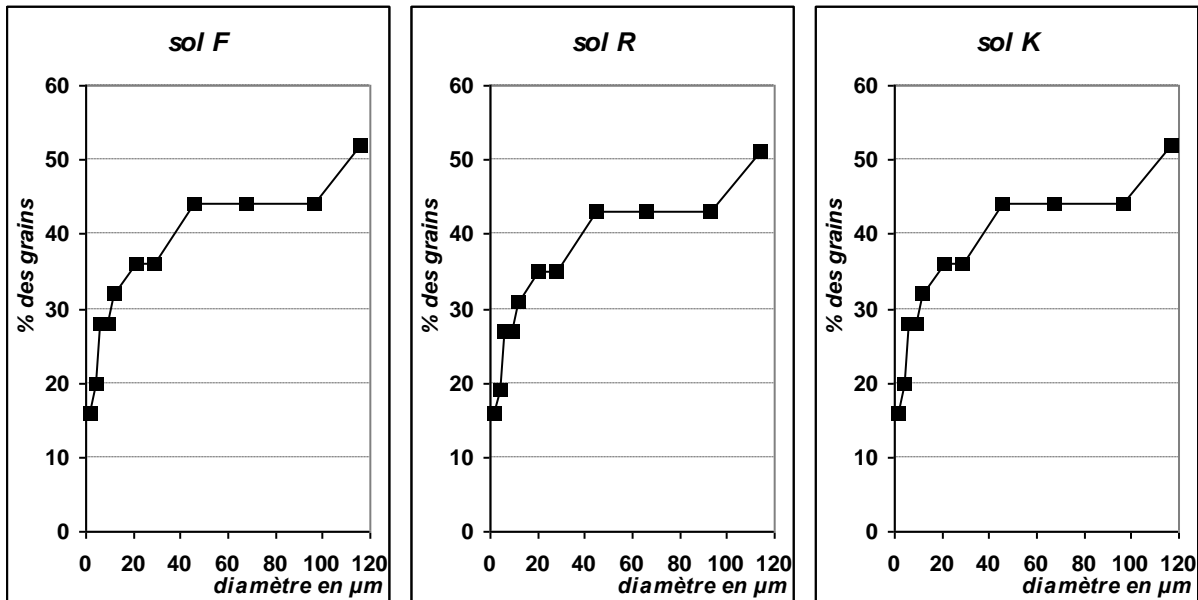


Figure III-13: Histogrammes illustrant la sédimentation des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2008.

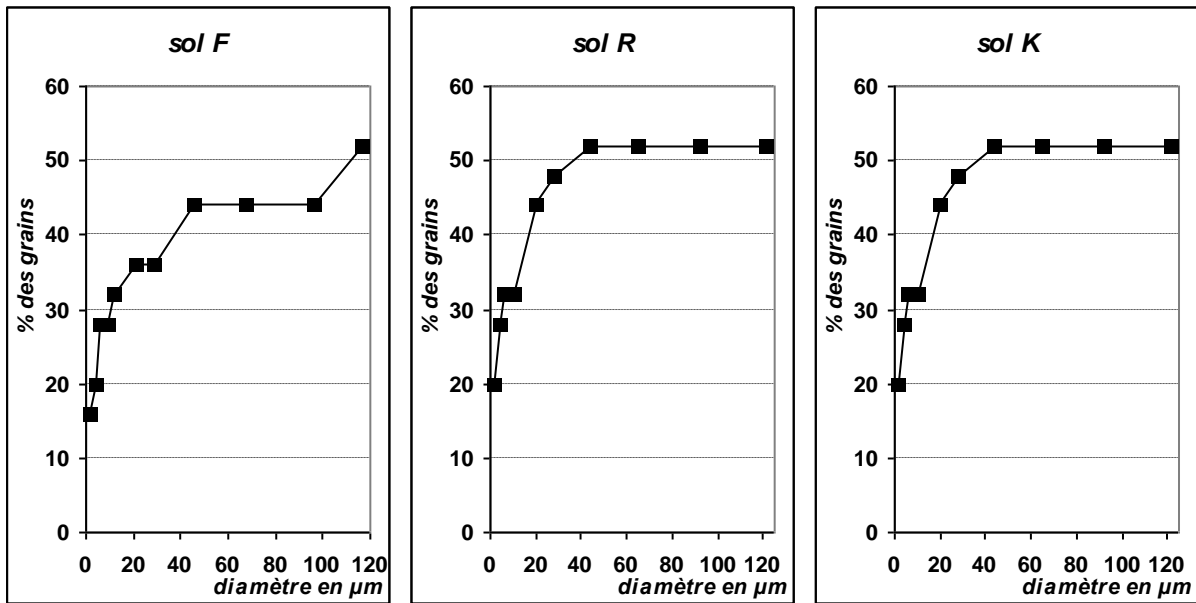


Figure III-14: Histogrammes illustrant la sédimentation des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2009.

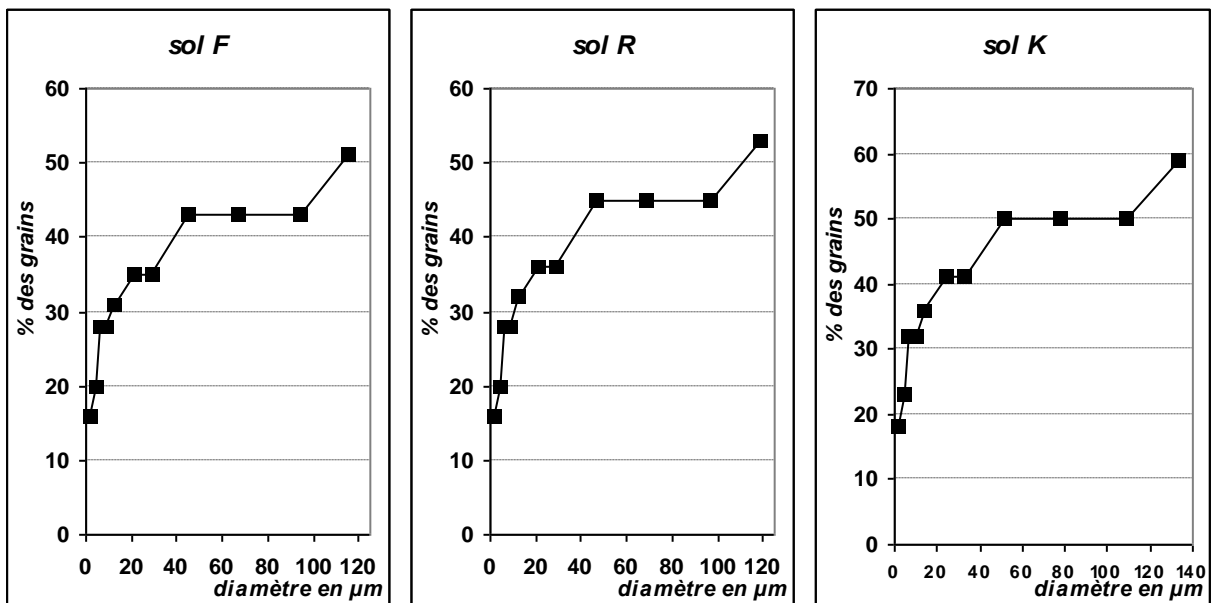


Figure III-15: Histogrammes illustrant la sédimentation des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2010.

ii. Profondeur 20-40cm

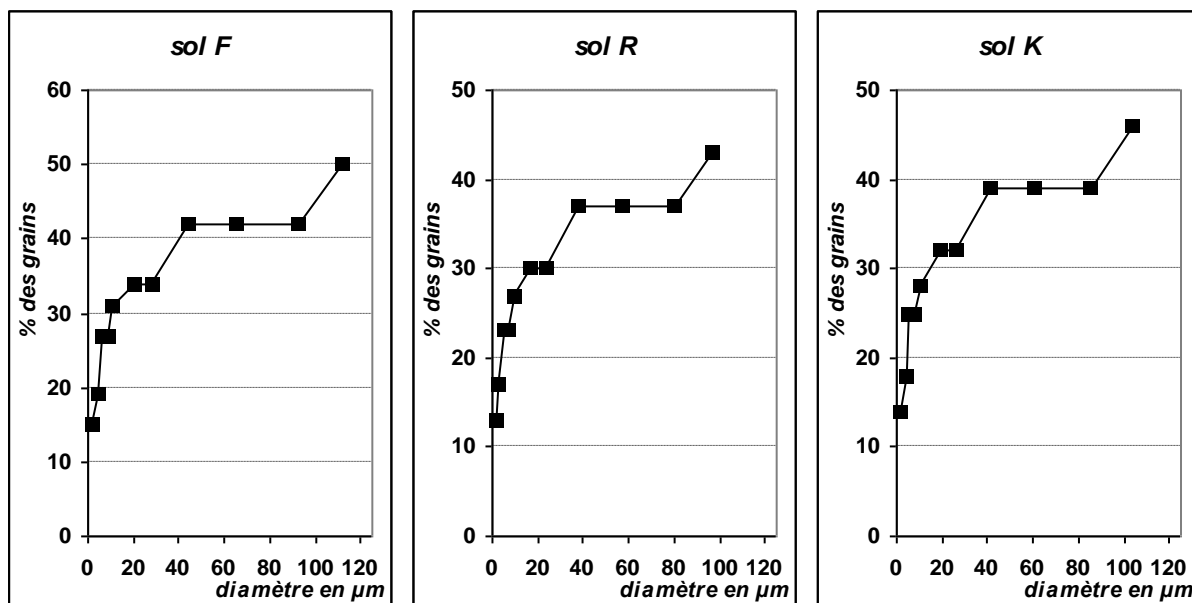


Figure III-16: Histogrammes illustrant la sédimentation des sols étudiés en profondeur (20-40cm) pour l'année 2006.

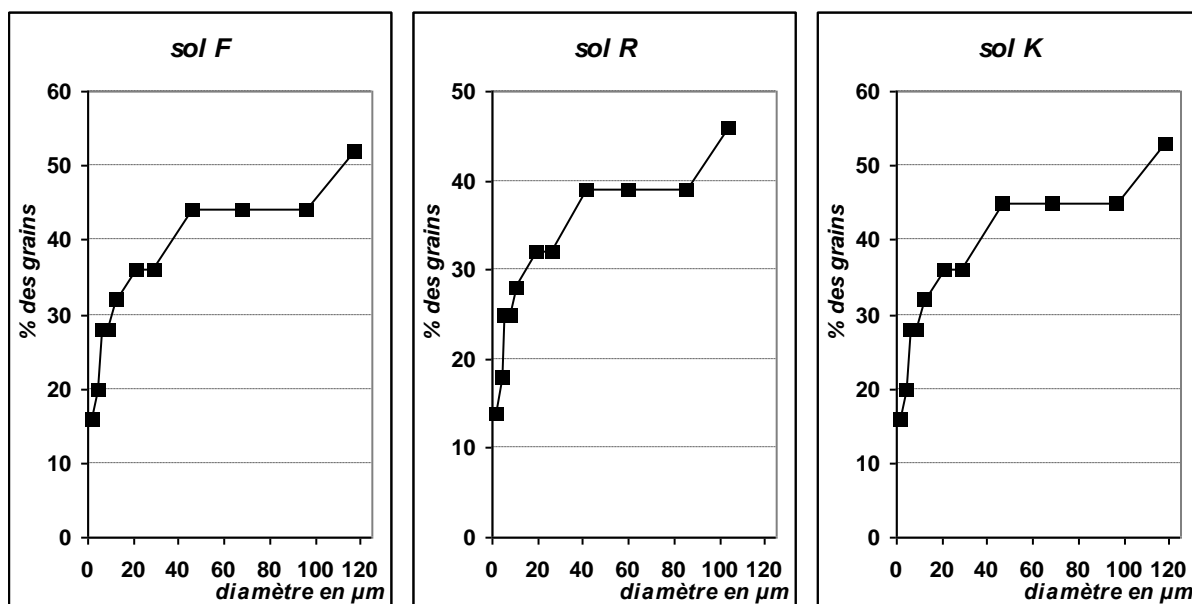


Figure III-17: Histogrammes illustrant la sédimentation des sols étudiés en profondeur (20-40cm) pour l'année 2007.

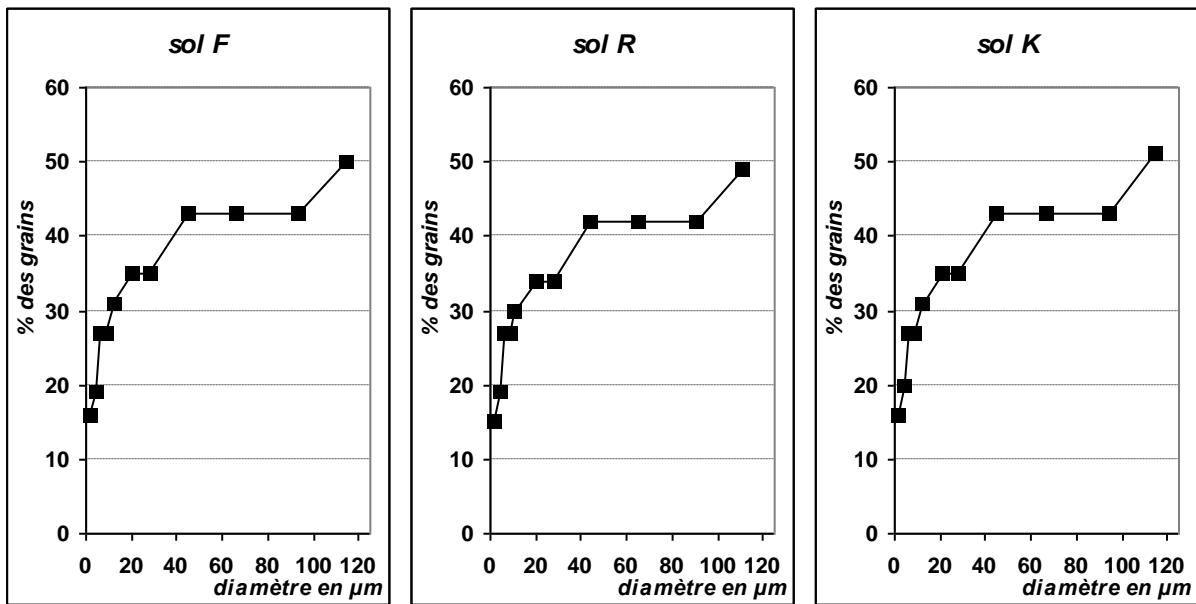


Figure III-18: Histogrammes illustrant la sédimentation des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2008.

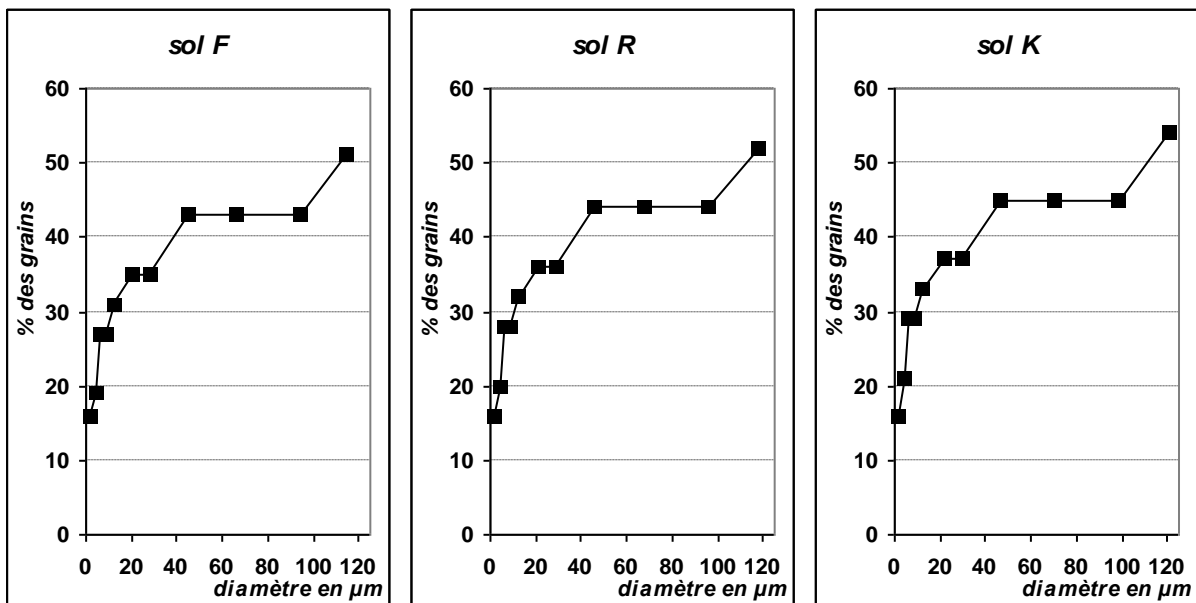
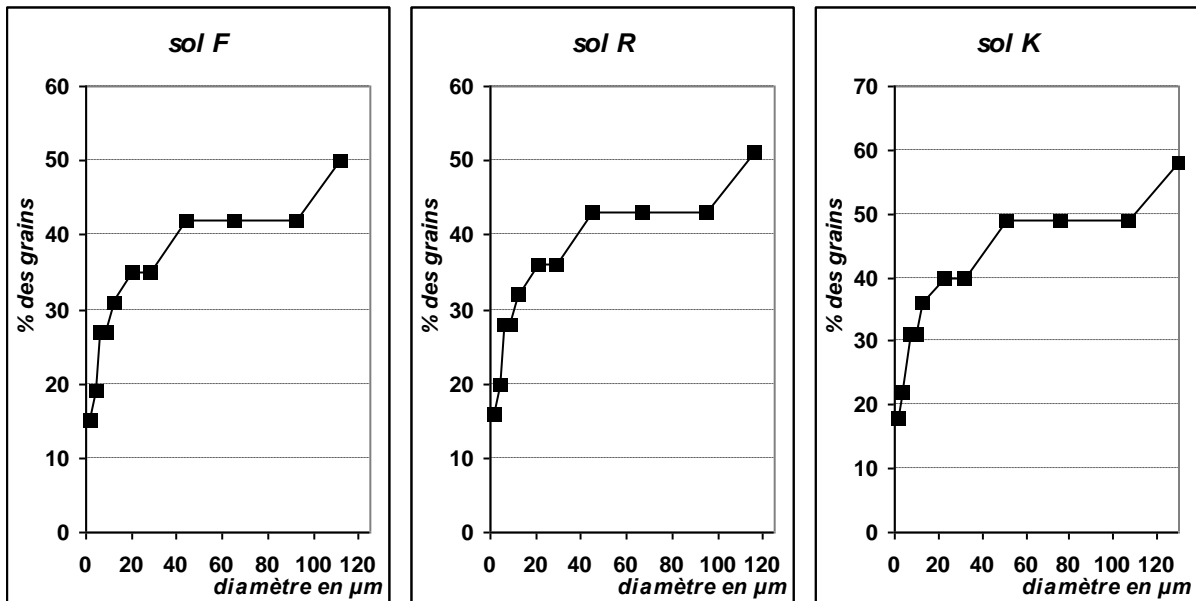


Figure III-19: Histogrammes illustrant la sédimentation des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2009.



**Figure III-20:** Histogrammes illustrant la sédimentation des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2010.

La sédimentation est une opération qui détermine ou qui complète le tamisage des fractions de diamètre (D) inférieur à 80 micromètres ( $< 0,08\text{mm}$ ).

Les résultats de la sédimentation des trois sols F, K et R pour les deux couches 0-20cm (Fig.III-11 à III-15) et 20-40cm (Fig.III-16 à III-20) montrent que le fond a une texture de limon grossier car il est composé majoritairement de particules de diamètre entre 20  $\mu\text{m}$  et 50 $\mu\text{m}$  avec respectivement par un pourcentage important (45%, 45% et 52%) et de particules de diamètre entre 20  $\mu\text{m}$  et 2  $\mu\text{m}$  qui sont les limons fins avec respectivement par un pourcentage (33%, 32 et 36%), ensuite de particules de diamètre  $\leq 2\mu\text{m}$  (tableau I-1) qui sont les argiles avec respectivement par un pourcentage faible (16%, 16% et 18%).

### III.1.2. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS AGRICOLES ETUDIES

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. Après les prélèvements, les échantillons sont d'abord séchés à l'air libre avant d'être tamisés à 2 mm, selon la norme NF ISO 11464 de prétraitement des sols pour analyse physico chimiques. <sup>75</sup>

L'ensemble des résultats physico-chimiques est présenté dans les tableaux III-11 à III-15.

*Tableau III-11: Paramètres physico-chimiques des sols étudiés de l'année 2006.*

Profondeur en centimètre (cm)	SOL F	SOL K	SOL R	Norme utilisée	
<b>Capacité d'échange cationique (CEC)</b>					
0-20	31,56 ± 3,17	31,99 ± 3,21	32,01 ± 3,21	<b>AFNOR NF X31-130</b>	
20-40	32,53 ± 3,26	32,77 ± 3,29	32,92 ± 3,30		
<b>Teneur en matière organique (MO)</b>					
0-20	2,94 ± 0,09	5,92 ± 0,18	2,78 ± 0,09	<b>NF ISO 10694</b>	
20-40	3,01 ± 0,09	6,06 ± 0,19	2,86 ± 0,09		
<b>Teneur en carbonates (CaCO<sub>3</sub>)</b>					
0-20	5,25 ± 0,16	5,68 ± 0,18	4,80 ± 0,15	<b>NF ISO 10693 (AFNOR NF P94-048)</b>	
20-40	5,37 ± 0,17	5,82 ± 0,18	4,96 ± 0,15		
<b>L'humidité résiduelle (H)</b>					
0-20	11,00 ± 0,23	13,00 ± 0,27	9,00 ± 0,19	<b>NF ISO 11465 (AFNOR NF X 31-102)</b>	
20-40	13,00 ± 0,27	15,00 ± 0,32	12,34 ± 0,26		
<b>pH-eau/ H<sub>2</sub>O</b>					
0-20	8,47 ± 0,26	8,66 ± 0,27	7,29 ± 0,23	<b>NF ISO 10390 (AFNOR NF X31-103)</b>	
20-40	8,67 ± 0,27	8,87 ± 0,28	7,60 ± 0,24		
<b>pH-KCl</b>					
0-20	8,25 ± 0,42	8,44 ± 0,43	8,08 ± 0,25		
20-40	8,44 ± 0,43	8,44 ± 0,26	8,44 ± 0,26		
<b>pH-CaCl<sub>2</sub></b>					
0-20	7,67 ± 0,39	7,85 ± 0,40	7,76 ± 0,24		
20-40	7,85 ± 0,40	7,85 ± 0,25	8,09 ± 0,25		
<b>Valeurs de bleu de méthylène (VBS)</b>					
0-20	0,12	0,19	0,11	<b>NF P 18-592</b>	
20-40	0,14	0,18	0,10		
<b>Localisation</b>					
longitude (L)	35°05'21,67"	35°05'25,04"	35°05'39,44"	<b>TOPOGRAPHIE</b>	
latitude (W)	01°52'21"	01°52'24"	01°52'30"		

*Tableau III-12: Paramètres physico-chimiques des sols étudiés de l'année 2007.*

Profondeur en centimètre (cm)	SOL F	SOL K	SOL R	Norme utilisée	
<b>Capacité d'échange cationique</b>					
0-20	32,65 ± 3,27	32,87 ± 3,30	30,29 ± 3,04	<b>AFNOR NF X31-130</b>	
20-40	33,48 ± 3,36	33,69 ± 3,37	31,19 ± 3,13		
<b>Teneur en matière organique</b>					
0-20	3,01 ± 0,09	6,07 ± 0,19	2,86 ± 0,09	<b>NF ISO 10694</b>	
20-40	3,09 ± 0,10	6,22 ± 0,19	2,95 ± 0,09		
<b>Teneur en carbonates</b>					
0-20	5,15 ± 0,16	5,89 ± 0,18	4,56 ± 0,14	<b>NF ISO 10693 (AFNOR NF P94-048)</b>	
20-40	5,28 ± 0,16	6,04 ± 0,19	4,70 ± 0,15		
<b>L'humidité résiduelle</b>					
0-20	10,73 ± 0,33	11,96 ± 0,37	9,96 ± 0,31	<b>NF ISO 11465 (AFNOR NF X 31-102)</b>	
20-40	12,69 ± 0,39	13,82 ± 0,43	13,49 ± 0,42		
<b>pH-eau/ H<sub>2</sub>O</b>					
0-20	8,25 ± 0,26	7,97 ± 0,25	8,07 ± 0,25	<b>NF ISO 10390 (AFNOR NF X31-103)</b>	
20-40	8,46 ± 0,26	8,17 ± 0,25	8,31 ± 0,26		
<b>pH-KCl</b>					
0-20	8,04 ± 0,35	7,34 ± 0,32	8,94 ± 0,39		
20-40	8,24 ± 0,36	7,77 ± 0,34	8,23 ± 0,36		
<b>pH-CaCl<sub>2</sub></b>					
0-20	7,47 ± 0,33	7,05 ± 0,31	8,59 ± 0,37		
20-40	7,66 ± 0,33	7,23 ± 0,31	8,85 ± 0,39		
<b>valeurs de bleu de méthylène</b>					
0-20	0,13	0,15	0,12	<b>NF P 18-592</b>	
20-40	0,14	0,19	0,10		
<b>Localisation</b>					
longitude (L)	35°05'23"	35°05'28"	35°05'35"	<b>TOPOGRAPHIE</b>	
latitude (W)	01°53'14"	01°53'18"	01°53'24"		

*Tableau III-13: Paramètres physico-chimiques des sols étudiés de l'année 2008.*

Profondeur en centimètre (cm)	SOL F	SOL K	SOL R	Norme utilisée	
<b>Capacité d'échange cationique</b>					
0-20	30,15 ± 3,02	32,94 ± 3,30	29,13 ± 2,92	<b>AFNOR NF X31-130</b>	
20-40	30,88 ± 3,10	33,92 ± 3,40	29,85 ± 2,99		
<b>Teneur en matière organique</b>					
0-20	3,09 ± 0,10	5,92 ± 0,18	2,79 ± 0,09	<b>NF ISO 10694</b>	
20-40	2,96 ± 0,09	6,44 ± 0,20	3,05 ± 0,09		
<b>Teneur en carbonates</b>					
0-20	5,25 ± 0,16	5,68 ± 0,18	4,80 ± 0,15	<b>NF ISO 10693 (AFNOR NF P94-048)</b>	
20-40	5,38 ± 0,17	5,85 ± 0,18	4,92 ± 0,15		
<b>L'humidité résiduelle</b>					
0-20	11,25 ± 0,46	11,09 ± 0,45	10,47 ± 0,43	<b>NF ISO 11465 (AFNOR NF X 31-102)</b>	
20-40	13,30 ± 0,55	12,87 ± 0,53	14,11 ± 0,58		
<b>pH-eau/ H<sub>2</sub>O</b>					
0-20	8,66 ± 0,27	7,39 ± 0,23	8,48 ± 0,26	<b>NF ISO 10390 (AFNOR NF X31-103)</b>	
20-40	8,87 ± 0,28	7,61 ± 0,24	8,69 ± 0,27		
<b>pH-KCl</b>					
0-20	8,44 ± 0,37	6,81 ± 0,30	8,40 ± 0,41		
20-40	8,63 ± 0,38	7,24 ± 0,32	8,62 ± 0,38		
<b>pH-CaCl<sub>2</sub></b>					
0-20	7,84 ± 0,34	6,54 ± 0,29	8,03 ± 0,40		
20-40	8,03 ± 0,35	6,73 ± 0,30	8,25 ± 0,36		
<b>valeurs de bleu de méthylène</b>					
0-20	0,15	0,17	0,13	<b>NF P 18-592</b>	
20-40	0,15	0,19	0,11		
<b>Localisation</b>					
longitude (L)	35°05'28"	35°05'33"	35°05'38"	<b>TOPOGRAPHIE</b>	
latitude (W)	01°53'24"	01°53'22"	01°53'29"		



*Tableau III-14: Paramètres physico-chimiques des sols étudiés de l'année 2009.*

Profondeur en centimètre	SOL F	SOL K	SOL R	Norme utilisée	
<b>Capacité d'échange cationique</b>					
0-20	31,09 ± 3,12	32,91 ± 3,30	32,24 ± 3,23	<b>AFNOR NF X31-130</b>	
20-40	32,17 ± 3,23	33,37 ± 3,35	32,77 ± 3,29		
<b>Teneur en matière organique</b>					
0-20	3,20 ± 0,10	6,34 ± 0,20	2,98 ± 0,09	<b>NF ISO 10694</b>	
20-40	3,31 ± 0,10	6,43 ± 0,20	3,03 ± 0,09		
<b>Teneur en carbonates</b>					
0-20	5,06 ± 0,16	6,05 ± 0,19	4,15 ± 0,13	<b>NF ISO 10693 (AFNOR NF P94-048)</b>	
20-40	5,24 ± 0,16	6,13 ± 0,19	4,22 ± 0,13		
<b>L'humidité résiduelle</b>					
0-20	10,95 ± 0,56	11,81 ± 0,60	9,04 ± 0,46	<b>NF ISO 11465 (AFNOR NF X 31-102)</b>	
20-40	12,94 ± 0,66	13,49 ± 0,69	12,08 ± 0,62		
<b>pH-eau/ H<sub>2</sub>O</b>					
0-20	8,34 ± 0,26	7,87 ± 0,24	7,32 ± 0,23	<b>NF ISO 10390 (AFNOR NF X31-103)</b>	
20-40	8,63 ± 0,27	7,98 ± 0,25	7,44 ± 0,23		
<b>pH-KCl</b>					
0-20	7,25 ± 0,36	7,25 ± 0,36	8,11 ± 0,40		
20-40	7,59 ± 0,38	7,59 ± 0,38	8,26 ± 0,41		
<b>pH-CaCl<sub>2</sub></b>					
0-20	6,96 ± 0,35	6,96 ± 0,35	7,79 ± 0,39		
20-40	7,06 ± 0,35	7,06 ± 0,35	7,92 ± 0,39		
<b>Valeurs de bleu de méthylène</b>					
0-20	0,16	0,18	0,15		<b>NF P 18-592</b>
20-40	0,15	0,19	0,11		
<b>Localisation</b>					
longitude (L)	35°05'25"	35°05'30"	35°05'34"	<b>TOPOGRAPHIE</b>	
latitude (W)	01°53'21"	01°53'23"	01°53'26"		

*Tableau III-15: Paramètres physico-chimiques des sols étudiés de l'année 2010.*

Profondeur en centimètre	SOL F	SOL K	SOL R	Norme utilisée	
<b>Capacité d'échange cationique</b>					
0-20	31,14 ± 3,12	31,26 ± 3,14	29,52 ± 2,96	<b>AFNOR NF X31-130</b>	
20-40	32,05 ± 3,21	32,17 ± 3,23	30,40 ± 3,05		
<b>Teneur en matière organique</b>					
0-20	3,29 ± 0,10	6,52 ± 0,20	3,07 ± 0,10	<b>NF ISO 10694</b>	
20-40	3,39 ± 0,10	6,71 ± 0,21	3,16 ± 0,10		
<b>Teneur en carbonates</b>					
0-20	5,17 ± 0,16	6,83 ± 0,21	4,73 ± 0,15	<b>NF ISO 10693 (AFNOR NF P94-048)</b>	
20-40	5,32 ± 0,16	7,03 ± 0,22	4,87 ± 0,15		
<b>L'humidité résiduelle</b>					
0-20	11,13 ± 0,12	13,35 ± 0,15	10,30 ± 0,11	<b>NF ISO 11465 (AFNOR NF X 31-102)</b>	
20-40	13,15 ± 0,14	15,10 ± 0,17	13,95 ± 0,15		
<b>pH-eau/ H<sub>2</sub>O</b>					
0-20	8,52 ± 0,26	8,89 ± 0,28	8,34 ± 0,26	<b>NF ISO 10390 (AFNOR NF X31-103)</b>	
20-40	8,77 ± 0,27	8,93 ± 0,28	8,59 ± 0,27		
<b>pH-KCl</b>					
0-20	8,19 ± 0,38	8,19 ± 0,38	8,24 ± 0,43		
20-40	8,50 ± 0,40	8,50 ± 0,40	8,54 ± 0,40		
<b>pH-CaCl<sub>2</sub></b>					
0-20	7,86 ± 0,37	7,86 ± 0,37	8,88 ± 0,41		
20-40	7,90 ± 0,37	7,90 ± 0,37	8,14 ± 0,38		
<b>valeurs de bleu de méthylène</b>					
0-20	0,18	0,17	0,16	<b>NF P 18-592</b>	
20-40	0,16	0,18	0,11		
<b>Localisation</b>					
longitude (L)	35°05'35"	35°05'39"	35°05'41"	<b>TOPOGRAPHIE</b>	
latitude (W)	01°53'27"	01°53'28"	01°53'34"		

### III.1.2.1. Le pH

Le pH est un facteur important influençant la solubilité et la spéciation du métal et donc sa toxicité, <sup>62</sup> quand le pH diminue d'une unité, la concentration des cations métalliques libres augmente d'environ un facteur de 2 dans la solution de sol et par conséquent améliore la phytoextraction. <sup>65,66</sup>

Les organismes et les microorganismes eux-mêmes peuvent influencer la disponibilité des métaux lourds dans leur environnement proche par acidification locale lors d'une réaction métabolique ou par la production de composés complexant les métaux lourds. <sup>66</sup>

Les trois sols collectés pendant les cinq années, sont d'une basicité remarquable qui s'échelonne entre 7,29-8,89 dans la profondeur 0-20cm et entre 7,44-8,93 dans la profondeur 20-40cm (tableaux III-11 à III-15), donc l'évolution du pH pourraient notamment résulter de l'activité biologique et d'une augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub>. Cependant les valeurs pH-KCl et pH-CaCl<sub>2</sub> sont inférieures aux valeurs mesurées pour le pH-H<sub>2</sub>O, ceci est dû au fait que l'acidité réelle prend en compte uniquement les ions H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> libérés dans la solution par le sol, alors que l'acidité potentielle (K<sup>+</sup> et Ca<sup>++</sup>) prend en compte également les ions H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> échangeables et adsorbés par la matière organique. <sup>80</sup>

### III.1.2.2. Teneur en carbonates CaCO<sub>3</sub>

Les carbonates se trouvent en forte quantité, ce qui explique la basicité des sols étudiés. Cette quantité du carbonate change en fonction des années d'étude (2006 à 2010). En analysant les résultats trouvés dans les tableaux III-12 à III-16, on constate que la teneur en carbonate varie dans la séquence massique suivante :

- dans le sol F: (min: 5,06 ±0,16 et max: 5,25 ±0,16) g/kg en surface (0-20cm) et;  
(min: 5,24 ±0,16 et max: 5,38 ±0,17) g/kg en profondeur (20-40cm).
- dans le sol K: (min: 5,68 ±0,18 et max: 6,83 ±0,21) g/kg en surface (0-20cm) et;  
(min: 5,82 ±0,18 et max: 7,03 ±0,22) g/kg en profondeur.
- dans le sol R: (min: 4,15 ±0,13 et max: 4,80 ±0,15) g/kg en surface et;  
(min: 4,22 ±0,13 et max: 4,96 ±0,15) g/kg en profondeur.

Donc on observe clairement que les valeurs moyennes (g/kg) dans le même profil, en profondeur sont supérieures que celles en surface, tandis qu'en parcelle (comparaison inter sol) la teneur en carbonate est classée dans l'ordre décroissant suivant :

$$[\text{CaCO}_3]_{\text{sol K}} > [\text{CaCO}_3]_{\text{sol F}} > [\text{CaCO}_3]_{\text{sol R}}$$

Donc ces trois sols sont dits calcaires sols. <sup>51</sup> (>4g/kg)

### III.1.2.3. Matière organique (MO en %)

D'après les tableaux (III-12 à III-16) les pourcentages en matières organiques dans le même profil ont des valeurs moyennes (en %) qui varient pour :

- le sol F: (min: 2,94 ±0,09 et max: 3,29 ±0,10) % en surface (0-20cm) et;  
(min: 2,96 ±0,09 et max: 3,39 ±0,10) % en profondeur (20-40cm).
- le sol K: (min: 5,92 ±0,18 et max: 6,52 ±0,20) % en surface (0-20cm) et;  
(min: 6,06 ±0,19 et max: 6,71 ±0,21) % en profondeur (20-40cm).
- le sol R: (min: 2,78 ±0,09 et max: 3,07 ±0,10) % en surface (0-20cm) et;  
(min: 2,86 ±0,09 et max: 3,16 ±0,10) % en profondeur (20-40cm).

La distribution des matières organiques dans le même profil semble homogène avec des teneurs moyennes relativement élevées en profondeur qu'en surface pour les trois sols agricole étudiés et particulièrement dans le sol K. Tandis que la distribution dans les parcelles (inter sol) est classée dans l'ordre décroissant suivant :

$$[\text{MO}]_{\text{sol K}} > [\text{MO}]_{\text{sol F}} > [\text{MO}]_{\text{sol R}}$$

D'après Manceau et al, <sup>66</sup> le sol K est dit: humifère sol (MO entre 4-10%).

### III.1.2.4. Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique (CEC) est également une caractéristique importante d'une matrice solide, elle est moyenne selon Manceau et al, <sup>66</sup> elle correspond à la quantité de cations saturant fixée par le sol dans un milieu tamponné, elle regroupe tous les ions échangeables dans ces sols selon la formule suivante:

$$\text{CEC} = \sum \text{EM}^{x+} = \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{K}^{+} + \text{Na}^{+} + \text{Mn}^{++} + \text{Fe}^{++} + \text{H}^{+}$$

Les composés humiques présentent une affinité particulière pour le cation  $\text{Ca}^{+2}$ . <sup>56</sup> D'après Ekalund et al, <sup>55</sup> les sols minéraux ont une CEC de 0,6 meq/g\* (60meq/100g) et les sols organiques ont une CEC de 2 meq/g (200meq/100).

Les CEC estimées dans nos sols sont moyennes, elles varient entre 29,13 ±2,92 à 32,94 ±3,30 cmoles<sup>+</sup>/kg en surface (0-20cm) et entre 29,85 ±2,99 à 33,92 ±3,40 cmoles<sup>+</sup>/kg en profondeur (20-40cm). Ces valeurs sont élevées en profondeur qu'en surface par la séquence suivante:

$$[\text{CEC}]_{\text{sol K}} > [\text{CEC}]_{\text{sol F}} > [\text{CEC}]_{\text{sol R}}$$

---

\*: 1meq/100g= 1cmoles<sup>+</sup>/kg

### III.1.2.5. L'humidité résiduelle (H en %)

L'humidité résiduelle varie au cours des années, comme suit:

- pour le sol poivron F, elle s'échelonne entre [(10,73 ±0,33)% et 11,25 ±0,46)%] et entre [(12,69 ±0,39)% et (13,30 ±0,55)%] respectivement dans les couches 0-20cm et 20-40cm. L'humidité résiduelle ne change pas au cours des années, elle est de l'ordre 2,5%.(perte d'eau / masse humide).
- pour le sol K, l'humidité résiduelle est borné par un intervalle de variation de [(11,09 ±0,45)% à (13,35 ±0,15)%] dans la couche 0-20cm et par un intervalle de variation de [(12,87 ±0,53)% à (15,10 ±0,17)%] dans la couche 20-40cm.
- Pour le sol R, l'allure de variation ressemble aux deux autres sols, avec un pourcentage de (9,00 ±0,19)% à (10,47 ±0,43) % dans la couche 0-20cm et de (12,08 ±0,62)% à (14,11 ±0,58) % dans la couche 20-40cm.

On remarque que la variation inter sol est intra sol est comme suit :

$$[H]_{\text{sol K}} > [H]_{\text{sol F}} > [H]_{\text{sol R}};$$

Les valeurs moyennes de l'humidité résiduelle trouvées sont plus élevées en profondeur (20-40cm) qu'en surface (0-20cm) dans les trois sols.

### III.1.2.6. Valeur de bleu de méthylène (VBS), exprimé en cm<sup>3</sup>/g

Tous les sols ont révélé des valeurs qui sont totalement inférieures à 0,2 cm<sup>3</sup>/g. Ces valeurs comparées aux valeurs rapportées dans le tableau II-3 (partie expérimentale), confirment que nos sols sont de nature sableux (résultats déjà trouvés dans la section granulométrie).

### III.1.3.TENEUR TOTALE EN ELEMENTS MAJEURS ET METAUX LOURDS (ETM) DANS LES SOLS AGRICOLES ETUDIES

Après avoir effectué la caractérisation physico-chimique des sols et leur traitement, nous avons procédé à l'analyse de leur contenu en métaux lourds, afin de pouvoir déterminer le taux de pollution. Pour cela deux procédés ont été employés:

- extraction totale (minéralisation) qui consiste à une destruction totale de la matrice résiduelle pour déterminer la concentration totale d'un composé ou d'un élément donné dans le résidu. Cette minéralisation avec l'eau régale a été employée par de nombreux auteurs afin de connaître les quantités totales d'éléments dans des échantillons de diverses origines.<sup>27,88</sup>

- extraction séquentielle qui permet de décrire la mise en solution d'élément en fonction de conditions prédéterminées plus ou moins agressives. Cette méthode permet de répartir les éléments fractions plus ou moins disponibles en milieux aqueux, acide, oxydant et réducteur. Elle permet de classer les éléments dans des catégories réputées métastable ou stable. L'extraction séquentielle nous renseigne généralement sur la distribution et le devenir des métaux dans le sol, et par la suite nous permet d'estimer leur potentiel toxique.

### III.1.3.1. Extraction totale par l'eau régale

Tous les résultats obtenus dans cette partie ont été analysés en utilisant la spectroscopie d'émission atomique par plasma à couplage inductif [ICP-AES].

#### i. Eléments majeurs (EM)

L'évaluation des teneurs initiales en éléments majeurs est obtenue après minéralisation des matrices cristallines par attaque à l'eau régale (un mélange d'acides HCl et HNO<sub>3</sub> 3V/V).

Les résultats obtenus des sols (F, K et R) sont donnés dans les tableaux (III-16 à III-20) et représentés sous forme d'histogramme dans les figures (III-21 à III-25).

**Tableau III-16:** Répartition des teneurs totales moyennes (en g/kg/MS) des éléments majeurs en fonction de la profondeur dans les sols étudiés de l'année 2006.

	Ca		K		Mg		Na		Fe	
	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
<b>Sol F</b>	48,80 ±2,65	47,67 ±2,59	1,35 ±0,05	1,31 ±0,05	0,88 ±0,03	0,85 ±0,03	0,92 ±0,03	0,89 ±0,03	3,92 ±0,21	3,49 ±0,19
<b>Sol K</b>	60,65 ±3,29	59,25 ±3,22	5,37 ±0,23	5,24 ±0,22	1,03 ±0,04	1,01 ±0,04	1,62 ±0,05	1,58 ±0,05	7,59 ±0,41	7,14 ±0,38
<b>Sol R</b>	238,27± 12,96	231,69± 12,60	12,05 ±0,51	0,27 ±0,01	4,89 ±0,19	4,46 ±0,17	5,04 ±0,17	4,50 ±0,15	29,75 ±1,60	17,32 ±0,93
<b>* D</b>	10,00 ± 0,54		3,62 ± 0,15		0,97 ± 0,04		0,89 ± 0,03		6,36 ± 0,34	

\*Décharge industrielle d'ALZINC.

**Tableau III-17:** Répartition des teneurs totales moyennes (en g/kg/MS) des éléments majeurs en fonction de la profondeur des sols étudiés de l'année 2007.

	Ca		K		Mg		Na		Fe	
	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
<b>Sol F</b>	48,75 ±2,65	47,54 ±2,59	1,21 ±0,05	1,18 ±0,05	0,94 ±0,04	0,92 ±0,04	0,72 ±0,024	0,70 ±0,02	3,80 ±0,21	3,38 ±0,18
<b>Sol K</b>	57,12 ±3,11	55,75 ±3,03	4,73 ±0,20	4,70 ±0,20	1,73 ±0,07	4,53 ±0,18	1,33 ±0,04	0,40 ±0,01	6,13 ±0,33	5,67 ±0,31
<b>Sol R</b>	201,30 ±10,95	195,49 ±10,63	19,52 ±0,84	18,95 ±0,82	21,37 ±0,84	20,75 ±0,82	4,31 ±0,14	4,19 ±0,14	11,32 ±0,61	7,89 ±0,42
<b>D</b>	8,59 ±0,47		1,44 ± 0,06		0,92 ± 0,03		1,00 ± 0,03		6,13 ± 0,33	

**Tableau III-18:** Répartition des teneurs totales moyennes (en g/kg/MS) des éléments majeurs en fonction de la profondeur des sols étudiés de l'année 2008.

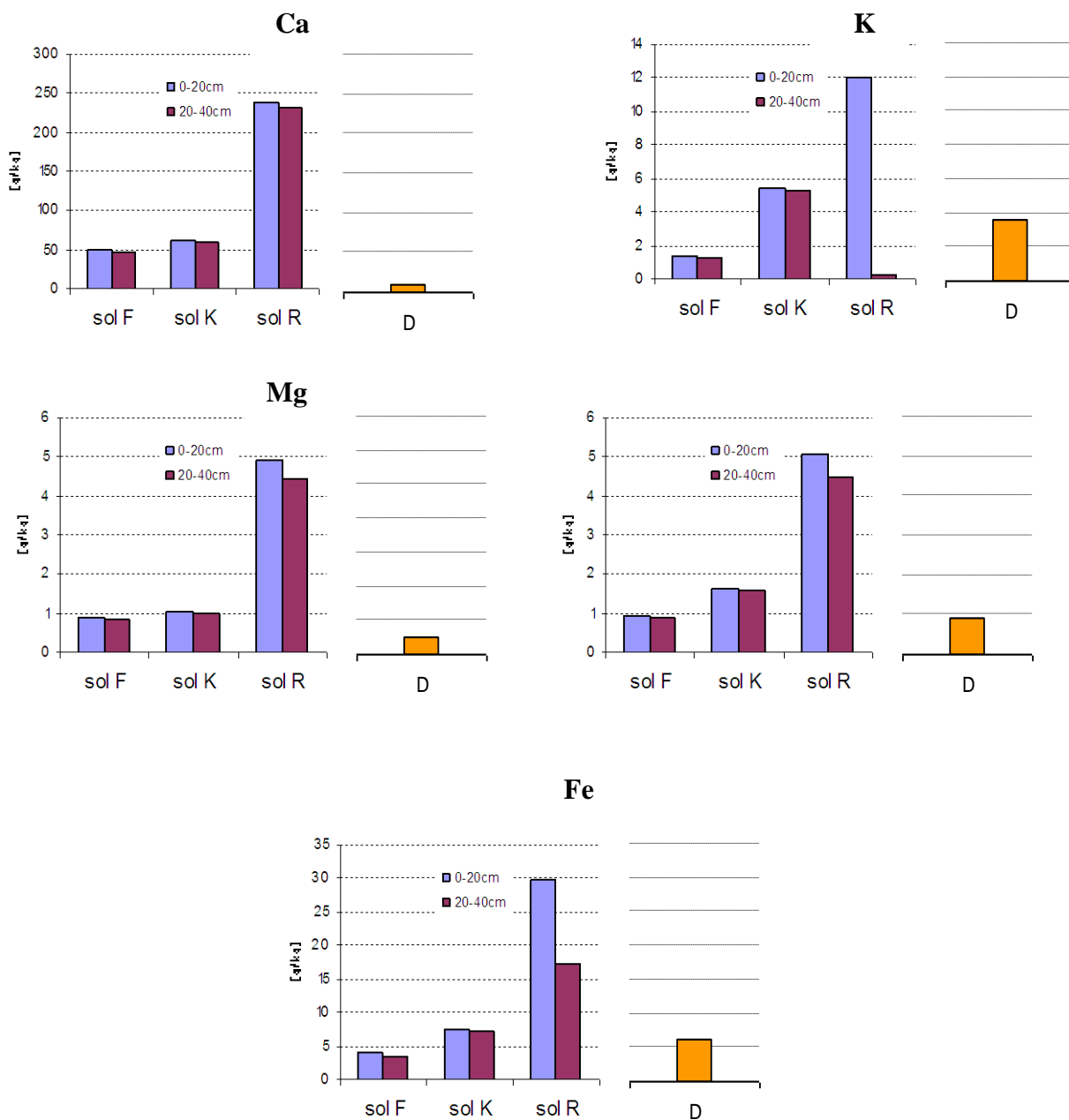
	Ca		K		Mg		Na		Fe	
	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
<b>Sol F</b>	47,61 ±2,59	46,34 ±2,52	1,18 ±0,05	1,12 ±0,05	1,43 ±0,05	1,40 ±0,05	0,53 ±0,02	0,51 ±0,02	4,03 ±0,22	3,91 ±0,21
<b>Sol K</b>	55,11 ±2,99	53,52 ±2,91	2,37 ±0,10	2,30 ±0,10	2,45 ±0,09	2,38 ±0,09	1,19 ±0,04	1,15 ±0,04	5,41 ±0,29	5,29 ±0,28
<b>Sol R</b>	150,11 ±8,17	146,49 ±7,97	8,38 ±0,36	8,18 ±0,35	17,43 ±0,69	17,01 ±0,67	2,94 ±0,10	2,87 ±0,09	9,39 ±0,51	5,96 ±0,32
<b>D</b>	6,43 ±0,35		1,03 ±0,04		0,73 ±0,02		0,12 ±0,04		6,12 ±0,32	

**Tableau III-19:** Répartition des teneurs totales moyennes (en g/kg/MS) de éléments majeurs en fonction de la profondeur des sols étudiés de l'année 2009.

	Ca		K		Mg		Na		Fe	
	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
<b>Sol F</b>	46,51 ±2,53	44,95 ±2,44	1,10 ±0,05	1,06 ±0,04	2,83 ±0,11	2,73 ±0,11	0,33 ±0,01	0,32 ±0,01	4,25 ±0,23	4,13 ±0,22
<b>Sol K</b>	49,50 ±2,69	48,82 ±2,66	1,29 ±0,06	1,27 ±0,05	3,50 ±0,14	3,45 ±0,14	0,81 ±0,03	0,81 ±0,03	4,91 ±0,26	4,78 ±0,26
<b>Sol R</b>	99,43 ±5,41	97,83 ±5,32	3,49 ±0,15	3,43 ±0,15	8,54 ±0,34	8,40 ±0,332	1,32 ±0,04	1,29 ±0,04	7,49 ±0,40	0,43 ±0,02
<b>D</b>	10,20 ±0,55		1,89 ±0,08		1,02 ±0,04		0,82 ±0,02		6,66 ±0,36	

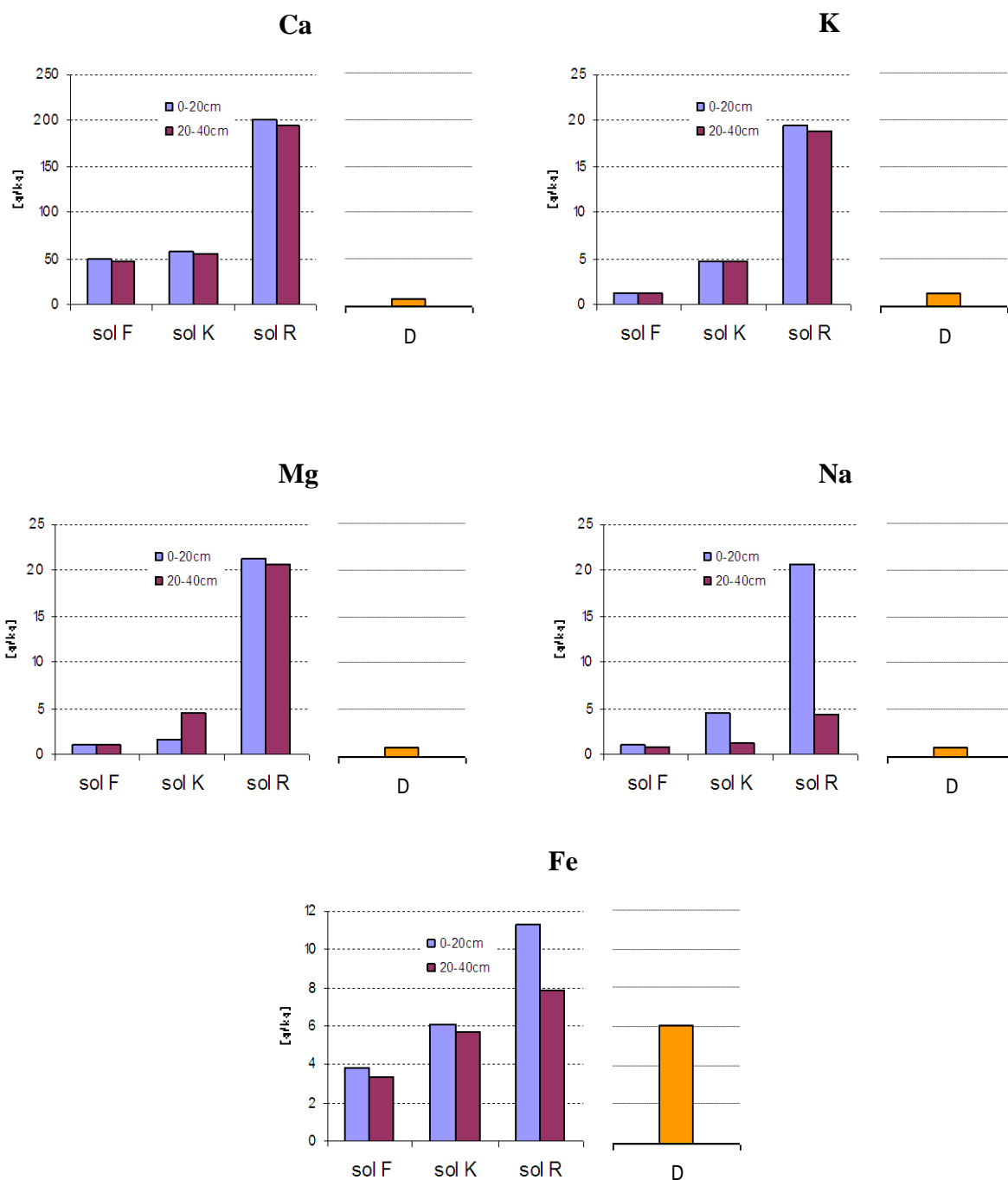
**Tableau III-20:** Répartition des teneurs totales moyennes (en g/kg/MS) des éléments majeurs en fonction de la profondeur des sols étudiés de l'année 2010.

	Ca		K		Mg		Na		Fe	
	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
<b>Sol F</b>	47,75 ±2,53	46,38 ±2,44	1,02 ±0,04	0,99 ±0,05	4,23 ±0,11	4,11 ±0,10	0,24 ±0,011	0,23 ±0,011	4,47 ±0,22	4,34 ±0,22
<b>Sol K</b>	43,00 ±2,69	41,79 ±2,65	0,57 ±0,05	0,55 ±0,05	4,22 ±0,14	4,10 ±0,13	0,23 ±0,03	0,22 ±0,02	3,26 ±0,27	3,12 ±0,26
<b>Sol R</b>	55,00 ±5,41	53,40 ±5,32	1,21 ±0,15	1,18 ±0,15	3,82 ±0,34	3,71 ±0,33	0,44 ±0,04	0,43 ±0,04	4,89 ±0,40	1,23 ±0,02
<b>D</b>	10,30 ±0,55		1,90 ±0,08		1,03 ±0,04		0,83 ±0,02		6,33 ±0,36	

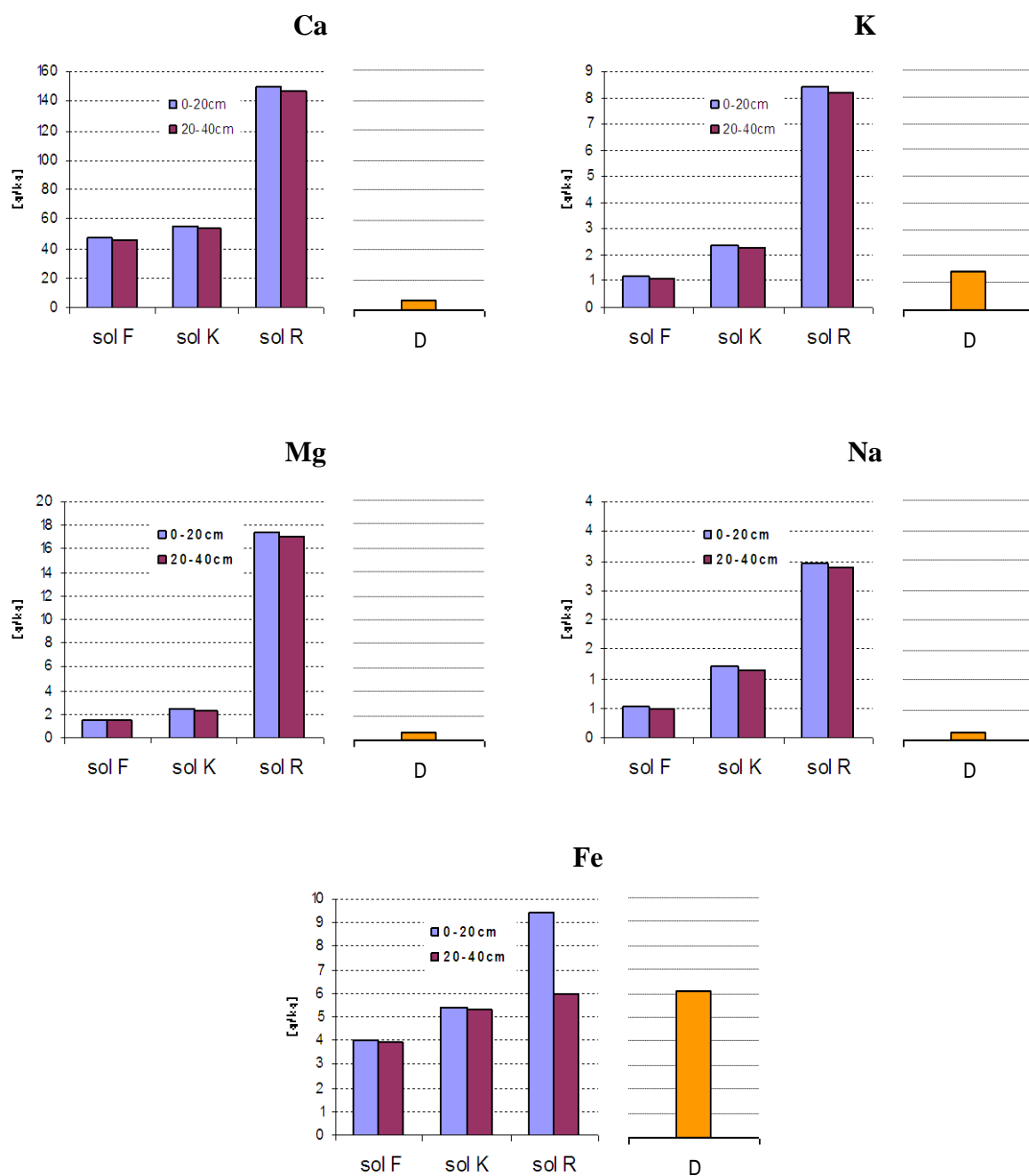


**Figure III-21:** Histogrammes illustrant l'évolution des teneurs totales moyennes (g/kg/MS) en éléments majeurs dans les sols étudiés et dans la décharge "D" de l'année 2006; en surface (0-20cm) et en profondeur (20-40cm).

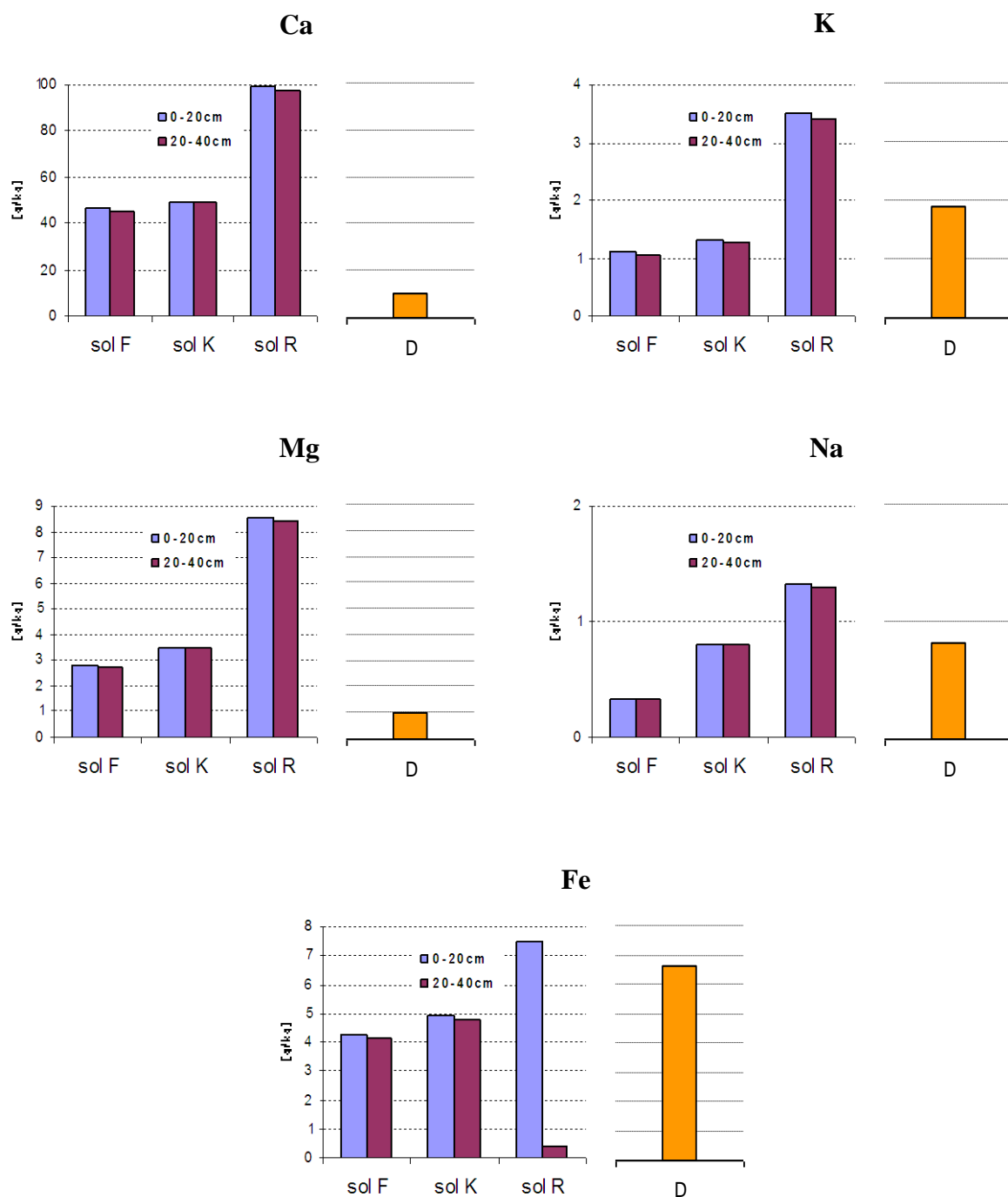




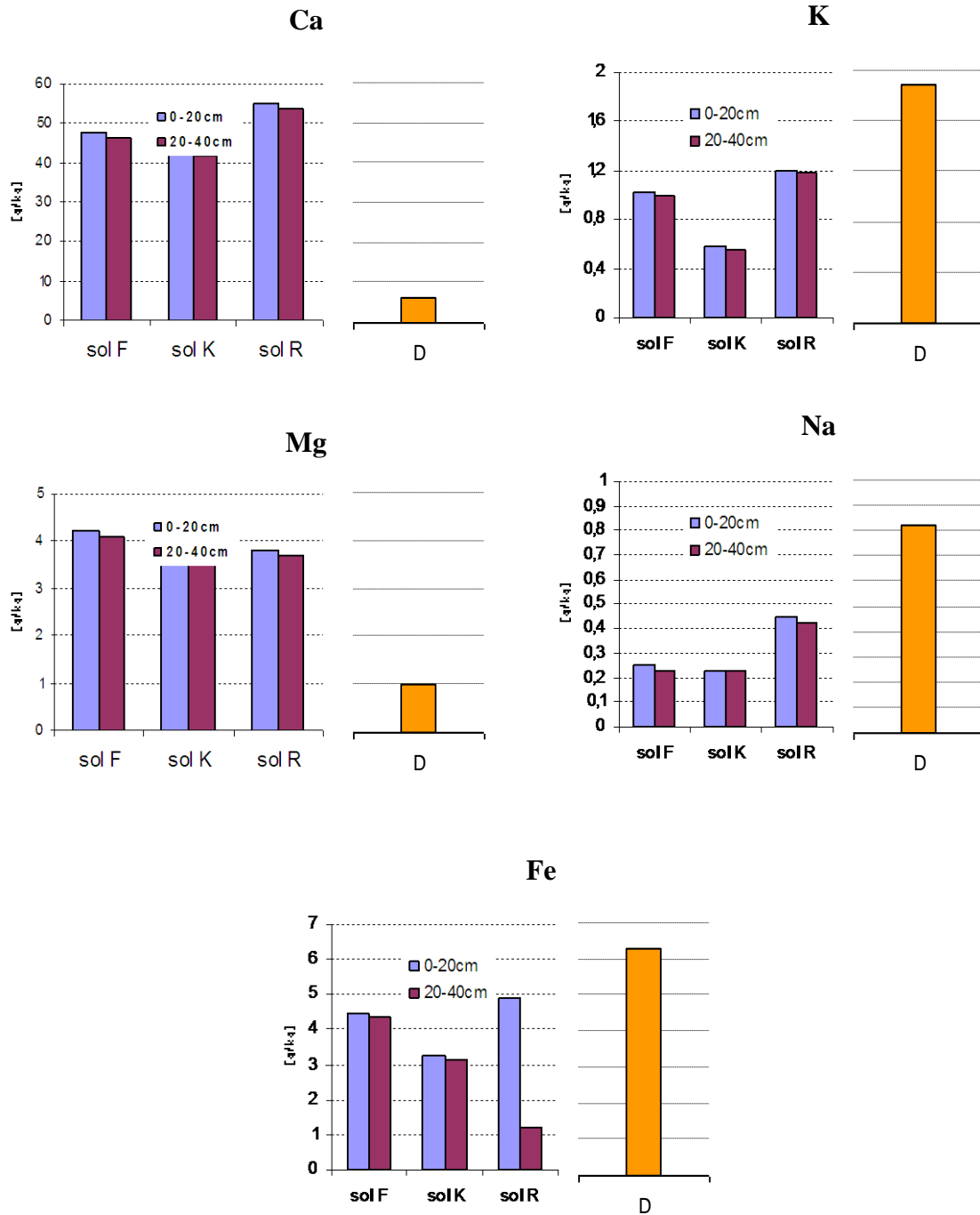
**Figure III-22:** Histogrammes illustrant l'évolution des teneurs totales moyennes (g/kg/MS) en éléments majeurs dans les sols étudiés et dans la décharge "D" de l'année 2007; en surface (0-20cm) et en profondeur (20-40cm).



**Figure III-23:** Histogrammes illustrant l'évolution des teneurs totales moyennes (g/kg/MS) en éléments majeurs dans les sols étudiés et dans la décharge "D" de l'année 2008; en surface (0-20cm) et en profondeur (20-40cm).



**Figure III-24:** Histogrammes illustrant l'évolution des teneurs totales moyennes (g/kg/MS) en éléments majeurs dans les sols étudiés et dans la décharge "D" de l'année 2009; en surface (0-20cm) et en profondeur (20-40cm).



**Figure III-25:** Histogrammes illustrant l'évolution des teneurs totales moyennes (g/kg/MS) en éléments majeurs dans les sols étudiés et dans la décharge 'D' de l'année 2010; en surface (0-20cm) et en profondeur (20-40cm).

Pour pouvoir mieux interpréter ces résultats, nous les avons représentés en pourcentages massiques répertoriés dans les tableaux (III-21 à III-25):

*Tableau III-21: Pourcentage massique \* des éléments majeurs dans les sols étudiés en 2006.*

	Ca		K		Mg		Na		Fe	
	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
<b>Sol F</b>	87,35	87,94	2,42	2,42	1,58	1,57	1,65	1,64	7,02	6,44
<b>Sol K</b>	79,53	79,83	7,04	7,06	1,35	1,36	2,12	2,13	9,95	9,62
<b>Sol R</b>	82,16	89,72	4,16	0,10	1,69	1,73	1,74	1,74	10,26	6,71

*Tableau III-22: Pourcentage massique des éléments majeurs dans les sols étudiés en 2007.*

	Ca		K		Mg		Na		Fe	
	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
<b>Sol F</b>	87,96	88,50	2,18	2,20	1,70	1,71	1,30	1,30	6,86	6,29
<b>Sol K</b>	80,41	78,47	6,66	6,62	2,44	6,38	1,87	0,56	8,63	7,98
<b>Sol R</b>	78,08	79,06	7,57	7,66	8,29	8,39	1,67	1,69	4,39	3,19

*Tableau III-23: Pourcentage massique des éléments majeurs dans les sols étudiés en 2008.*

	Ca		K		Mg		Na		Fe	
	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
<b>Sol F</b>	86,91	86,97	2,15	2,10	2,61	2,63	0,97	0,96	7,36	7,34
<b>Sol K</b>	82,83	82,80	3,56	3,56	3,68	3,68	1,79	1,78	8,13	8,18
<b>Sol R</b>	79,74	81,15	4,45	4,53	9,26	9,42	1,56	1,59	4,99	3,30

*Tableau III-24: Pourcentage massique des éléments majeurs dans les sols étudiés en 2009.*

	Ca		K		Mg		Na		Fe	
	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
<b>Sol F</b>	84,53	84,51	2,00	1,99	5,14	5,13	0,60	0,60	7,72	7,76
<b>Sol K</b>	82,49	82,56	2,15	2,15	5,83	5,83	1,35	1,37	8,18	8,08
<b>Sol R</b>	82,67	87,83	2,90	3,08	7,10	7,54	1,10	1,16	6,23	0,39

*Tableau III-25: Pourcentage massique des éléments majeurs dans les sols étudié en 2010.*

	Ca		K		Mg		Na		Fe	
	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm	0-20cm	20-40cm
<b>Sol F</b>	82,74	82,75	1,77	1,77	7,33	7,34	0,42	0,41	7,75	7,74
<b>Sol K</b>	83,85	83,95	1,11	1,10	8,23	8,24	0,45	0,44	6,36	6,27
<b>Sol R</b>	84,15	89,07	1,85	1,97	5,84	6,19	0,67	0,72	7,48	2,05

\* Pourcentage massique (%) = (masse d'élément majeur analysé en g.kg<sup>-1</sup> / la somme des éléments majeurs) \* 100

D'après ces résultats, on peut dire:

✓ **Pour le calcium**

L'ion du Calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ ) se trouve en quantité prédominante dans les trois sols étudiés, il représente un pourcentage massique suivant:

- pour le sol F, il est de (82,74 - 87,96)% et de (82,75 - 88,50)% respectivement dans les profondeurs (0-20) cm et (20-40) cm.
- pour le sol K, il est de (79,53 - 83,85)% et de (78,47- 83,95)% respectivement dans les profondeurs (0-20) cm et (20-40) cm.
- pour le sol R, il est de (78,08 - 84,15)% et de (79,06 - 89,72)% respectivement dans les profondeurs (0-20) cm et (20-40) cm.

Donc, la quantité d'ion  $\text{Ca}^{2+}$  trouvée dans les trois sols est supérieure à celle qui existe dans la décharge de l'usine (tableaux III-16 à III-20). De là, on peut dire que le calcium peut également provenir par d'autres sources anthropiques majeures telles que les plâtreries, les cimenteries, le trafic automobile, l'érosion du matériel urbain et le transport atmosphérique à longue distance des poussières amenées par le vent. De plus, on constate que les teneurs en surface sont légèrement supérieures que celles des profondeurs et que la séquence de variation entre les sols est comme suit :

$$[\text{Ca}]_{\text{sol R}} > [\text{Ca}]_{\text{sol K}} > [\text{Ca}]_{\text{sol F}}$$

✓ **Pour le potassium et sodium**

Les ions de potassium (K) et sodium (Na) se trouvent en quantité importante dans les couches profondes des échantillons étudiés, les teneurs sont supérieures à celles indiquées dans la décharge et celles des années 2006 à 2009 mais durant l'année 2010, on constate une diminution. La forte teneur du potassium peut être d'une part, dû au fait qu'il se trouve dans les engrais et d'autre part, il peut provenir également de la combustion de la biomasse et de la végétation.

Par ailleurs, la séquence de variation entre les sols varie comme suit:

$$[\text{K}, \text{Na}]_{\text{sol R}} > [\text{K}, \text{Na}]_{\text{sol K}} > [\text{K}, \text{Na}]_{\text{sol F}}$$

✓ **Pour le magnésium**

Le troisième élément en quantité importante est le magnésium (Mg), il varie:

- pour le sol F de (1,58 - 7,33)% et de (1,57 - 7,34)% respectivement dans les couches 0-20cm et 20-40cm.
- pour le sol K de (1,35 - 8,23)% et de (1,36 - 8,24)% respectivement dans les couches 0-20cm et 20-40cm.
- pour le sol R de (1,69 - 9,26)% et de (1,73 - 9,42)% respectivement dans les couches 0-20cm et 20-40cm.

Les teneurs de Mg dans les trois sols sont supérieures à celles présentes au niveau de la décharge d'ALZINC. La source majeure de cet élément est probablement naturelle (décomposition des roches mère ou fond géochimique).

Les teneurs trouvées au long du profil sont légèrement supérieures en surface qu'en profondeur et que la séquence de variation entre les sols est comme suit:

$$[\text{Mg}]_{\text{sol R}} > [\text{Mg}]_{\text{sol K}} > [\text{Mg}]_{\text{sol F}}$$

✓ **Pour le fer**

Le deuxième élément majeur prédominant est le fer (Fe), il varie pour le:

- sol F: 6,86% à 7,75% en surface (0-20cm) et;  
6,29% à 7,76% en profondeur 20-40cm.
- sol K: 6,36% à 9,95% en surface et;  
6,27% à 9,62% en profondeur.
- sol R: 4,39% à 10,26% en surface et;  
0,39% à 6,71% en profondeur.

Les teneurs du Fe trouvées dans les sols sont généralement plus importantes que celles existantes dans la décharge. Par ailleurs, elles sont toujours importantes en surface qu'en profondeur et que la séquence de variation inter sol est comme suit:

$$[\text{Fe}]_{\text{sol R}} > [\text{Fe}]_{\text{sol K}} > [\text{Fe}]_{\text{sol F}}$$

**ii. Eléments traces métalliques (ETM)**

Après la mise en solution par l'eau régale, on a déterminé la teneur de neuf métaux: plomb (Pb), cadmium (Cd), cuivre (Cu), zinc (Zn), nickel (Ni), manganèse (Mn), cobalt (Co), chrome (Cr) et arsenic (As). L'ensemble des résultats obtenus de la profondeur 0-20cm est donné dans les tableaux (III-26 à III-30) et ceux de la profondeur 20-40cm dans les tableaux (III-31 à III-35) et représenté respectivement sous forme d'histogramme dans les figures (III-26 à III-30).

**Tableau III-26:** Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés en (0-20cm) de l'année 2006.

	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Sol F</b>	7,95 ±2,39	1,97 ±0,59	5,57 ±0,39	119,17 ±8,65	5,12 ±1,01	74,77 ±5,22	2,03 ±0,33	6,12 ±0,33	3,80 ±0,21
<b>Sol K</b>	15,45 ±4,65	5,27 ±1,59	8,57 ±0,61	171,70 ±4,28	10,82 ±2,12	170,45 ±11,89	3,06 ±0,49	15,95 ±0,87	7,90 ±0,43
<b>Sol R</b>	56,02 ±6,87	24,15 ±3,29	29,65 ±2,11	539,01 ±12,61	34,70 ±6,80	677,25 ±7,25	2,51 ±0,41	65,05 ±3,55	50,60 ±2,75

**Tableau III-27:** Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés en (0-20cm) de l'année 2007.

	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Sol F</b>	6,93 ±1,08	1,90 ±0,57	6,01 ±0,43	503,13 ±12,980	8,72 ±1,71	72,11 ±5,031	2,02 ±0,33	12,06 ±0,66	3,72 ±0,202
<b>Sol K</b>	15,45 ±4,65	5,30 ±1,60	7,14 ±0,51	433,52 ±10,242	12,52 ±2,45	117,60 ±8,205	3,01 ±0,49	18,76 ±1,02	5,12 ±0,28
<b>Sol R</b>	40,31 ±12,14	13,15 ±3,97	18,31 ±1,30	307,21 ±7,87	13,02 ±2,55	503,30 ±35,114	3,02 ±0,49	68,04 ±3,71	42,11 ±2,29

**Tableau III-28:** Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés en (0-20cm) de l'année 2008.

	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Sol F</b>	7,99 ±2,41	1,89 ±0,57	4,32 ±0,31	432,15 ±10,91	14,37 ±2,81	79,03 ±5,51	2,54 ±0,41	17,87 ±0,97	4,92 ±0,26
<b>Sol K</b>	17,81 ±5,36	4,18 ±1,26	6,00 ±0,43	731,08 ±17,79	15,31 ±3,00	92,00 ±6,41	3,01 ±0,48	22,05 ±1,20	3,08 ±0,16
<b>Sol R</b>	39,14 ±11,78	10,18 ±3,07	15,32 ±1,09	21,15 ±5,09	10,07 ±1,97	244,94 ±17,08	4,19 ±0,67	73,32 ±3,99	37,19 ±2,02



**Tableau III-29:** Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés en (0-20cm) de l'année 2009.

	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
<b>Sol F</b>	9,43 ±2,83	1,72 ±0,51	3,92 ±0,27	623,03 ±19,81	17,42 ±3,41	80,12 ±5,59	3,02 ±0,48	22,16 ±1,20	5,11 ±0,27
<b>Sol K</b>	19,44 ±5,85	3,02 ±0,91	3,58 ±0,25	793,45 ±19,78	18,63 ±3,65	84,71 ±5,91	2,87 ±0,46	26,04 ±1,42	4,22 ±0,23
<b>Sol R</b>	24,31 ±7,31	7,13 ±2,15	7,30 ±0,52	262,33 ±63,07	5,19 ±1,01	227,01 ±15,83	4,98 ±0,80	77,91 ±4,25	33,08 ±1,80

**Tableau III-30:** Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés en (0-20cm) de l'année 2010.

	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
<b>Sol F</b>	13,75 ±4,14	1,90 ±0,57	3,25 ±0,23	698,34 ±16,91	21,00 ±4,11	82,00 ±5,72	3,75 ±0,60	25,13 ±1,37	5,80 ±0,31
<b>Sol K</b>	21,00 ±6,32	2,05 ±0,61	2,23 ±0,15	823,67 ±19,05	21,25 ±4,16	71,50 ±4,98	8,25 ±1,33	33,15 ±1,80	4,09 ±0,22
<b>Sol R</b>	22,25 ±6,69	0,70 ±0,21	3,75 ±0,26	284,50 ±8,40	1,18 ±0,23	83,75 ±5,84	5,75 ±0,92	81,12 ±4,42	30,13 ±1,64

**Tableau III-31:** Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés en (20-40cm) de l'année 2006.

	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
<b>Sol F</b>	7,06 ±2,12	0,98 ±0,29	1,22 ±0,08	120,04 ±8,86	5,13 ±1,00	67,20 ±4,68	2,16 ±0,34	4,48 ±0,24	7,69 ±0,41
<b>Sol K</b>	15,16 ±4,56	5,25 ±1,58	8,74 ±0,62	176,47 ±12,43	11,11 ±2,17	166,48 ±11,61	3,07 ±0,49	14,68 ±0,80	9,84 ±0,53
<b>Sol R</b>	49,24 ±14,82	22,24 ±6,71	32,95 ±2,34	570,62 ±17,20	38,94 ±7,63	652,51 ±15,52	2,26 ±0,36	35,64 ±1,94	112,49 ±6,12

**Tableau III-32:** Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés en (20-40cm) de l'année 2007.

	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
<b>Sol F</b>	6,04 ±1,81	1,63 ±0,49	6,21 ±0,44	504,00 ±21,18	8,72 ±1,71	69,93 ±4,87	2,20 ±0,35	11,22 ±0,61	3,86 ±0,21
<b>Sol K</b>	21,84 ±6,57	15,98 ±4,82	8,74 ±1,39	471,88 ±13,46	15,82 ±3,10	590,55 ±41,20	2,45 ±0,39	88,14 ±4,80	11,35 ±0,61
<b>Sol R</b>	33,55 ±10,10	11,31 ±3,41	21,61 ±1,53	338,33 ±81,35	17,26 ±3,38	478,56 ±33,38	2,26 ±0,36	38,63 ±2,10	44,32 ±2,41

**Tableau III-33:** Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés en (20-40cm) de l'année 2008.

	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Sol F</b>	7,10 ±2,13	1,78 ±0,53	4,52 ±0,32	433,01 ±14,11	14,50 ±2,84	76,85 ±5,36	2,26 ±0,36	17,03 ±0,92	5,06 ±0,27
<b>Sol K</b>	17,57 ±5,29	4,16 ±1,25	6,17 ±0,44	736,83 ±17,17	17,34 ±3,40	88,03 ±6,14	3,07 ±0,49	20,77 ±1,13	3,15 ±0,17
<b>Sol R</b>	32,38 ±9,74	8,34 ±2,51	18,62 ±1,32	58,66 ±5,10	23,36 ±4,58	220,20 ±15,36	2,26 ±0,36	43,91 ±2,39	39,40 ±2,14

**Tableau III-34:** Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés en (20-40cm) de l'année 2009.

	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Sol F</b>	8,54 ±2,57	1,61 ±0,48	4,12 ±0,29	450,43 ±18,30	17,54 ±3,43	77,94 ±5,43	2,54 ±0,41	17,38 ±0,94	5,25 ±0,28
<b>Sol K</b>	19,19 ±5,77	3,00 ±0,90	3,74 ±0,26	1226,92 ±25,01	19,40 ±3,80	79,98 ±5,58	3,07 ±0,49	18,82 ±1,02	4,29 ±0,23
<b>Sol R</b>	17,58 ±5,29	6,95 ±2,09	10,60 ±0,75	299,84 ±72,09	16,57 ±3,24	215,72 ±15,05	2,26 ±0,36	43,91 ±2,39	35,30 ±1,92

**Tableau III-35:** Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés en (20-40cm) de l'année 2010.

	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Sol F</b>	12,85 ±3,86	1,79 ±0,54	3,45 ±0,24	480,24 ±115,47	20,00 ±3,92	79,40 ±5,53	2,80 ±0,45	20,35 ±1,11	5,94 ±0,32
<b>Sol K</b>	20,75 ±6,24	2,03 ±0,61	2,39 ±0,17	818,25 ±196,75	22,02 ±4,31	66,77 ±4,65	3,07 ±0,49	25,93 ±1,41	4,16 ±0,22
<b>Sol R</b>	15,52 ±4,67	0,52 ±0,15	7,05 ±0,50	286,01 ±68,77	12,54 ±2,45	72,46 ±5,05	2,26 ±0,36	47,13 ±2,57	32,34 ±1,76

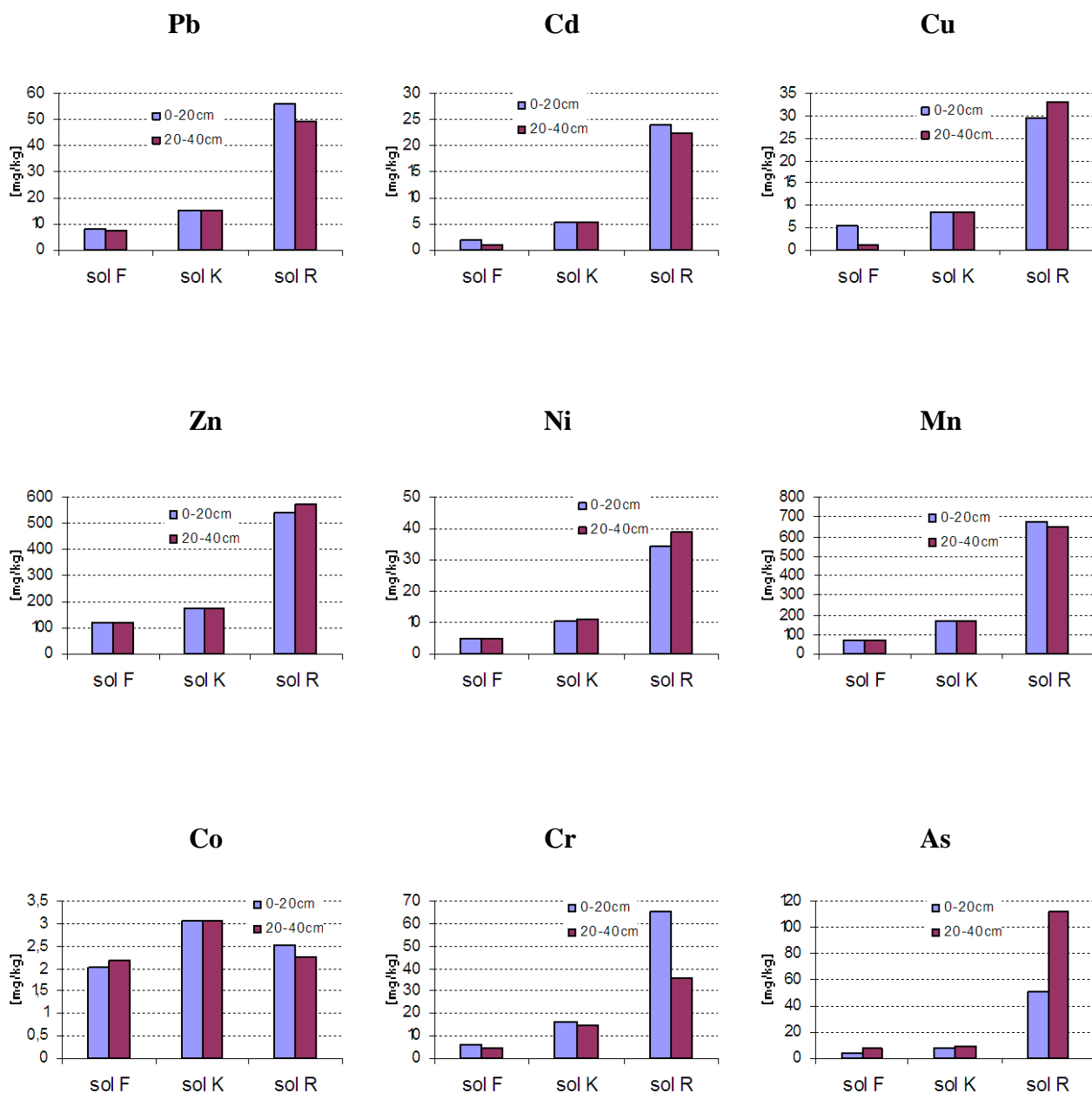
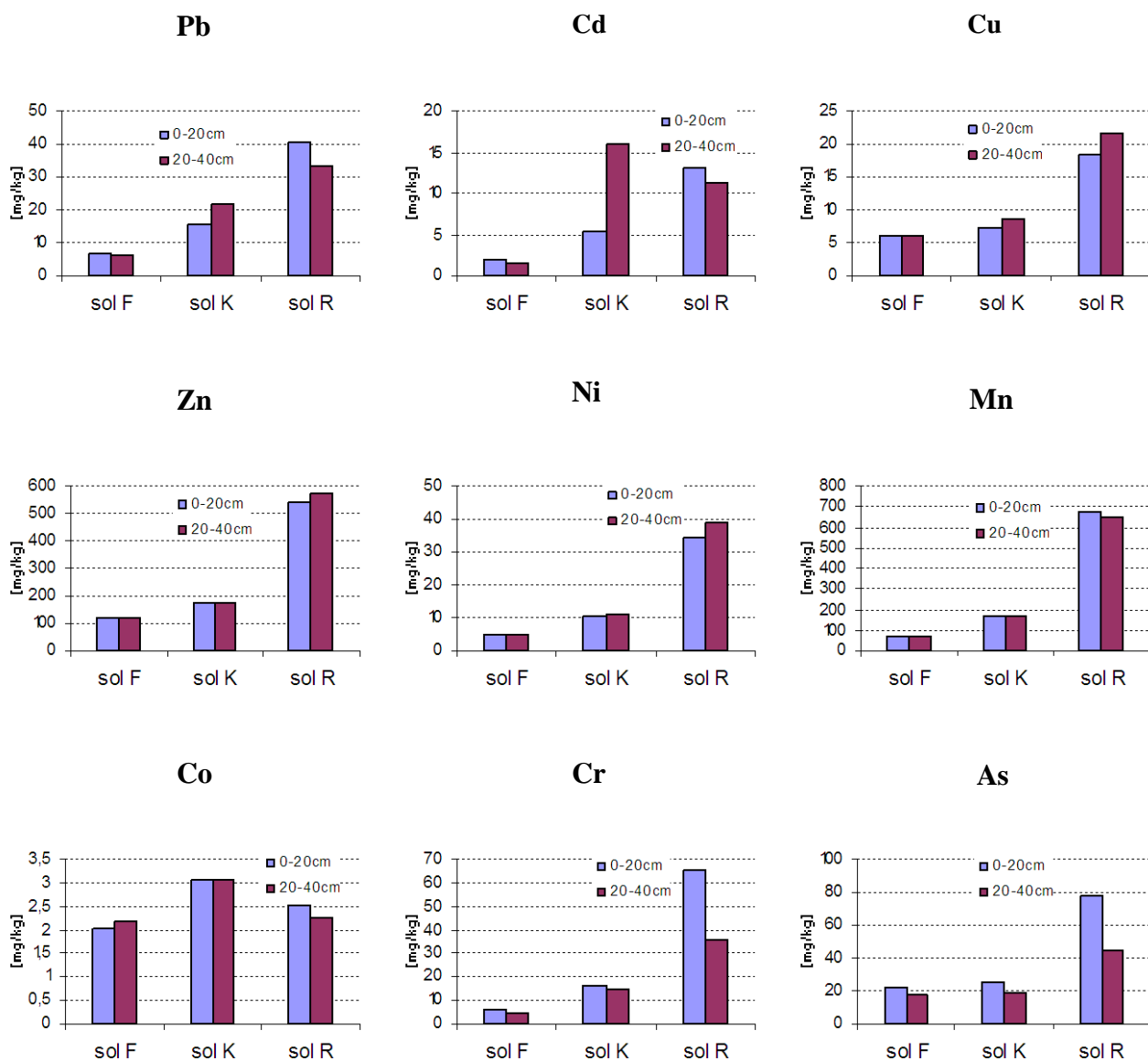
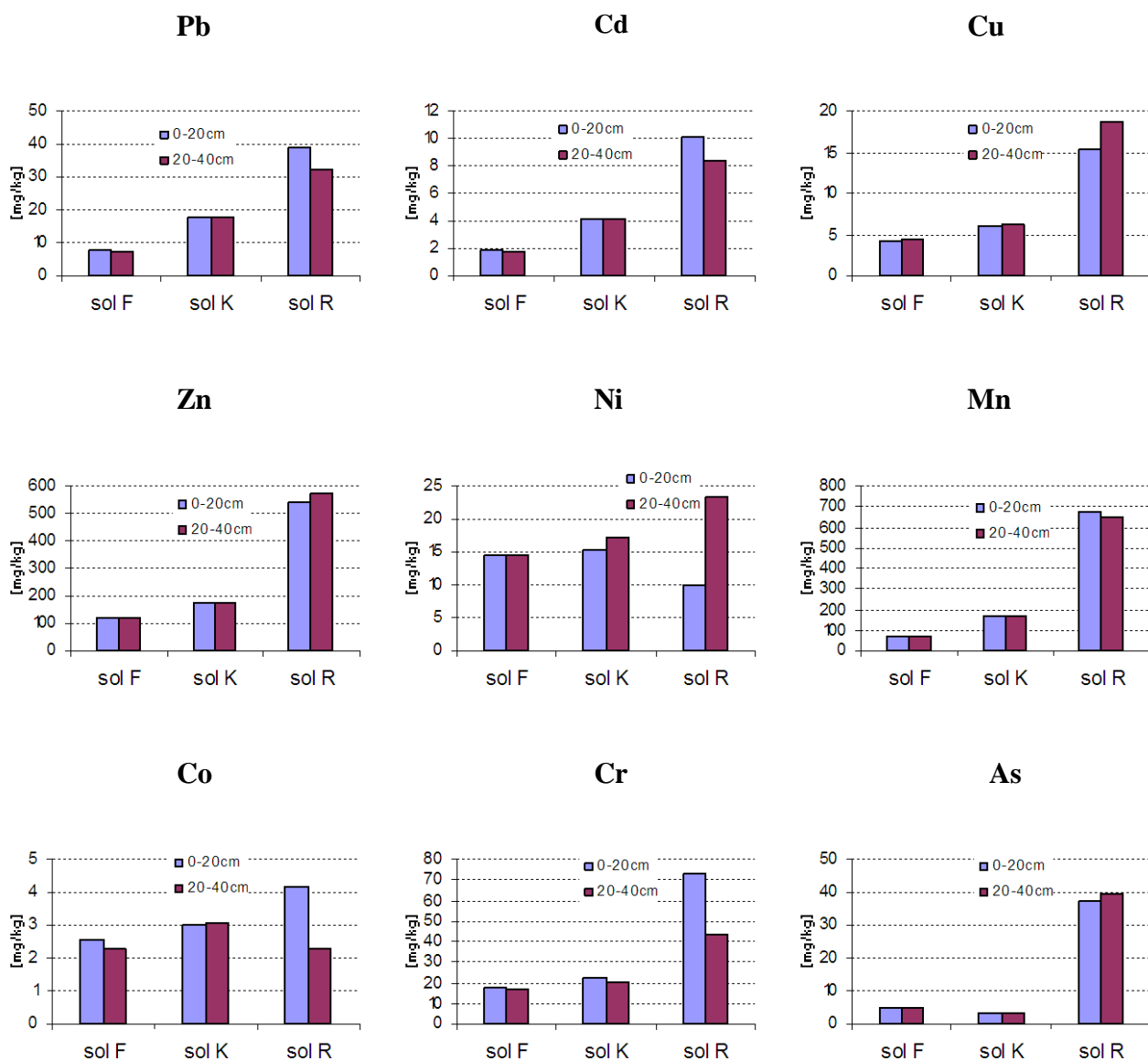


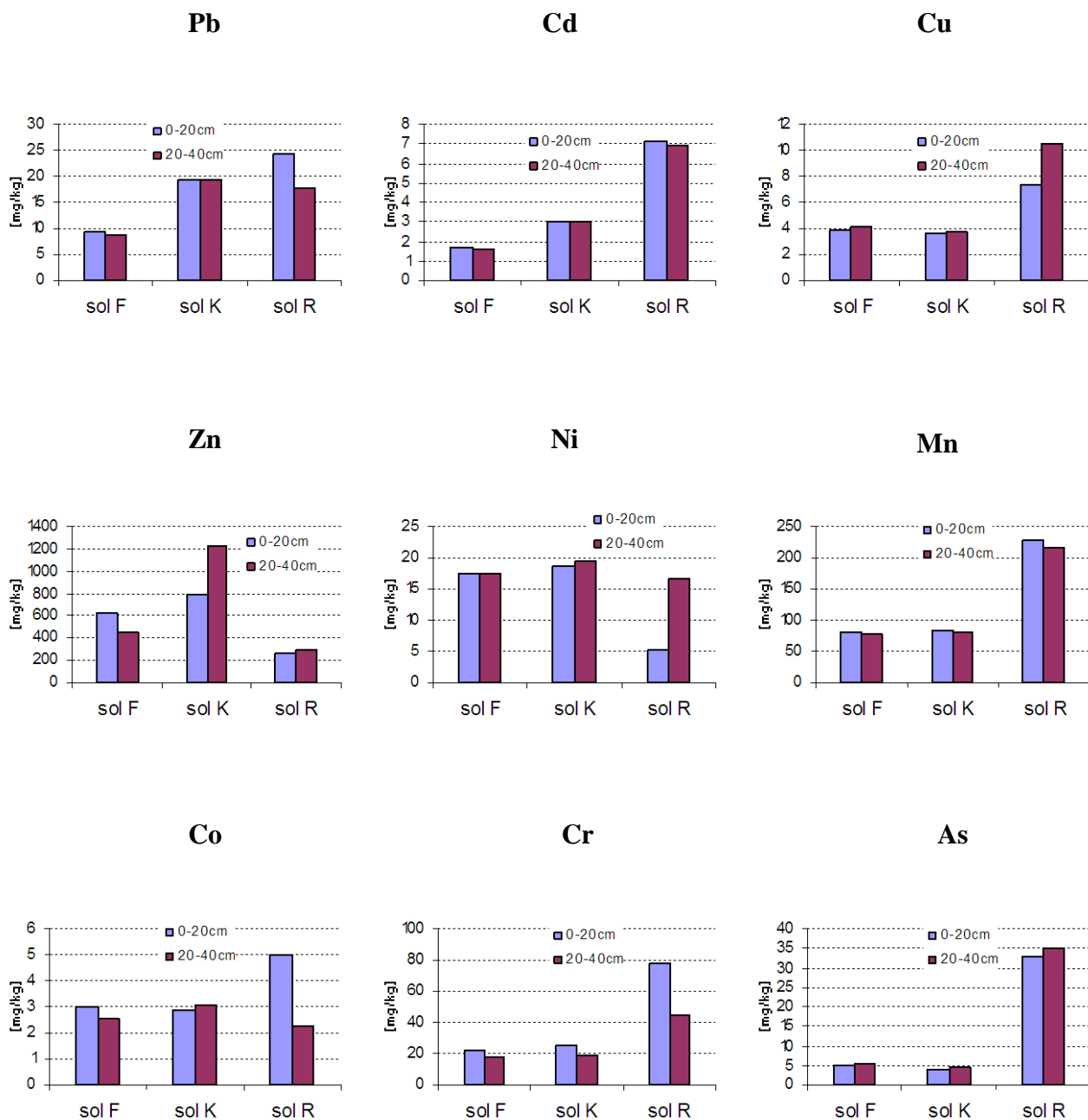
Figure III-26: Histogrammes illustrant l'évolution des teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés de l'année 2006; en surface (0-20cm) et en profondeur (20-40cm).



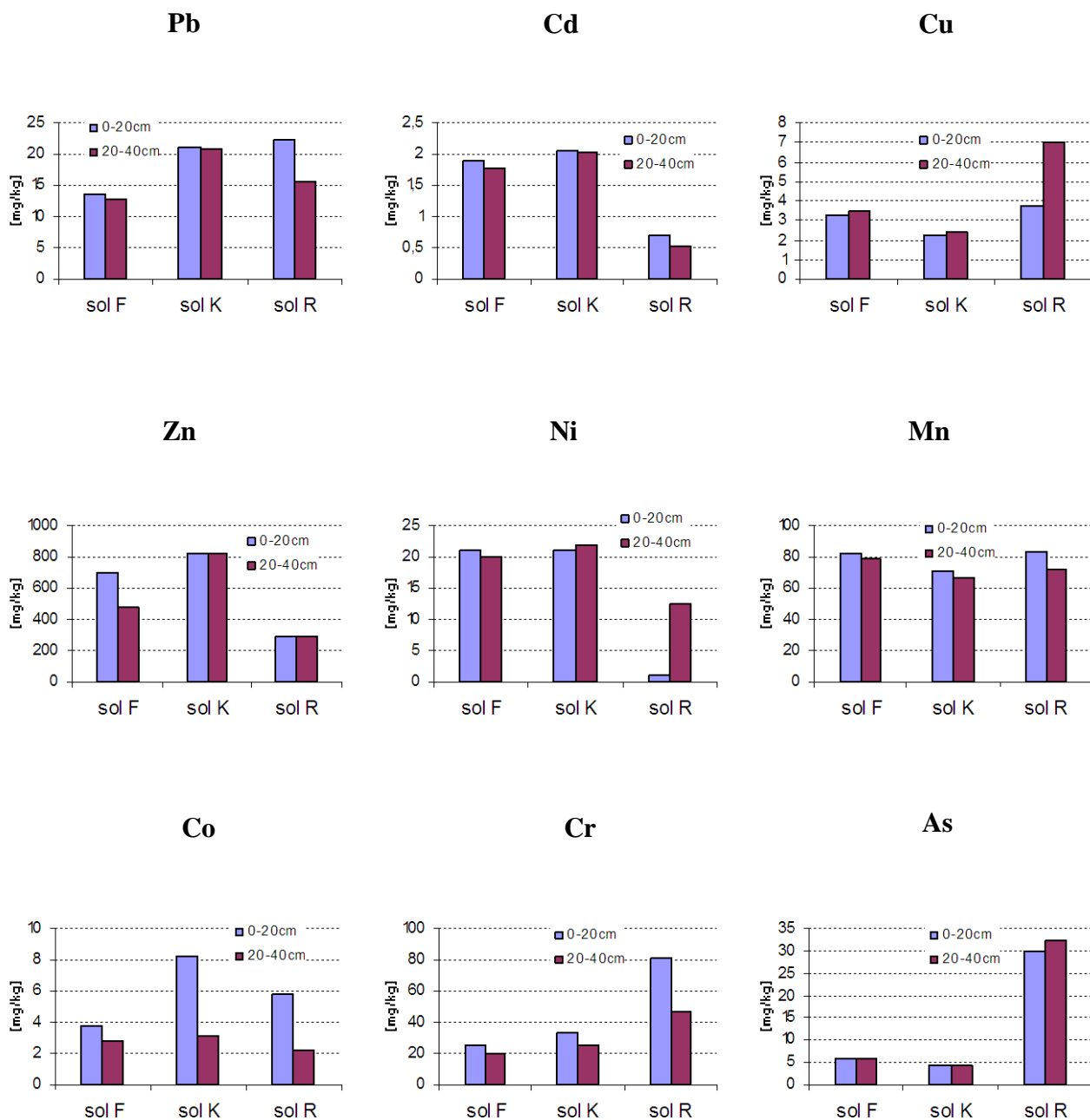
**Figure III-27:** Histogrammes illustrant l'évolution des teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés de l'année 2007; en surface (0-20cm) et en profondeur (20-40cm).



**Figure III-28:** Histogrammes illustrant l'évolution des teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés de l'année 2008 en surface (0-20cm) et en profondeur (20-40cm).



**Figure III-29:** Histogrammes illustrant l'évolution des teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments trace métallique dans les sols étudiés de l'année 2009 en surface (0-20cm) et en profondeur (20-40cm).



**Figure III-30:** Histogrammes illustrant l'évolution des teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) en éléments traces métalliques dans les sols étudiés de l'année 2010 en surface (0-20cm) et en profondeur (20-40cm).

En absence de normes algériennes relatives aux teneurs de références dans le sol, nous avons adopté une approche comparative par rapport aux références relevées dans la bibliographie et complétée par les normes européennes (tableau I-7) pour interpréter nos résultats.

#### ii.1. Pour le plomb

Les teneurs totales moyennes détectées pendant notre période de recherche, varient pour:

- le sol F:  $6,93 \pm 1,08$  mg/kg à  $13,75 \pm 4,14$  mg/kg en surface (0-20)cm et;  
 $6,04 \pm 1,81$  mg/kg à  $12,85 \pm 3,86$  mg/kg en profondeur.
- le sol K:  $15,45 \pm 4,65$  mg/kg à  $21,00 \pm 6,32$  mg/kg en surface et;  
 $15,16 \pm 4,56$  mg/kg à  $21,84 \pm 6,57$  mg/kg en profondeur.
- le sol R:  $22,25 \pm 6,69$  mg/kg à  $56,02 \pm 6,86$  mg/kg en surface et;  
 $15,52 \pm 4,67$  mg/kg à  $49,24 \pm 14,82$  mg/kg en profondeur.

Ainsi la séquence de variation inter sol est comme suit:

$$[\text{Pb}]_{\text{sol R}} > [\text{Pb}]_{\text{sol K}} > [\text{Pb}]_{\text{sol F}}$$

D'un autre côté, on a remarqué que les teneurs en Pb dans les deux sols F et R ont augmenté durant les cinq années d'étude avec les teneurs en surface plus importantes qu'en profondeur, tandis que pour le sol K, les teneurs en Pb ont diminué durant les années d'étude.

Toutefois, ces teneurs sont inférieures au seuil de toxicité des sols en général typiques **258** mg/kg et des sols agricoles **100** mg/kg (tableau I-7). Donc la quantité trouvée ne présente aucun danger et par la suite les sols ne sont pas contaminés par le Pb.

#### ii.2. Pour le cadmium

Les teneurs totales moyennes en Cd varient pour:

- le sol F:  $1,72 \pm 0,51$  mg/kg à  $1,97 \pm 0,59$  mg/kg en surface et;  
 $0,98 \pm 0,29$  mg/kg à  $1,79 \pm 0,54$  mg/kg en profondeur.
- le sol K:  $2,05 \pm 0,61$  mg/kg à  $5,30 \pm 1,60$  mg/kg en surface et;  
 $2,03 \pm 0,61$  mg/kg à  $15,98 \pm 4,82$  mg/kg en profondeur.
- le sol R:  $0,70 \pm 0,21$  mg/kg à  $24,15 \pm 3,29$  mg/kg en surface et;  
 $0,52 \pm 0,15$  mg/kg à  $22,24 \pm 6,71$  mg/kg en profondeur.



Ainsi la séquence de variation inter sol est comme suit:

$$[\text{Cd}]_{\text{sol R}} > [\text{Cd}]_{\text{sol K}} > [\text{Cd}]_{\text{sol F}}$$

L'évolution en Cd dans les sols K et R est décroissante pendant la période de notre investigation en surface comme en profondeur, mais dans le sol F on a constaté que les teneurs en Cd diminuent en surface durant les cinq années d'étude et inversement en profondeur.

En comparant nos résultats avec ceux de la littérature, on remarque que les valeurs moyennes du sol F sont en dessous des normes (**2,9** et **2**) mg/kg (tableau I-7), donc ce sol ne présente aucun signe de contamination et de pollution, alors que les sols K et R sont contaminés en Cd car les teneurs moyennes trouvées dépassent les normes.

#### ii.3. Pour le cuivre

Les valeurs moyennes obtenues de l'extraction totale des sols varient comme suit :

- 6,01 ±0,42 mg/kg; 8,57 ±0,61 mg/kg et 29,65 ±2,11 mg/kg en surface et;
- 6,21 ±0,44 mg/kg; 8,74 ±6,39 mg/kg et 32,95 ±2,34 mg/kg en profondeur pour les sols F, K et R, respectivement.

Ainsi la séquence de variation inter sol et intra sol est comme suit:

$$[\text{Cu}]_{\text{sol R}} > [\text{Cu}]_{\text{sol K}} > [\text{Cu}]_{\text{sol F}}$$

En plus, les teneurs en Cu sont plus grandes en profondeur qu'en surface.

En comparant nos valeurs avec celles de référence **100** mg/kg et **200** mg/kg respectivement pour les sols agricoles et sols typiques (tableau I-7), on conclue que nos sols ne sont pas contaminés par le Cu.

#### ii.4. Pour le zinc

Les teneurs détectées en Zn, s'échelonnent pour:

- le sol F: 119,17 ±8,65 mg/kg à 698,34 ±16,91 mg/kg en surface et;  
120,04 ±8,86 mg/kg à 504,00 ±21,18 mg/kg en profondeur.
- le sol K: 171,70 ±4,28 mg/kg à 823,67 ±19,05 mg/kg en surface et;  
176,47 ±12,43 mg/kg à 1226,92 ±25,01 mg/kg en profondeur.
- le sol R: 21,15 ±5,086 mg/kg à 539,01 ±12,607 mg/kg en surface (0-20) cm;  
58,66 ±5,10 mg/kg à 570,62 ±17,20 mg/kg en profondeur.

L'évolution en Zn dans les trois échantillons est fortement croissante durant les cinq années d'étude. Ces teneurs totales moyennes trouvées dépassent les valeurs limites rapportées dans le tableau I-7 (**300** et **320**) mg/kg, excepté durant l'année 2006. Donc ces sols sont contaminés par le Zn et cette contamination trouve son origine des déchets domestiques, des

effluents industriels, des engrais, des fertilisant, des produits phytosanitaires, des retombés atmosphériques et le trafic routier.

### ii.5. Pour le nickel

Les niveaux moyens de Ni trouvés dans les échantillons des sols sont comme suit:

- pour le sol F:  $5,12 \pm 1,00$  mg/kg à  $21,00 \pm 4,11$  mg/kg en surface et;  
 $5,13 \pm 1,00$  mg/kg à  $20,00 \pm 3,92$  mg/kg en profondeur.
- pour le sol K:  $10,82 \pm 2,12$  mg/kg à  $21,25 \pm 4,16$  mg/kg en surface et;  
 $11,11 \pm 2,17$  mg/kg à  $22,02 \pm 4,31$  mg/kg en profondeur.
- pour le sol R:  $1,18 \pm 0,23$  mg/kg à  $34,70 \pm 6,80$  mg/kg en surface et;  
 $12,54 \pm 2,45$  mg/kg à  $38,94 \pm 7,63$  mg/kg en profondeur.

Toutes ces valeurs sont inférieures à celles des normes définies dans le tableau I-7 (**50** et **1-100**) mg/kg, par conséquent les sols ne sont pas contaminés par le Ni et donc ne présente aucun danger.

### ii.6. Pour le manganèse

Les teneurs totales moyennes détectées en Mn, varient pour:

- le sol F:  $72,11 \pm 5,03$  mg/kg à  $82,00 \pm 5,72$  mg/kg en surface et;  
 $67,20 \pm 4,68$  mg/kg à  $79,40 \pm 5,53$  mg/kg en profondeur.
- le sol K:  $71,50 \pm 4,98$  mg/kg à  $170,45 \pm 11,89$  mg/kg en surface et;  
 $66,77 \pm 4,65$  mg/kg à  $590,55 \pm 41,20$  mg/kg en profondeur.
- le sol R:  $83,75 \pm 5,84$  mg/kg à  $677,25 \pm 7,25$  mg/kg en surface et;  
 $72,46 \pm 5,05$  mg/kg à  $652,51 \pm 15,52$  mg/kg en profondeur.

Ainsi la séquence de variation inter sol est comme suit:

$$[\text{Mn}]_{\text{sol R}} > [\text{Mn}]_{\text{sol K}} > [\text{Mn}]_{\text{sol F}};$$

Tandis que dans la séquence de variation intra sol, les teneurs en Mn dans les trois sols sont plus importantes en surface qu'en profondeur.

Les valeurs moyennes trouvées en Mn dans les deux sols F et K sont totalement inférieures aux normes définies dans le tableau I-7 (**270** et **300**) mg/kg, alors qu'elles sont légèrement supérieures aux normes durant les années 2006-2010 dans le sol R. Donc le sol R est contaminé par le Mn.

### ii.7. Pour le cobalt

Les teneurs moyennes en Co des sols étudiés varient en surface (0-20) cm entre  $2,02 \pm 0,32$  mg/kg et  $8,25 \pm 1,33$  mg/kg et en profondeur (20-40) cm entre  $2,16 \pm 0,34$  mg/kg et  $3,07 \pm 0,49$  mg/kg.

L'évolution en teneur est décroissante pour les trois sols dans le même profil, mais au niveau inter sol, l'évolution en teneur en Co en surface et en profondeur est respectivement comme suit:

$$[\text{Co}]_{\text{sol R}} > [\text{Co}]_{\text{sol K}} > [\text{Co}]_{\text{sol F}}$$

Ces valeurs ne dépassent pas les normes rapportées dans le tableau I-7 (**2** et **23**) mg/kg. On conclut donc que les sols ne sont pas contaminés par le Co.

### ii.8. Pour le chrome

Les teneurs totales moyennes en ce métal varient pour:

- le sol F:  $6,12 \pm 0,33$  mg/kg à  $25,13 \pm 1,37$  mg/kg en surface (0-20) cm et;  
 $4,48 \pm 0,24$  mg/kg à  $20,35 \pm 1,11$  mg/kg en profondeur (20-40) cm.
- le sol K:  $15,95 \pm 0,87$  mg/kg à  $33,15 \pm 1,80$  mg/kg en surface (0-20) cm et;  
 $14,68 \pm 0,80$  mg/kg à  $88,14 \pm 4,80$  mg/kg en profondeur (20-40) cm
- le sol R:  $65,05 \pm 3,54$  mg/kg à  $81,12 \pm 4,42$  mg/kg en surface et;  
 $35,64 \pm 1,94$  mg/kg à  $47,13 \pm 2,57$  mg/kg en profondeur.

Les teneurs enregistrées dans la période de notre recherche, montrent que toujours dans le même profil les valeurs sont importantes en surface qu'en profondeur pour les trois sols. Par contre, l'ordre de variation inter sol est suivant:

$$[\text{Cr}]_{\text{sol R}} > [\text{Cr}]_{\text{sol K}} > [\text{Cr}]_{\text{sol F}}$$

Ces valeurs sont inférieures aux valeurs limites définies dans le tableau I-7 (**55** et **150**) mg/kg. En résumé on peut dire que le Cr ne présente aucun danger pour ces sols.

### ii.9. Pour l'arsenic

Les teneurs moyennes trouvées dans chaque sol varient, pour:

- Le sol F:  $3,72 \pm 0,20$  mg/kg à  $5,80 \pm 0,31$  mg/kg en surface et;  
 $3,86 \pm 0,21$  mg/kg à  $7,69 \pm 0,41$  mg/kg en profondeur.
- Le sol K:  $3,08 \pm 0,16$  mg/kg à  $7,90 \pm 0,43$  mg/kg en surface et;  
 $3,15 \pm 0,17$  mg/kg à  $11,35 \pm 0,61$  mg/kg en profondeur.
- Le sol R:  $30,13 \pm 1,64$  mg/kg à  $50,60 \pm 2,75$  mg/kg en surface et;  
 $32,34 \pm 1,76$  mg/kg à  $112,49 \pm 6,12$  mg/kg en profondeur.

Ces teneurs en profil sont plus importantes en profondeur qu'en surface.

Cependant entre sols la variation des teneurs se présente dans la séquence suivante:

$$[As]_{\text{sol R}} > [As]_{\text{sol K}} > [As]_{\text{sol F}}.$$

En se référant aux normes définies dans le tableau I-7 (**29** et **40**) mg/kg, on conclut que les teneurs dans les deux sols F et K sont totalement inférieures, sauf pour le sol R où les teneurs sont totalement supérieures. Donc, le sol R est contaminé en As.

### iii. Distribution annuelle des éléments métalliques dans les sols F, K et R

Les résultats des teneurs totales moyennes montrent une grande variabilité dans la distribution des métaux dans le même profil et d'un endroit à un autre dans les sols.

#### iii.1. Eléments majeurs

On constate que la distribution a été observée dans la séquence suivante, pour:

##### ✓ ANNÉE 2006

- sol F: [Ca] > [Fe] > [K] > [Na] > [Mg] en surface et en profondeur.
- sol K: [Ca] > [Fe] > [K] > [Na] > [Mg] en surface et en profondeur.
- sol R: [Ca] > [Fe] > [K] > [Na] > [Mg] en surface et;  
[Ca] > [Fe] > [Na] > [Mg] > [K] en profondeur.

##### ✓ ANNÉE 2007

- sol F: [Ca] > [Fe] > [K] > [Mg] > [Na] en surface et en profondeur.
- sol K: [Ca] > [Fe] > [K] > [Mg] > [Na] en surface et en profondeur.
- sol R: [Ca] > [Mg] > [K] > [Fe] > [Na] en surface et en profondeur.

##### ✓ ANNÉE 2008

- sol F: [Ca] > [Fe] > [Mg] > [K] > [Na] en surface et en profondeur.
- sol K: [Ca] > [Fe] > [Mg] > [K] > [Na] en surface et en profondeur.
- sol R: [Ca] > [Mg] > [Fe] > [K] > [Na] en surface et;  
[Ca] > [Mg] > [K] > [Fe] > [Na] en profondeur.

##### ✓ ANNÉE 2009

- sol F: [Ca] > [Fe] > [Mg] > [K] > [Na] en surface et en profondeur.
- sol K: [Ca] > [Fe] > [Mg] > [K] > [Na] en surface et en profondeur.
- sol R: [Ca] > [Mg] > [Fe] > [K] > [Na] en surface et en profondeur.

##### ✓ ANNÉE 2010

- sol F: [Ca] > [Fe] > [Mg] > [K] > [Na] en surface et en profondeur.
- sol K: [Ca] > [Mg] > [Fe] > [K] > [Na] en surface et en profondeur.

- sol R: [Ca] > [Mg] > [Fe] > [K] > [Na] en surface et;  
[Ca] > [Mg] > [Fe] > [K] > [Na] en profondeur.

### iii.2. Eléments traces métalliques (ETM)

La distribution des ETM se fait dans l'ordre décroissant suivant:

#### ✓ ANNÉE 2006

- sol F: [Zn] > [Mn] > [Pb] > [Cr] > [Cu] > [Ni] > [As] > [Co] > [Cd] en surface et;  
[Zn] > [Mn] > [Pb] > [As] > [Ni] > [Cr] > [Co] > [Cu] > [Cd] en profondeur.
- sol R: [Mn] > [Zn] > [Cr] > [Pb] > [As] > [Ni] > [Cu] > [Cd] > [Co] en surface et;  
[Mn] > [Zn] > [As] > [Pb] > [Ni] > [Cr] > [Cu] > [Cd] > [Co] en profondeur.
- sol K: [Zn] > [Mn] > [Cr] > [Ni] > [Pb] > [Cu] > [As] > [Cd] > [Co] en surface et;  
[Zn] > [Mn] > [Pb] > [Cr] > [Ni] > [As] > [Cu] > [Cd] > [Co] en profondeur.

#### ✓ ANNÉE 2007

- sol F: [Zn] > [Mn] > [Cr] > [Ni] > [Pb] > [Cu] > [As] > [Co] > [Cd] en surface et;  
[Zn] > [Mn] > [Cr] > [Ni] > [Cu] > [Pb] > [As] > [Co] > [Cd] en profondeur.
- sol R: [Mn] > [Zn] > [Cr] > [Pb] > [As] > [Ni] > [Cu] > [Cd] > [Co] en surface et;  
[Mn] > [Zn] > [As] > [Pb] > [Ni] > [Cr] > [Cu] > [Cd] > [Co] en profondeur.
- sol K: [Zn] > [Mn] > [Cr] > [Ni] > [Pb] > [Cu] > [As] > [Co] > [Cd] en surface et;  
[Mn] > [Zn] > [Cu] > [Cr] > [Pb] > [Cd] > [Ni] > [As] > [Co] en profondeur.

#### ✓ ANNÉE 2008

- sol F: [Zn] > [Mn] > [Cr] > [Ni] > [Pb] > [As] > [Cu] > [Co] > [Cd] en surface et;  
[Zn] > [Mn] > [Cr] > [Ni] > [Pb] > [As] > [Cu] > [Co] > [Cd] en profondeur.
- sol R: [Mn] > [Cr] > [Pb] > [As] > [Zn] > [Cu] > [Cd] > [Ni] > [Co] en surface et;  
[Mn] > [Zn] > [Cr] > [As] > [Pb] > [Ni] > [Cu] > [Cd] > [Co] en profondeur.
- sol K: [Zn] > [Mn] > [Cr] > [Pb] > [Ni] > [Cu] > [Cd] > [As] > [Co] en surface et;  
[Zn] > [Mn] > [Cu] > [Cr] > [Pb] > [Cd] > [Ni] > [As] > [Co] en profondeur.

#### ✓ ANNÉE 2009

- sol F: [Zn] > [Mn] > [Cr] > [Ni] > [Pb] > [As] > [Cu] > [Co] > [Cd] en surface et;  
[Zn] > [Mn] > [Ni] > [Cr] > [Pb] > [As] > [Cu] > [Co] > [Cd] en profondeur.
- sol R: [Zn] > [Mn] > [Cr] > [As] > [Pb] > [Cu] > [Cd] > [Ni] > [Co] en surface et;  
[Zn] > [Mn] > [Cr] > [As] > [Pb] > [Ni] > [Cu] > [Cd] > [Co] en profondeur.
- sol K: [Zn] > [Mn] > [Cr] > [Pb] > [Ni] > [As] > [Cu] > [Cd] > [Co] en surface et;  
[Zn] > [Mn] > [Ni] > [Pb] > [Cr] > [As] > [Cu] > [Co] > [Cd] en profondeur.

✓ ANNÉE 2010

- sol F: [Zn] > [Mn] > [Cr] > [Ni] > [Pb] > [As] > [Co] > [Cu] > [Cd] en surface et;  
[Zn] > [Mn] > [Cr] > [Ni] > [Pb] > [As] > [Cu] > [Co] > [Cd] en profondeur.
- sol R: [Zn] > [Mn] > [Cr] > [As] > [Pb] > [Co] > [Cu] > [Cd] > [Ni] en surface et;  
[Zn] > [Mn] > [Cr] > [As] > [Pb] > [Ni] > [Cu] > [Co] > [Cd] en profondeur.
- sol K: [Zn] > [Mn] > [Cr] > [Ni] > [Pb] > [Co] > [As] > [Cu] > [Cd] en surface et;  
[Zn] > [Mn] > [Cr] > [Ni] > [Pb] > [As] > [Co] > [Cu] > [Cd] en profondeur.

Les teneurs moyennes relevées montrent que la distribution est contrastée aussi bien verticale qu'horizontale, d'un sol à l'autre et pour le même sol.

Ces teneurs totales ne donnent aucun renseignement sur la mobilité des métaux dans les sols ou sur leur biodisponibilité, mais seulement exprime le danger potentiel du sol.

En effet, la connaissance des teneurs totales en métaux lourds est nécessaire mais elle n'est cependant pas suffisante pour évaluer leur mobilité et les risques environnementaux qui en découlent. La prévision de ces risques est étroitement liée aux formes physicochimiques sous les quelles les métaux sont présents, c'est à dire à leur spéciation.

L'étude de la spéciation des métaux apporte des informations sur leurs interactions avec la phase solide, et sur les forces de liaison avec cette dernière, donc sur leur mobilité actuelle ou future.

Le danger potentiel pour l'environnement est directement lié à la mobilité des éléments métalliques, il est conditionné par la nature des phases solides auxquelles ils sont associés. Par exemple, si les éléments métalliques sont inclus dans la structure de silicates ou de phosphates très insolubles, leur mobilité à long terme sera faible. Par contre, s'ils sont adsorbés à la surface de constituants organiques ou minéraux, leur mobilité à court ou moyen terme dépendra étroitement des conditions physicochimiques du milieu.

### III.1.3.2. Répartition géochimique des métaux majeurs et éléments traces métalliques dans les sols agricoles étudiés (Extraction séquentielle)

La spéciation des métaux majeurs et ETM est obtenue grâce à l'extraction séquentielle réalisée en triplicat selon le protocole décrit par Tessier.

Pour rappel que les différentes phases sont:

- ✓ *F1* représente les éléments échangeables.
- ✓ *F2* représente les éléments liés aux carbonates.
- ✓ *F3* représente les éléments aux oxyde de fer et manganèse (appelé également phase réductible).
- ✓ *F4* représente les éléments liés à la matière organique et aux sulfures (appelée également phase oxydable).
- ✓ *F5* représente les éléments résiduels.

L'objectif étant d'évaluer la fraction des métaux lourds potentiellement mobilisable et toxique, il est reconnu que les quatre premières fractions sont plus mobilisables que la fraction résiduelle.<sup>98</sup> En effet, les métaux adsorbés, échangés et liés aux carbonates sont généralement ceux apportés par l'activité humaine. Ils sont faiblement liés aux sédiments et peuvent facilement s'équilibrer en phase aqueuse et devenir plus biodisponible.<sup>88,93</sup> Par contre les métaux incorporés dans la phase minérale (*F5*) sont d'origine naturelle et sont donc très stables.<sup>89</sup> Ils sont jugés comme étant chimiquement stable et biologiquement inactif. Les métaux liés aux oxydes de Fe-Mn et à la matière organique peuvent être d'origine anthropogénique,<sup>92</sup> leur mobilité est sensible aux changements de potentiel redox et de pH.

Les résultats de distribution en pourcentage massique des éléments: Ca, K, Mg, Na, Fe, Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Mn, Co, Cr et As dans les trois sols étudiées sont représentés dans les tableaux (III-36 à III-55) et sont illustrés également sous forme d'histogramme dans les figures (III-31 à III-50).

**Tableau III-36:** Pourcentage massique\* des éléments majeurs dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2006.

	Sol F				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
%F1	0,52	4,43	21,56	4,55	0,04
%F2	19,48	0,16	10,28	8,74	0,06
%F3	32,64	0,32	21,72	2,06	5,31
%F4	0,50	0,01	4,48	0,16	0,08
%F5	46,86	95,08	41,96	84,50	94,51
<b>Total</b>	<b>202,88</b>	<b>72,99</b>	<b>6,03</b>	<b>95,22</b>	<b>12,81</b>
	Sol K				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
%F1	0,29	3,06	5,79	3,72	0,02
%F2	32,06	1,02	15,75	28,44	0,05
%F3	42,00	1,92	27,68	5,42	18,07
%F4	0,90	0,49	5,70	1,78	0,99
%F5	24,75	93,52	45,08	60,65	80,87
<b>Total</b>	<b>577,7</b>	<b>115,12</b>	<b>22,47</b>	<b>148,83</b>	<b>23,29</b>
	Sol R				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
%F1	0,25	11,08	2,10	2,90	0,54
%F2	71,73	6,01	12,15	46,21	2,12
%F3	4,36	0,69	2,04	1,04	20,56
%F4	17,35	27,42	80,84	41,40	0,91
%F5	6,31	54,80	2,87	8,45	75,88
<b>Total</b>	<b>526,41</b>	<b>31,77</b>	<b>61,32</b>	<b>181,59</b>	<b>3,30</b>

**Tableau III-37:** Pourcentage massique des éléments majeurs dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2007.

	Sol F				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
%F1	0,51	4,43	21,57	4,54	0,04
%F2	19,49	0,17	10,32	8,74	0,06
%F3	32,64	0,32	21,73	2,06	5,31
%F4	0,50	0,02	4,47	0,16	0,08
%F5	46,86	95,07	41,91	84,50	94,51
<b>Total</b>	<b>202,66</b>	<b>65,91</b>	<b>6,49</b>	<b>74,7</b>	<b>12,43</b>
	Sol K				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
%F1	0,29	3,06	5,77	3,72	0,02
%F2	32,06	1,02	15,76	28,44	0,05
%F3	42,00	1,92	27,67	5,41	18,25
%F4	0,91	0,49	5,69	1,77	0,05
%F5	24,75	93,51	45,10	60,65	81,62
<b>Total</b>	<b>544,08</b>	<b>101,36</b>	<b>37,76</b>	<b>122,29</b>	<b>18,63</b>
	Sol R				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
%F1	0,25	11,07	2,10	2,90	0,55
%F2	71,73	6,00	12,14	46,20	2,14
%F3	4,36	0,68	2,02	1,04	20,57
%F4	17,35	27,43	80,85	41,40	0,79
%F5	6,31	54,81	2,88	8,45	75,95
<b>Total</b>	<b>444,74</b>	<b>51,47</b>	<b>37,55</b>	<b>155,65</b>	<b>1,26</b>

\* Pourcentage massique = (Teneur en élément majeur dans la fraction / Total des teneurs des fractions) \* 100.



**Tableau III-38:** Pourcentage massique des éléments majeurs dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2008.

	Sol F				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
%F1	0,52	4,42	21,52	4,54	0,04
%F2	19,48	0,17	10,25	8,74	0,06
%F3	32,64	0,31	21,73	2,07	5,38
%F4	0,50	0,02	4,47	0,16	0,08
%F5	46,86	95,08	42,03	84,49	94,44
<b>Total*</b>	197,95	64,05	9,85	55,12	13,19
	Sol K				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
%F1	0,29	3,05	5,76	3,72	0,02
%F2	32,06	1,00	15,77	28,44	0,05
%F3	42,00	1,91	27,68	5,41	18,22
%F4	0,91	0,49	5,69	1,78	0,06
%F5	24,75	93,54	45,11	60,65	81,64
<b>Total</b>	524,99	50,77	53,47	109,6	16,46
	Sol R				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
%F1	0,10	11,08	2,09	2,91	0,57
%F2	28,00	6,02	12,14	46,21	2,10
%F3	1,70	0,68	2,02	1,04	20,99
%F4	67,74	27,41	80,87	41,40	0,95
%F5	2,46	54,82	2,87	8,45	75,38
<b>Total</b>	849,55	22,11	30,63	106	1,04

**Tableau III-39:** Pourcentage massique des éléments majeurs dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2009.

	Sol F				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
%F1	0,52	4,42	21,52	4,55	0,04
%F2	19,48	0,17	10,27	8,73	0,06
%F3	32,64	0,32	21,73	2,06	5,32
%F4	0,50	0,02	4,47	0,15	0,07
%F5	46,86	95,07	42,01	84,51	94,51
<b>Total</b>	193,39	59,69	19,47	34,47	13,90
	Sol K				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
%F1	0,29	3,07	5,77	3,72	0,02
%F2	32,06	1,01	15,77	28,43	0,05
%F3	42,00	1,91	27,67	5,41	18,22
%F4	0,91	0,51	5,69	1,78	0,07
%F5	24,75	93,50	45,10	60,65	81,64
<b>Total</b>	471,5	27,68	76,41	75,23	14,93
	Sol R				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
%F1	0,10	11,07	2,13	2,90	0,48
%F2	28,00	5,97	12,13	46,21	2,16
%F3	1,70	0,65	2,00	1,05	20,43
%F4	67,74	27,47	80,87	41,40	1,20
%F5	2,46	54,83	2,87	8,44	75,72
<b>Total</b>	562,72	9,21	15	47,61	0,83

\* Teneur totale en g/kg, voir annexe 02.

**Tableau III-40:** Pourcentage massique des éléments majeurs dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2010.

	<b>Sol F</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,51	4,42	21,52	4,53	0,04
%F2	19,48	0,16	10,30	8,74	0,06
%F3	32,64	0,31	21,70	2,05	5,33
%F4	0,50	0,02	4,50	0,16	0,07
%F5	46,86	95,09	41,98	84,53	94,50
<b>Total</b>	198,52	55,44	29,13	25,41	14,62
	<b>Sol K</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,29	3,03	5,77	3,72	0,02
%F2	32,06	0,98	15,77	28,42	0,05
%F3	42,00	1,89	27,67	5,41	18,27
%F4	0,91	0,49	5,69	1,79	0,10
%F5	24,75	93,61	45,10	60,66	81,56
<b>Total</b>	409,6	12,2	92,06	21,25	9,90
	<b>Sol R</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,10	11,21	2,08	2,93	0,56
%F2	28,00	5,92	12,18	46,19	2,06
%F3	1,70	0,62	2,08	1,06	20,60
%F4	67,74	27,41	80,83	41,39	0,00
%F5	2,46	54,83	2,82	8,43	76,78
<b>Total</b>	311,27	3,21	6,73	16,02	0,53

**Tableau III-41:** Pourcentage massique des éléments majeurs dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2006.

	<b>Sol F</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,51	4,43	21,56	4,55	0,03
%F2	19,49	0,17	10,36	8,74	0,04
%F3	32,64	0,31	21,73	2,06	5,77
%F4	0,50	0,01	4,41	0,15	0,09
%F5	46,86	95,08	41,94	84,50	94,06
<b>Total</b>	198,20	71,31	5,89	93,02	11,42
	<b>Sol K</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,29	3,06	5,79	3,72	0,01
%F2	32,06	1,01	15,76	28,44	0,04
%F3	42,00	1,92	27,65	5,41	19,31
%F4	0,91	0,49	5,69	1,77	0,05
%F5	24,75	93,52	45,10	60,65	80,59
<b>Total</b>	564,40	112,46	21,95	145,38	21,70
	<b>Sol R</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,24	11,08	2,10	2,91	0,83
%F2	71,74	5,99	12,15	46,20	3,48
%F3	4,36	0,68	2,03	1,04	34,32
%F4	17,35	27,43	80,86	41,40	1,04
%F5	6,31	54,83	2,87	8,45	60,32
<b>Total</b>	124,23	56,34	2,29	100,02	15,23

**Tableau III-42:** Pourcentage massique des éléments majeurs dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2007.

	<b>Sol F</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,52	4,42	21,52	4,54	0,04
%F2	19,48	0,17	10,28	8,73	0,05
%F3	32,64	0,31	21,68	2,06	5,79
%F4	0,50	0,02	4,43	0,15	0,09
%F5	46,86	95,08	42,09	84,51	94,04
<b>Total</b>	197,65	64,27	6,32	72,83	11,05
	<b>Sol K</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	58,96	0,71	17,50	14,07	0,12
%F2	2,89	0,38	39,00	9,01	0,06
%F3	20,81	42,30	12,87	24,69	0,21
%F4	16,76	55,42	24,45	43,31	99,32
%F5	0,58	1,20	6,18	8,92	0,29
<b>Total</b>	1,73	402,25	7,77	23,53	3,40
	<b>Sol R</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,25	11,17	3,70	2,34	1,41
%F2	0,26	21,75	2,09	3,10	2,11
%F3	76,37	11,80	12,04	49,29	8,45
%F4	4,64	1,34	2,01	1,11	84,51
%F5	18,47	53,93	80,16	44,17	3,52
<b>Total</b>	405,66	25,42	36,79	141,69	0,28

**Tableau III-43:** Pourcentage massique des éléments majeurs dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2008.

	<b>Sol F</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,98	48,05	19,60	28,44	0,57
%F2	0,95	46,87	29,83	20,96	0,57
%F3	36,31	1,69	14,27	40,38	0,71
%F4	60,82	3,21	30,12	9,54	96,73
%F5	0,94	0,17	6,20	0,69	1,42
<b>Total</b>	103,72	5,91	6,94	11,64	0,70
	<b>Sol K</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,27	47,02	4,55	7,33	0,13
%F2	0,38	25,00	10,01	8,76	0,07
%F3	42,48	8,28	27,43	66,98	0,20
%F4	55,66	15,73	48,12	12,75	99,27
%F5	1,20	3,97	9,88	4,18	0,33
<b>Total</b>	384,66	6,04	29,86	45,18	3,00
	<b>Sol R</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,13	22,54	4,47	3,38	1,75
%F2	0,10	18,97	2,07	3,06	1,75
%F3	28,67	10,32	11,94	48,77	8,77
%F4	1,74	1,19	2,01	1,10	83,33
%F5	69,36	46,98	79,51	43,69	4,39
<b>Total</b>	809,63	12,60	30,40	98,00	0,22

**Tableau III-44:** Pourcentage massique des éléments majeurs dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2009.

	<b>Sol F</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	1,02	50,09	11,07	39,08	0,54
%F2	0,96	44,97	32,95	17,83	0,54
%F3	36,29	1,59	15,79	34,36	0,81
%F4	60,81	3,17	33,28	8,15	96,77
%F5	0,93	0,18	6,92	0,59	1,34
<b>Total</b>	100,32	5,67	12,29	8,47	0,74
	<b>Sol K</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,29	61,61	3,18	10,18	0,15
%F2	0,38	18,22	10,18	8,49	0,07
%F3	42,47	6,07	27,80	64,90	0,19
%F4	55,65	11,28	48,79	12,37	99,59
%F5	1,20	2,82	10,04	4,06	0,00
<b>Total</b>	350,94	4,61	42,73	32,51	2,69
	<b>Sol R</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,19	41,04	8,66	7,17	2,63
%F2	0,10	14,45	1,97	2,94	1,97
%F3	28,66	7,80	11,40	46,85	9,87
%F4	1,74	0,87	1,91	1,06	85,53
%F5	69,32	35,84	76,05	41,98	0,00
<b>Total</b>	541,03	6,92	15,70	46,19	0,15

**Tableau III-45:** Pourcentage massique des éléments majeurs dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2010.

	<b>Sol F</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,51	4,42	21,53	4,53	0,04
%F2	19,48	0,17	10,29	8,74	0,04
%F3	32,64	0,32	21,70	2,06	5,20
%F4	0,50	0,02	4,49	0,16	0,07
%F5	46,86	95,08	41,99	84,49	94,65
<b>Total</b>	192,84	53,87	28,29	24,7	14,22
	<b>Sol K</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,29	3,03	5,77	3,73	0,01
%F2	32,06	1,01	15,77	28,43	0,03
%F3	42,00	1,94	27,67	5,42	18,54
%F4	0,91	0,51	5,69	1,79	0,00
%F5	24,75	93,51	45,10	60,63	81,42
<b>Total</b>	397,96	11,87	89,45	20,65	9,49
	<b>Sol R</b>				
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
%F1	0,10	11,22	2,14	2,89	1,42
%F2	28,00	6,09	12,10	46,24	6,38
%F3	1,70	0,64	1,99	1,03	49,65
%F4	67,74	27,24	80,86	41,41	0,00
%F5	2,46	54,81	2,91	8,42	42,55
<b>Total</b>	302,20	3,12	6,53	15,55	0,14

**Tableau III-46:** Pourcentage massique des éléments traces métalliques dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2006.

Note : le total est exprimé en mg/kg en MS (Annexe03)

Sol F									
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,01	8,27	0,33	0,48	0,26	0,07	25,97	1,09	0,01
% F2	0,14	0,25	2,33	4,07	3,85	4,85	0,87	0,11	0,07
% F3	1,15	0,25	4,75	6,10	10,83	9,62	0,43	4,35	0,21
% F4	0,25	6,31	0,89	0,13	0,13	0,11	35,06	1,82	0,12
% F5	98,44	84,93	91,71	89,22	84,92	85,35	37,66	92,62	99,58
<b>Total</b>	356,834	12,211	55,006	743,823	30,367	706,370	2,310	46,635	415,868
Sol K									
% F1	0,03	0,62	0,05	0,10	0,10	0,17	25,82	0,83	0,001
% F2	0,91	0,98	1,78	12,38	5,46	22,23	11,48	0,67	0,03
% F3	31,28	1,80	11,25	43,84	35,19	58,44	3,28	9,62	0,03
% F4	4,19	93,64	12,63	18,87	35,54	1,40	34,43	7,27	0,68
% F5	63,61	2,95	74,29	24,81	23,71	17,77	25,00	81,61	99,26
<b>Total</b>	222,004	160,774	105,380	1752,045	133,800	897,570	2,440	80,380	1728,947
Sol R									
% F1	0,17	22,88	5,17	0,21	1,37	0,14	18,32	2,96	0,27
% F2	1,41	36,61	28,98	45,22	66,66	86,49	1,10	4,37	1,90
% F3	19,98	34,32	13,96	6,83	16,95	8,39	20,51	20,94	0,19
% F4	1,52	0,92	4,00	43,84	2,20	0,57	29,30	3,95	0,23
% F5	76,92	5,26	47,89	4,12	12,83	4,40	30,77	67,77	97,41
<b>Total</b>	28,980	8,739	17,980	843,040	29,153	564,104	2,730	14,179	347,660

**Tableau III-47:** Pourcentage massique des éléments traces métalliques dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2007.

Sol F									
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,18	8,26	0,32	0,48	0,25	0,07	26,20	1,10	0,01
% F2	1,61	0,17	2,31	4,07	3,87	4,85	0,87	0,11	0,07
% F3	13,07	0,26	4,74	6,11	10,82	9,62	0,44	4,36	0,21
% F4	2,86	6,30	0,88	0,13	0,14	0,11	34,93	1,82	0,12
% F5	82,28	85,02	91,75	89,22	84,92	85,35	37,55	92,62	99,58
<b>Total</b>	27,320	11,751	59,270	3140,584	51,660	681,190	2,290	91,849	407,139
Sol K									
% F1	0,03	0,62	0,05	0,10	0,10	0,17	25,83	0,84	0,001
% F2	0,91	0,98	1,79	12,38	5,46	22,52	11,67	0,68	0,03
% F3	31,28	1,80	11,25	43,84	35,19	59,21	3,33	9,62	0,03
% F4	4,19	93,65	12,63	18,88	35,54	0,10	34,17	7,27	0,68
% F5	63,61	2,95	74,29	24,81	23,71	18,01	25,00	81,60	99,26
<b>Total</b>	222,004	161,540	87,749	4423,662	154,720	611,221	2,400	94,569	1120,521
Sol R									
% F1	0,19	22,95	5,14	0,21	1,37	0,14	18,29	2,97	0,27
% F2	1,44	36,63	29,04	45,22	66,70	86,49	0,91	4,38	1,90
% F3	19,99	34,32	13,98	6,83	16,93	8,39	20,73	20,90	0,19
% F4	1,49	0,84	3,97	43,62	2,20	0,57	29,27	3,91	0,23
% F5	76,89	5,26	47,88	4,12	12,81	4,41	30,79	67,84	97,41
<b>Total</b>	20,860	4,750	11,091	480,510	10,931	419,270	3,280	14,830	289,290

**Tableau III-48:** Pourcentage massique des éléments traces métalliques dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2008.

<b>Sol F</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
% F1	0,16	8,30	0,33	0,22	0,25	0,07	26,04	1,09	0,01
% F2	1,62	0,17	2,32	1,92	3,86	4,85	1,04	0,11	0,07
% F3	13,07	0,26	4,74	2,88	10,83	9,62	0,35	4,36	0,21
% F4	2,86	6,34	0,89	0,06	0,13	0,11	35,07	1,82	0,12
% F5	82,30	84,93	91,72	94,92	84,93	85,35	37,50	92,62	99,58
<b>Total</b>	31,523	11,680	42,630	5726,660	85,150	746,580	2,880	136,090	538,916
<b>Sol K</b>									
% F1	0,02	0,61	0,05	0,10	0,10	0,17	25,83	0,84	0,001
% F2	0,91	0,98	1,79	12,38	5,46	22,52	11,67	0,68	0,03
% F3	31,28	1,81	11,25	43,84	35,18	59,21	3,33	9,62	0,03
% F4	4,19	93,65	12,63	18,88	35,54	0,10	34,17	7,26	0,68
% F5	63,61	2,95	74,28	24,81	23,72	18,01	25,00	81,60	99,26
<b>Total</b>	255,906	127,380	73,790	7460,016	189,260	478,168	2,400	111,100	674,937
<b>Sol R</b>									
% F1	0,20	22,83	5,17	0,21	1,42	0,14	18,28	2,94	0,27
% F2	1,43	36,68	28,96	45,21	66,59	86,48	0,88	4,38	1,90
% F3	19,99	34,51	13,99	6,83	17,00	8,40	20,70	20,90	0,19
% F4	1,53	0,82	3,98	43,61	2,24	0,57	29,30	3,94	0,23
% F5	76,85	5,16	47,90	4,11	12,75	4,41	30,84	67,83	97,41
<b>Total</b>	20,260	3,680	9,290	33,077	8,470	204,050	4,540	15,978	255,540

**Tableau III-49:** Pourcentage massique des éléments traces métalliques dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2009.

<b>Sol F</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
% F1	0,16	8,30	0,31	0,54	0,24	0,07	25,95	1,10	0,01
% F2	1,64	0,19	2,33	4,57	3,87	4,85	1,17	0,11	0,07
% F3	13,09	0,28	4,76	6,85	10,83	9,62	0,29	4,36	0,21
% F4	2,85	6,32	0,88	0,15	0,14	0,11	34,99	1,83	0,12
% F5	82,26	84,91	91,72	87,91	84,93	85,35	37,61	92,61	99,58
<b>Total</b>	37,210	10,600	38,670	6186,597	103,190	756,890	3,430	168,777	558,934
<b>Sol K</b>									
% F1	0,03	0,62	0,05	0,10	0,10	0,17	25,65	0,83	0,001
% F2	0,91	0,98	1,80	12,38	5,46	22,52	11,74	0,68	0,03
% F3	31,28	1,80	11,24	43,84	35,19	59,21	3,48	9,62	0,03
% F4	4,19	93,64	12,63	18,88	35,54	0,10	34,35	7,26	0,68
% F5	63,61	2,96	74,28	24,81	23,72	18,01	24,78	81,61	99,26
<b>Total</b>	279,336	91,970	43,940	1257,446	230,233	440,284	2,300	131,240	922,669
<b>Sol R</b>									
% F1	0,16	22,87	5,19	0,21	1,37	0,14	18,30	2,95	0,27
% F2	1,43	36,43	28,89	45,22	66,59	86,49	0,92	4,36	1,90
% F3	19,97	34,50	14,00	6,83	16,93	8,39	20,70	20,92	0,19
% F4	1,51	0,78	4,06	43,62	2,29	0,57	29,21	3,95	0,23
% F5	76,93	5,43	47,86	4,12	12,81	4,41	30,87	67,83	97,41
<b>Total</b>	12,580	2,580	4,410	410,300	4,360	189,110	5,410	16,977	227,310

**Tableau III-50:** Pourcentage massique des éléments traces métalliques dans les différentes fractions des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2010.

	Sol F								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,17	8,27	0,31	2,42	0,25	0,07	26,12	1,09	0,01
% F2	1,62	0,17	2,31	20,66	3,87	4,85	0,94	0,11	0,07
% F3	13,07	0,26	4,74	30,98	10,83	9,62	0,24	4,36	0,21
% F4	2,84	6,31	0,87	0,66	0,13	0,11	35,06	1,82	0,12
% F5	82,30	85,00	91,76	45,27	84,93	85,35	37,65	92,62	99,58
<b>Total</b>	54,230	11,731	32,047	4462,684	124,412	774,620	4,250	191,400	634,787
	Sol K								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,03	0,62	0,04	0,10	0,10	0,17	25,80	0,83	0,00
% F2	0,91	0,98	1,79	12,38	5,46	22,52	11,68	0,68	0,03
% F3	31,28	1,81	11,26	43,84	35,19	59,21	3,34	9,62	0,03
% F4	4,19	93,63	12,65	18,86	35,54	0,10	34,29	7,26	0,68
% F5	63,60	2,96	74,27	24,81	23,72	18,01	24,89	81,61	99,26
<b>Total</b>	301,740	62,500	27,363	2538,154	262,686	371,617	6,590	167,060	895,310
	Sol R								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,17	24,00	5,26	0,21	1,01	0,14	18,43	2,94	0,27
% F2	1,39	36,00	28,95	45,22	66,67	86,48	0,96	4,36	1,90
% F3	20,00	36,00	14,04	6,83	17,17	8,40	20,67	20,93	0,19
% F4	1,48	0,00	3,95	43,62	2,02	0,57	29,17	3,96	0,23
% F5	76,96	4,00	47,81	4,12	13,13	4,40	30,77	67,82	97,42
<b>Total</b>	11,500	0,250	2,280	3986,050	0,990	69,763	6,240	17,682	207,001

**Tableau III-51:** Pourcentage massique des éléments traces métalliques dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2006.

	Sol F								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,14	8,42	3,17	0,07	0,31	0,04	25,47	9,34	0,02
% F2	1,76	0,17	12,33	0,48	4,71	4,71	1,18	0,27	0,09
% F3	10,99	0,50	23,42	0,70	10,21	9,10	1,02	5,49	0,22
% F4	2,84	4,46	5,75	0,02	0,49	0,08	35,22	3,30	0,12
% F5	84,27	86,47	55,33	98,73	84,28	86,07	37,22	81,59	99,56
<b>Total</b>	27,850	6,061	12,000	6764,910	32,700	634,760	2,453	3,640	841,204
	Sol K								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,02	0,31	0,23	0,17	0,11	0,15	25,44	0,68	0,01
% F2	0,91	0,97	1,94	12,18	5,59	22,55	1,18	0,68	0,05
% F3	31,30	1,81	11,22	42,74	34,31	59,44	1,02	7,98	0,07
% F4	4,21	94,02	12,58	18,39	34,70	0,07	35,22	7,72	0,57
% F5	63,56	2,89	74,03	26,52	25,28	17,79	37,22	82,95	99,31
<b>Total</b>	218,440	160,100	107,380	1800,540	137,346	865,200	2,442	73,987	2154,335
	Sol R								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,16	18,63	5,66	0,34	1,28	0,10	25,47	3,22	0,13
% F2	1,53	39,50	27,08	43,02	60,53	88,97	1,18	7,46	0,91
% F3	18,65	37,27	13,56	6,65	15,26	6,83	1,02	14,54	0,21
% F4	1,33	0,37	4,60	41,28	2,32	0,55	35,22	5,53	0,17
% F5	78,33	4,22	49,10	8,71	20,61	3,55	37,22	69,24	98,58
<b>Total</b>	25,470	8,049	19,980	891,710	32,710	543,550	2,453	7,769	772,860

**Tableau III-52:** Pourcentage massique des éléments traces métalliques dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2007.

	Sol F								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,17	4,67	0,64	0,51	0,41	0,04	26,20	0,98	0,03
% F2	1,76	0,10	2,56	4,14	6,46	4,34	0,87	0,07	0,17
% F3	10,63	0,30	4,91	6,14	15,38	8,37	1,22	2,54	0,43
% F4	2,86	6,85	1,18	0,14	0,52	0,08	35,10	1,80	0,24
% F5	84,59	88,08	90,71	89,07	77,24	87,17	37,14	94,60	99,12
<b>Total</b>	23,812	10,070	61,270	3150,160	36,684	660,580	2,463	85,431	422,348
	Sol K								
% F1	0,02	0,31	0,27	0,13	0,11	0,14	25,31	0,70	0,01
% F2	0,91	0,98	1,97	12,30	5,57	22,57	1,22	0,68	0,07
% F3	31,30	1,82	11,22	43,40	34,43	59,54	1,22	8,24	0,11
% F4	4,21	94,60	12,57	18,68	34,82	0,06	35,10	7,65	0,72
% F5	63,56	2,28	73,97	25,50	25,08	17,69	37,14	82,73	99,09
<b>Total</b>	218,440	159,844	89,740	4472,337	158,296	590,560	2,450	88,150	1135,720
	Sol R								
% F1	0,23	14,39	5,88	0,42	1,17	0,09	25,31	3,21	0,28
% F2	1,61	42,20	26,13	41,52	52,86	89,87	1,22	7,13	1,94
% F3	18,03	39,76	13,37	6,52	13,11	6,26	1,22	15,10	0,49
% F4	1,21	0,49	4,89	39,67	2,48	0,54	35,10	5,35	0,40
% F5	78,92	3,17	49,73	11,87	30,37	3,24	37,14	69,20	96,89
<b>Total</b>	17,360	4,100	13,090	529,180	14,489	398,670	2,450	8,409	304,490

**Tableau III-53:** Pourcentage massique des éléments traces métalliques dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2008.

	Sol F								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,14	4,27	0,76	0,25	0,26	0,04	25,31	1,02	0,03
% F2	1,75	0,09	2,67	1,96	4,12	4,39	1,22	0,08	0,15
% F3	11,00	0,27	4,97	2,90	10,45	8,49	1,22	3,16	0,38
% F4	2,86	6,45	1,30	0,07	0,26	0,08	35,10	1,81	0,21
% F5	84,26	88,92	90,30	94,83	84,91	87,01	37,14	93,92	99,23
<b>Total</b>	28,013	11,010	44,630	5735,353	88,730	726,053	2,450	129,677	554,170
	Sol K								
% F1	0,02	0,22	0,32	0,12	0,10	0,13	25,31	0,73	0,01
% F2	0,91	0,97	2,01	12,31	5,56	22,58	1,22	0,68	0,09
% F3	31,30	1,81	11,21	43,52	34,62	59,64	1,22	8,45	0,16
% F4	4,20	94,13	12,56	18,87	35,00	0,05	35,10	7,58	0,74
% F5	63,57	2,87	73,91	25,19	24,71	17,60	37,14	82,56	98,99
<b>Total</b>	252,360	126,700	75,808	7518,652	192,481	457,520	2,450	104,700	690,071
	Sol R								
% F1	0,24	11,30	6,02	1,42	1,35	0,03	25,31	3,14	0,28
% F2	1,61	44,19	25,60	18,95	57,79	93,83	1,22	6,80	1,95
% F3	17,96	41,86	13,29	4,28	14,33	3,76	1,22	15,79	0,53
% F4	1,25	0,33	5,05	27,00	2,98	0,51	35,10	5,23	0,42
% F5	78,94	2,33	50,04	48,35	23,56	1,87	37,14	69,04	96,82
<b>Total</b>	16,750	3,020	11,280	91,750	10,391	183,430	2,450	9,570	270,730

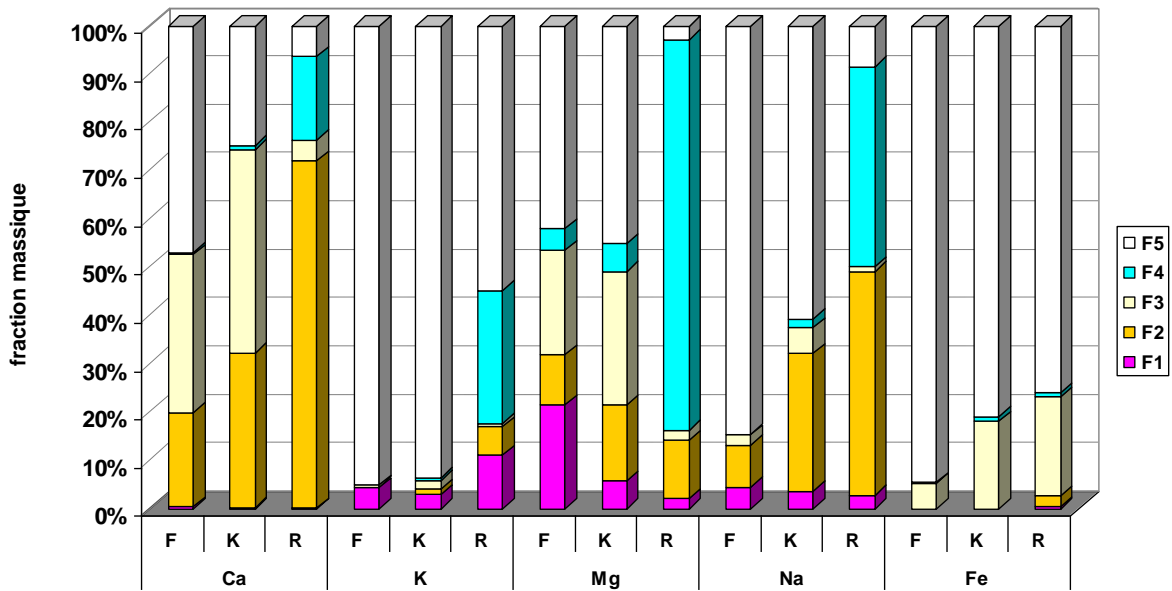


**Tableau III-54:** Pourcentage massique des éléments traces métalliques dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2009.

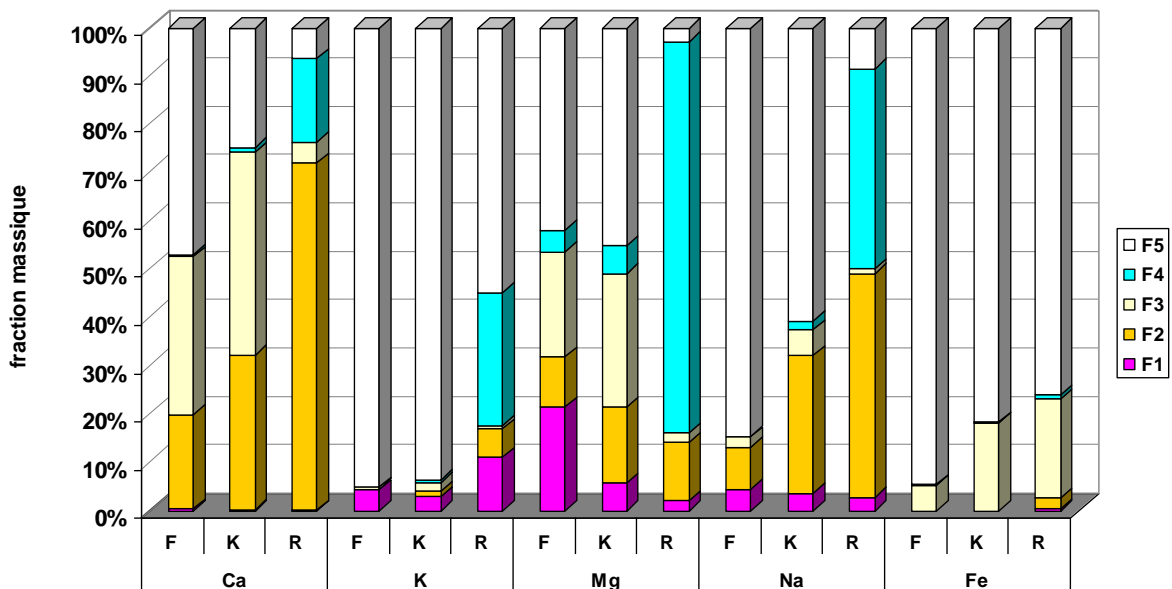
	Sol F								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,12	3,82	0,79	0,49	0,37	0,04	25,31	1,27	0,03
% F2	1,72	0,10	2,70	4,09	5,93	4,39	1,22	0,11	0,15
% F3	11,37	0,30	5,02	6,11	15,27	8,50	1,22	4,17	0,37
% F4	2,85	6,44	1,33	0,28	0,35	0,08	35,10	2,23	0,21
% F5	83,94	89,34	90,16	89,02	78,07	86,98	37,14	92,22	99,25
<b>Total</b>	33,680	9,940	40,670	6954,334	73,463	736,216	2,450	132,340	574,247
	Sol K								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,01	0,08	0,48	0,11	0,10	0,13	25,31	0,97	0,01
% F2	0,91	0,97	2,15	12,34	5,40	22,81	1,22	0,89	0,08
% F3	31,30	1,82	11,19	43,64	33,80	60,25	1,22	11,38	0,13
% F4	4,20	94,29	12,52	18,87	34,17	0,05	35,10	9,91	0,73
% F5	63,57	2,84	73,66	25,03	26,53	16,77	37,14	76,85	99,06
<b>Total</b>	275,722	91,300	45,940	1264,194	239,770	415,682	2,460	94,820	937,954
	Sol R								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,44	21,70	6,66	0,45	0,57	0,14	25,44	3,48	0,28
% F2	1,74	36,98	23,08	40,08	23,54	88,60	1,18	7,29	1,96
% F3	16,19	35,15	12,72	6,33	5,67	7,59	1,02	17,96	0,57
% F4	0,99	0,88	5,85	40,37	1,54	0,47	35,18	5,61	0,44
% F5	80,64	5,29	51,68	12,77	68,67	3,21	37,18	65,66	96,76
<b>Total</b>	9,093	2,512	6,421	468,973	13,919	179,721	2,453	9,567	242,531

**Tableau III-55:** Pourcentage massique des éléments traces métalliques dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2010.

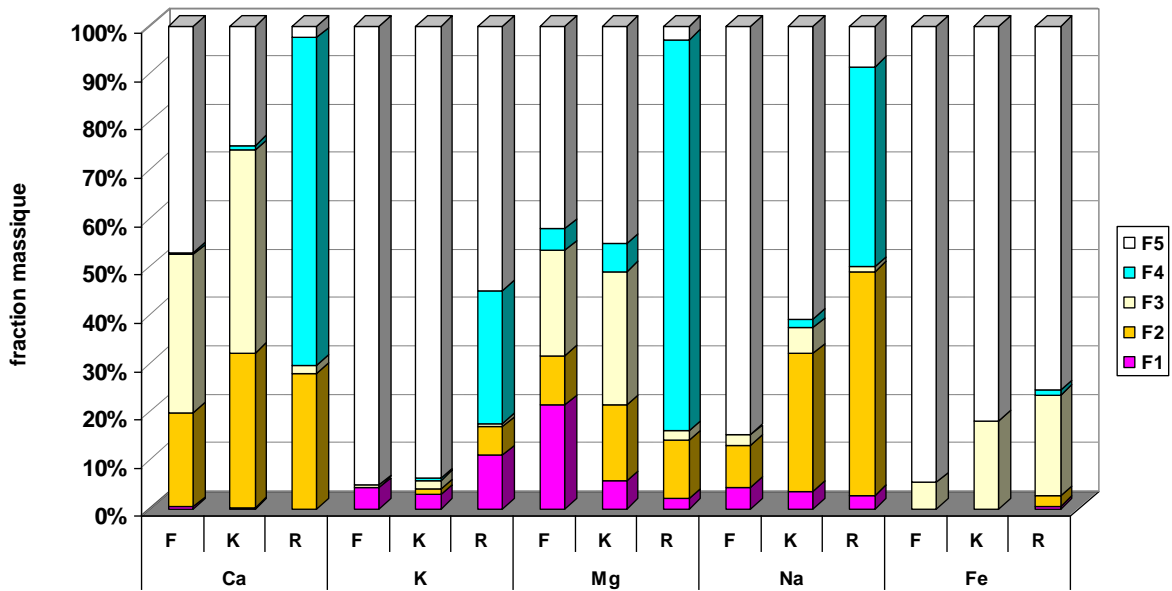
	Sol F								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,08	4,24	0,88	2,42	0,54	0,04	25,31	1,24	0,02
% F2	1,70	0,09	2,76	20,45	8,44	4,43	1,22	0,11	0,14
% F3	11,94	0,27	5,05	30,62	22,04	8,58	1,22	4,20	0,35
% F4	2,84	6,50	1,41	0,88	0,46	0,08	35,10	2,17	0,20
% F5	83,45	88,90	89,90	45,64	68,52	86,87	37,14	92,28	99,29
<b>Total</b>	50,685	11,080	34,050	4522,242	61,340	750,020	2,450	155,000	650,050
	Sol K								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,01	0,19	0,72	0,10	0,10	0,12	25,31	0,93	0,01
% F2	0,91	0,97	2,35	12,36	5,40	22,86	1,22	0,83	0,08
% F3	31,30	1,80	11,17	43,76	33,97	60,46	1,22	10,90	0,13
% F4	4,20	94,26	12,47	18,88	34,34	0,03	35,10	9,18	0,73
% F5	63,57	2,77	73,30	24,89	26,19	16,53	37,14	78,16	99,05
<b>Total</b>	298,140	62,044	29,363	3471,183	272,220	346,980	2,450	130,650	910,520
	Sol R								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
% F1	0,50	5,56	7,48	0,24	0,28	0,13	25,31	3,40	0,28
% F2	1,75	44,44	20,09	44,62	9,76	92,76	1,22	7,10	1,96
% F3	15,71	44,44	12,15	6,77	2,09	6,00	1,22	18,19	0,60
% F4	0,87	0,00	6,78	43,24	1,33	0,27	35,10	5,54	0,46
% F5	81,17	5,56	53,50	5,12	86,54	0,84	37,14	65,76	96,70
<b>Total</b>	8,020	0,180	4,280	4044,316	10,550	60,360	2,450	10,279	222,180



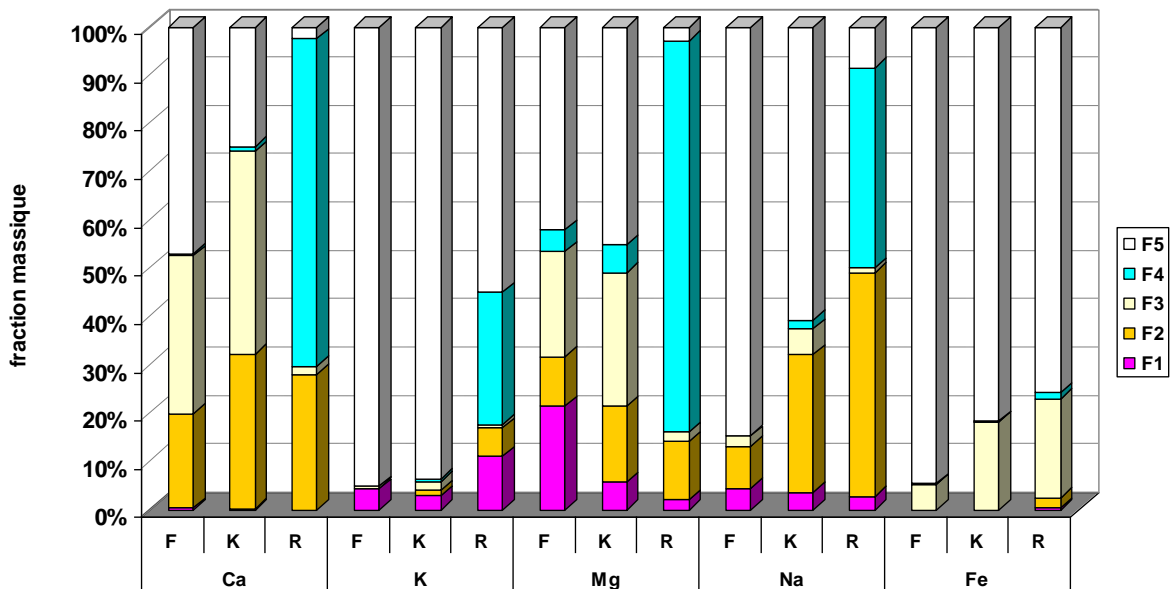
**Figure III-31:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments majeurs en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2006.



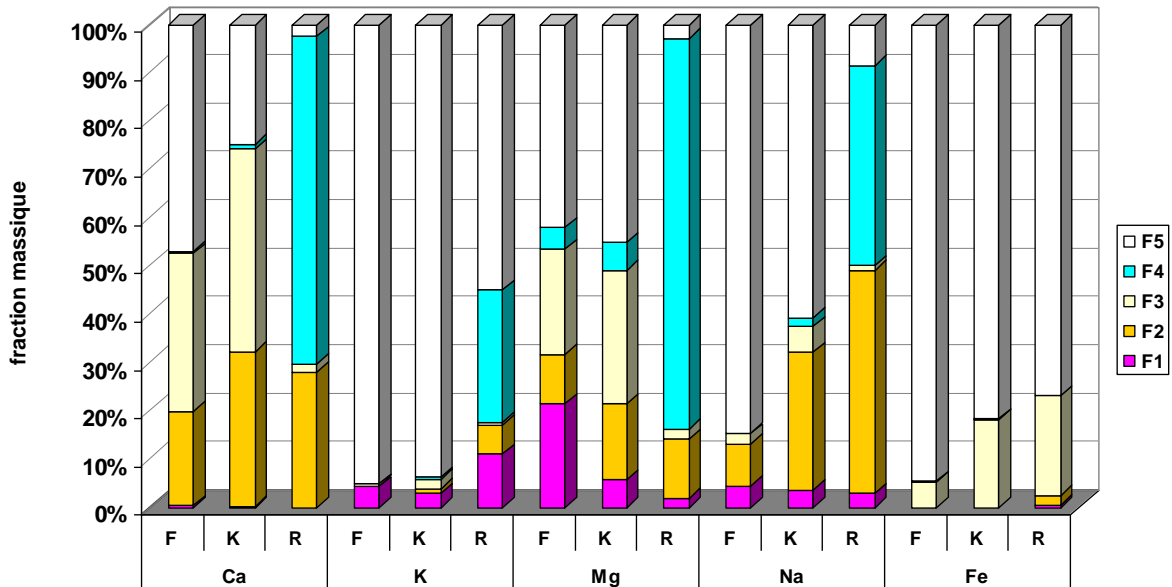
**Figure III-32:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments majeurs en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2007.



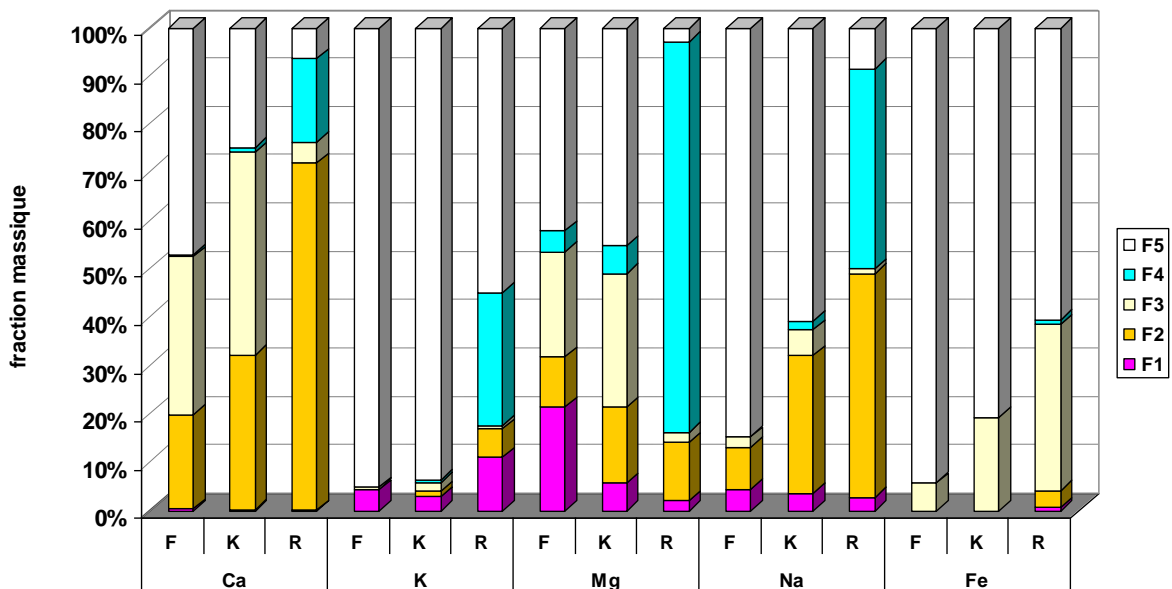
**Figure III-33:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments majeurs en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2008.



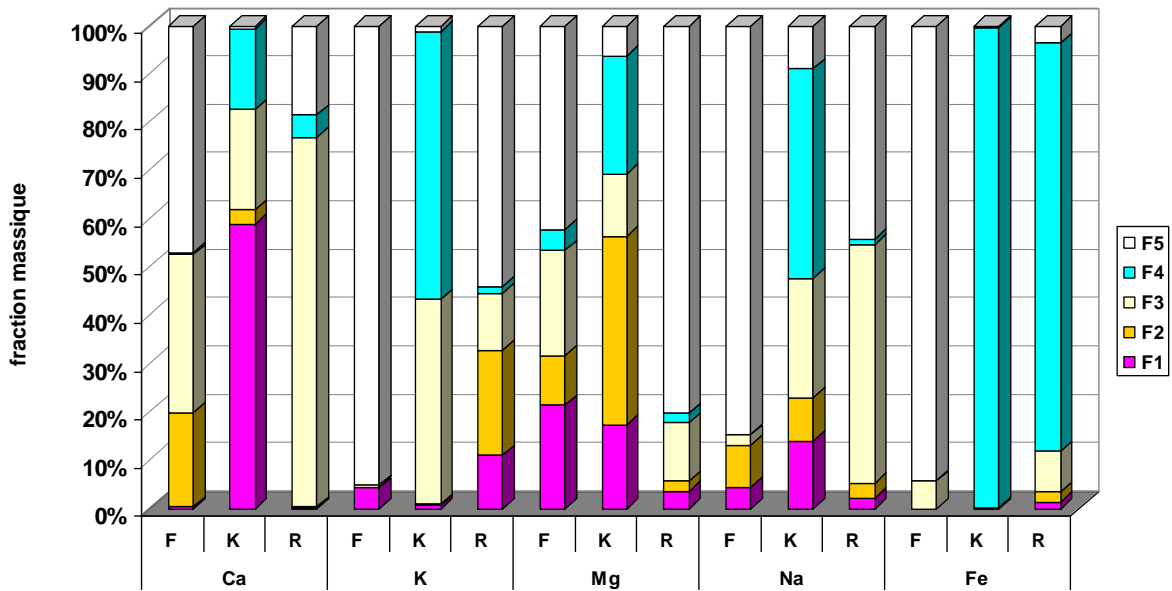
**Figure III-34:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments majeurs en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2009.



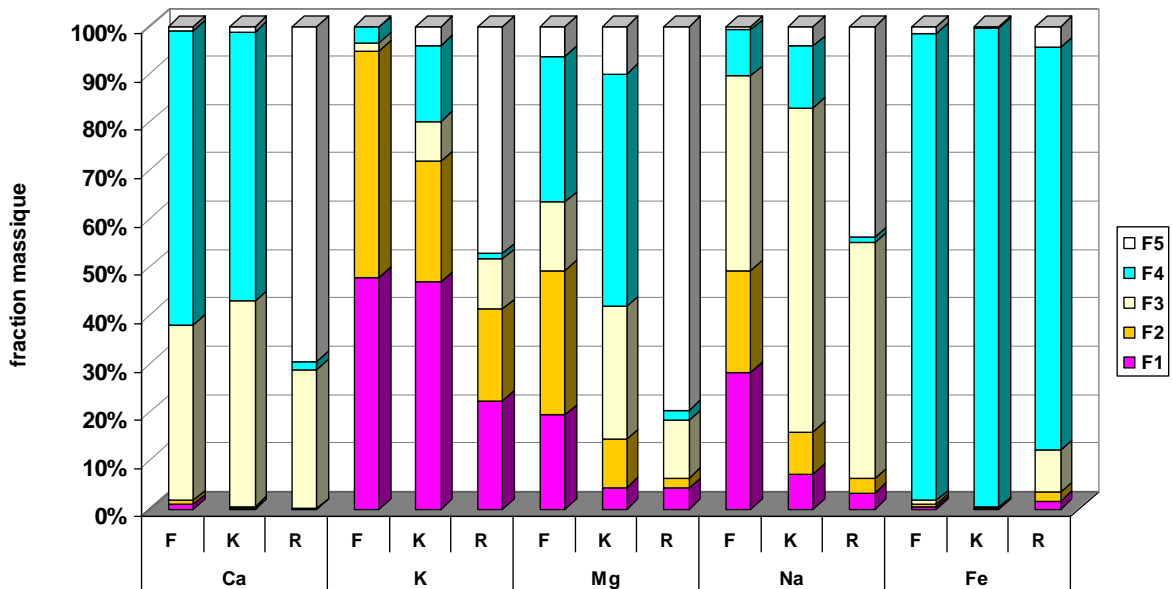
**Figure III-35:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments majeurs en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en surface (0-20cm) de l'année 2010.



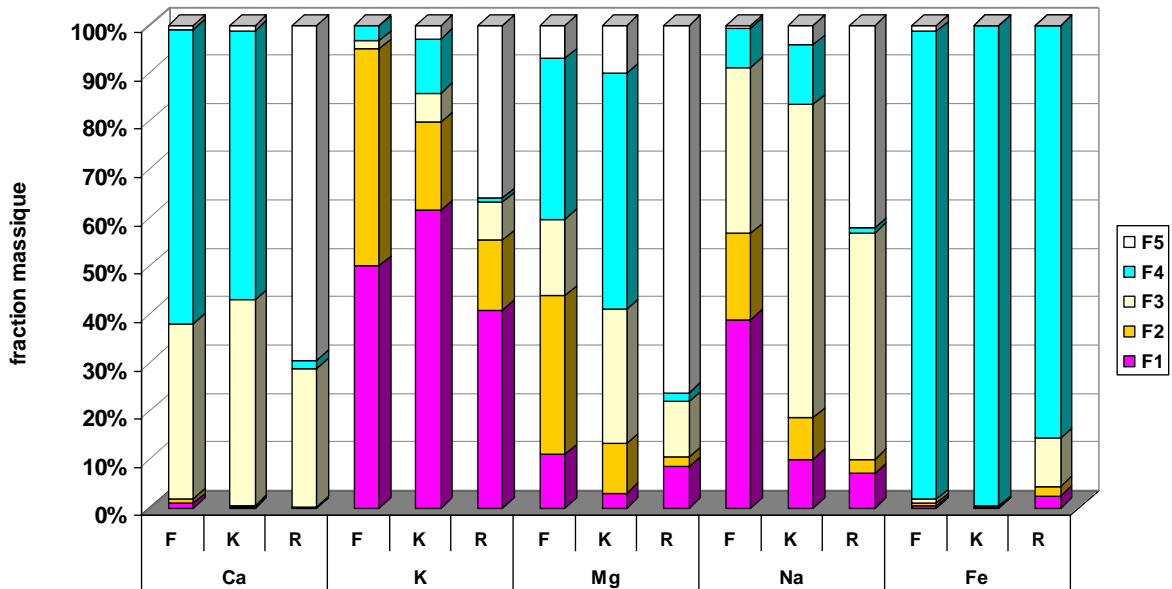
**Figure III-36:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments majeurs en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2006.



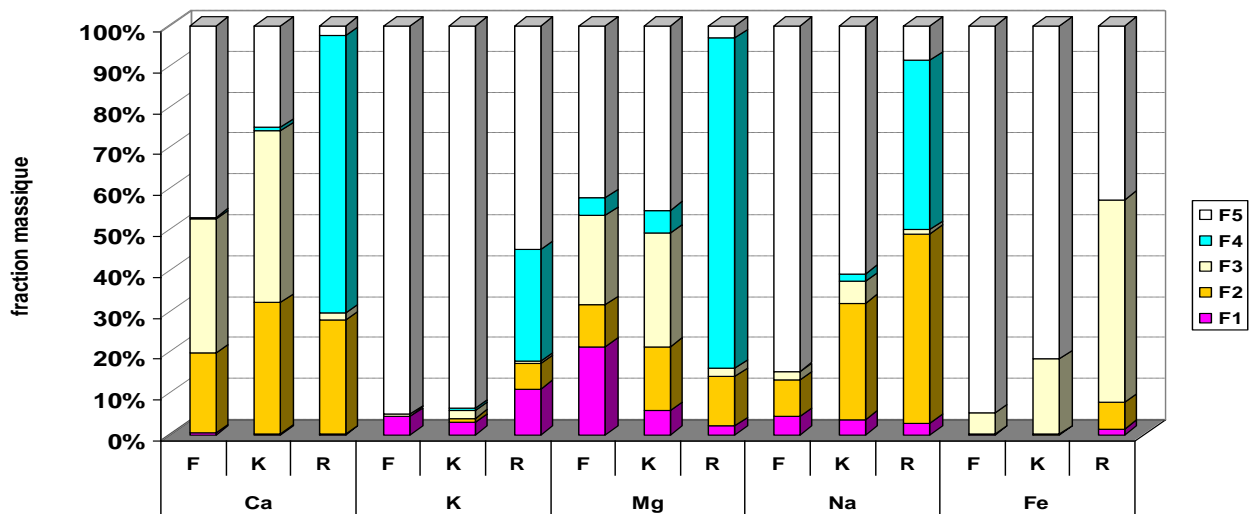
**Figure III-37:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments majeurs en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2007.



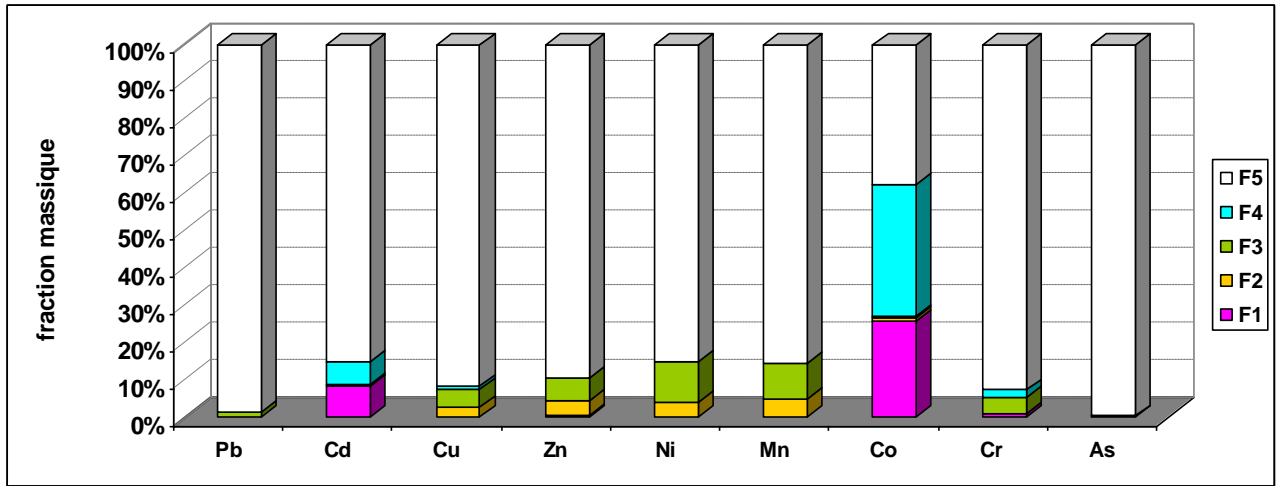
**Figure III-38:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments majeurs en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2008.



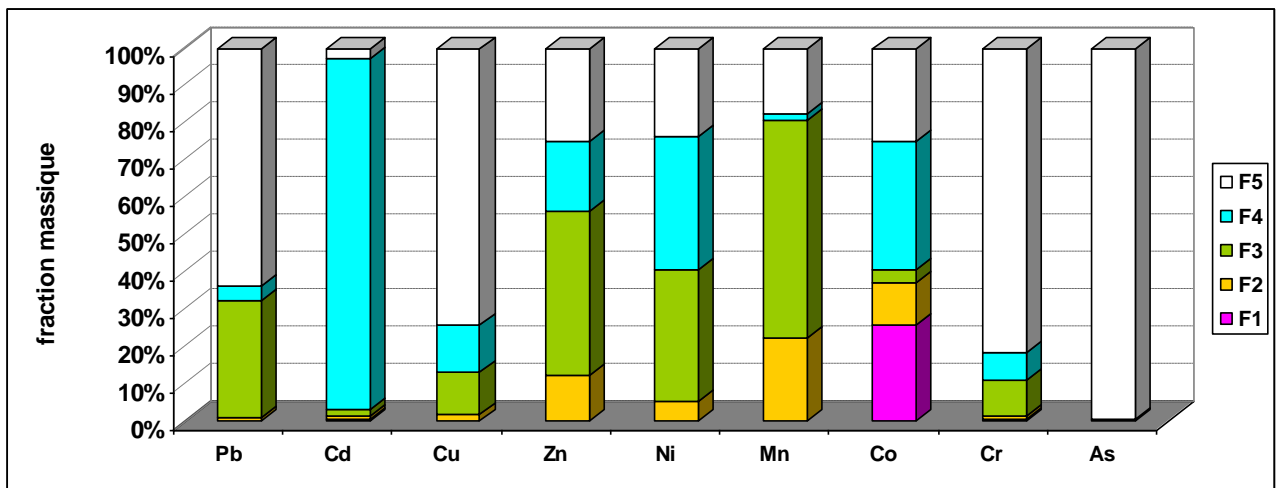
**Figure III-39:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments majeurs en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2009.



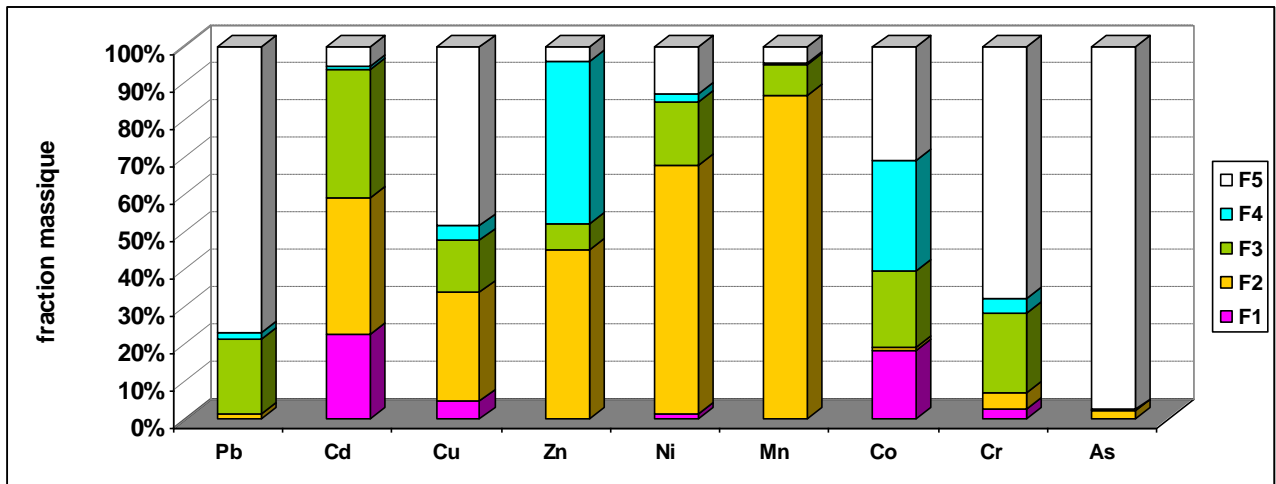
**Figure III-40:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments majeurs en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur (20-40cm) de l'année 2010.



(F)

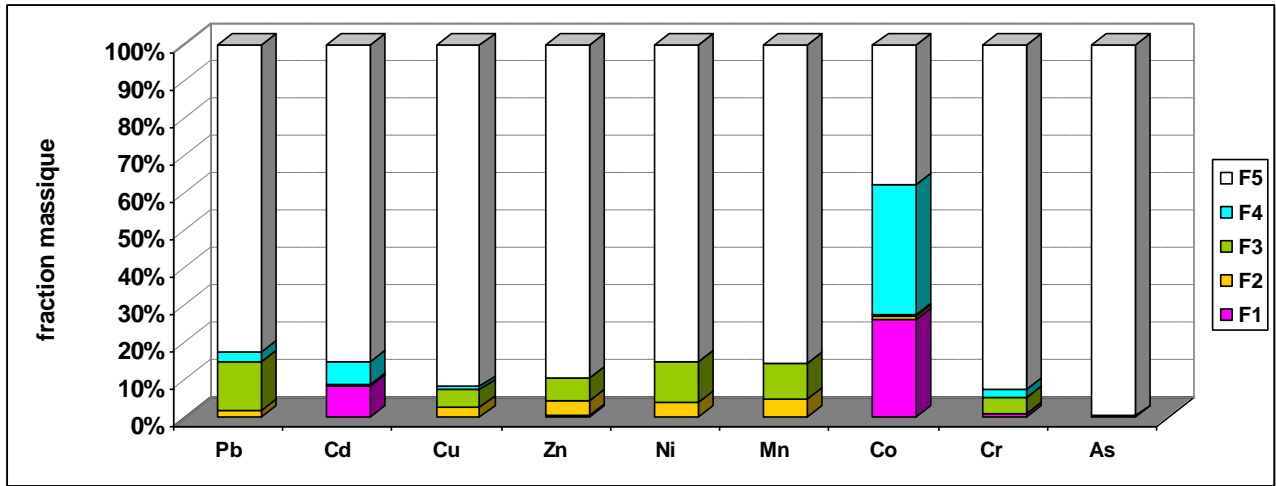


(K)

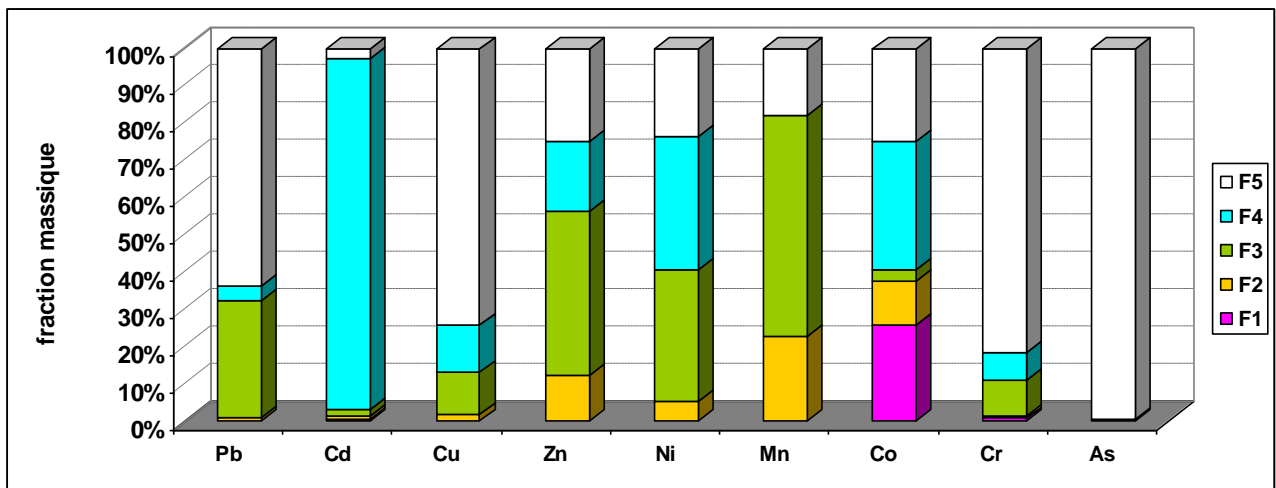


(R)

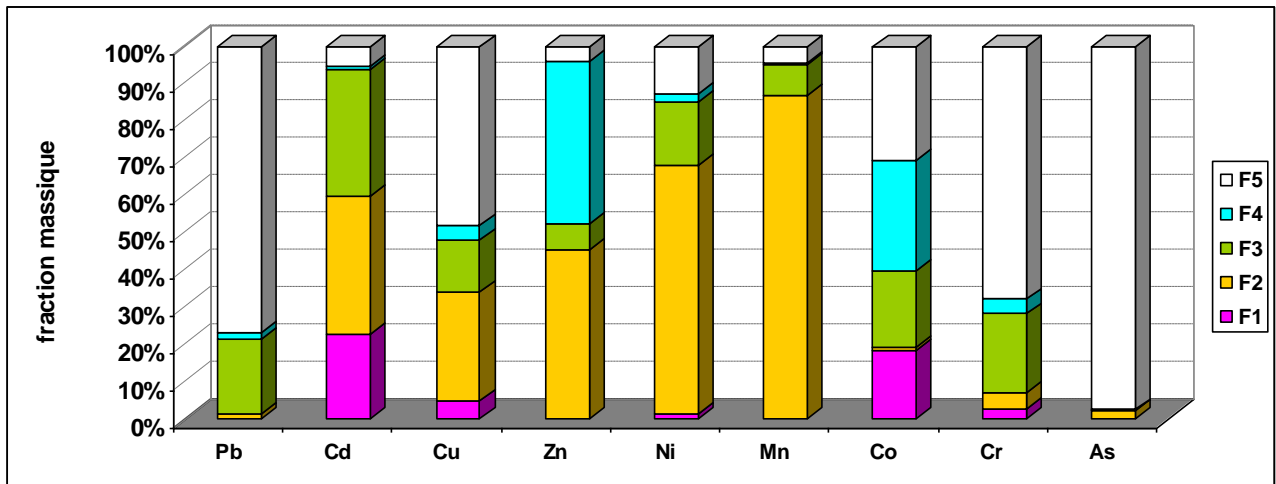
**Figure III-41:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments traces métalliques en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en surface de l'année 2006.



(F)



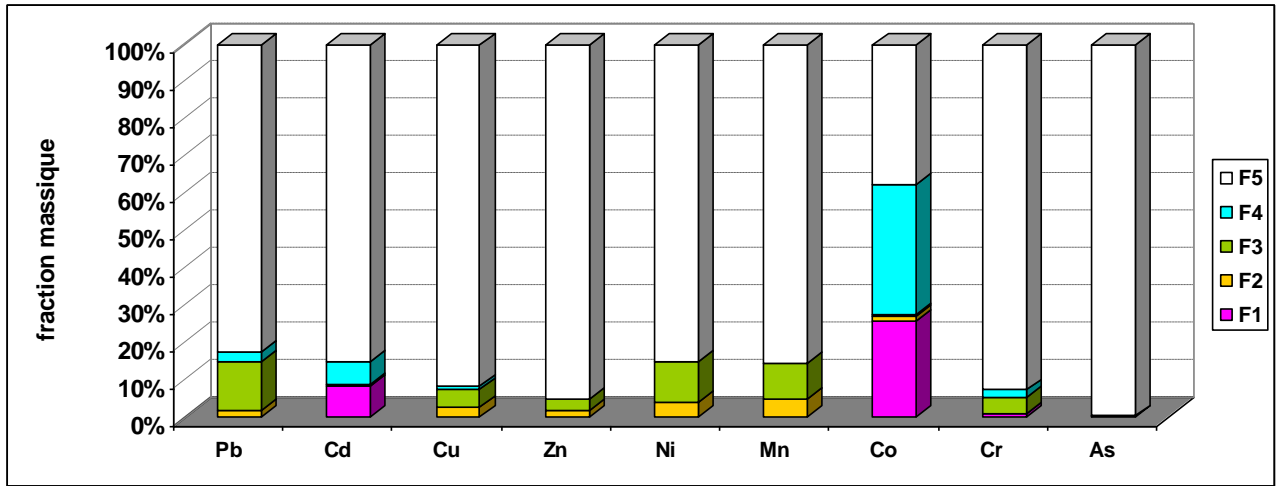
(K)



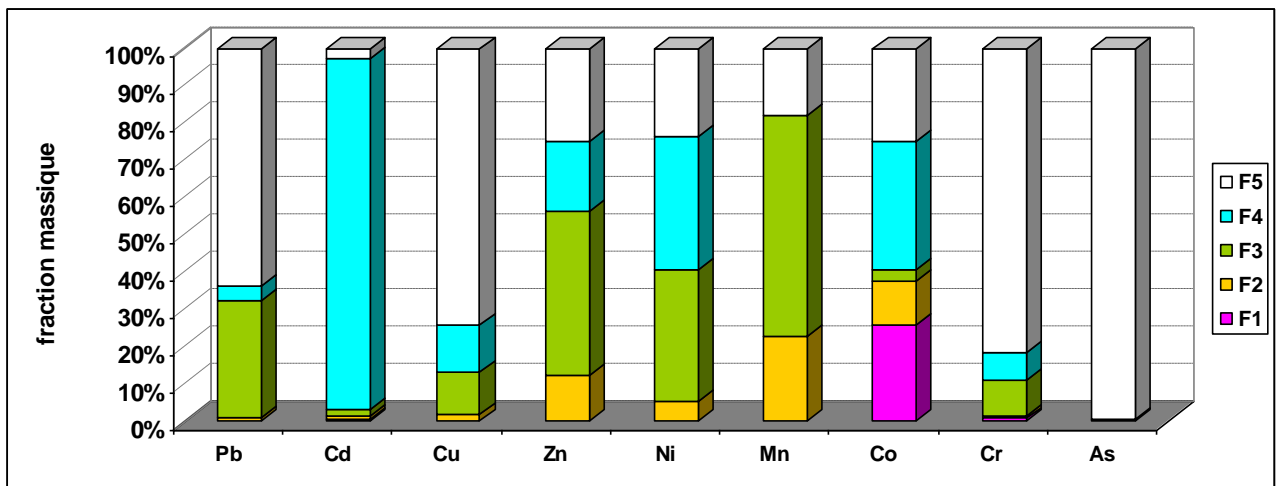
(R)

Figure III-42: Histogrammes illustrant la répartition des éléments traces métalliques en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en surface de l'année 2007.

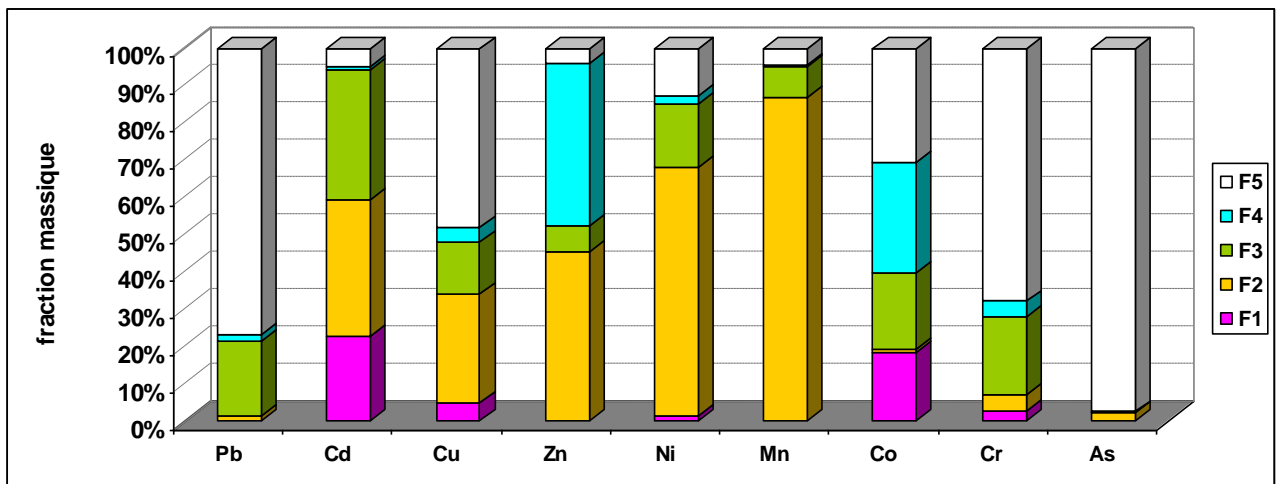




(F)

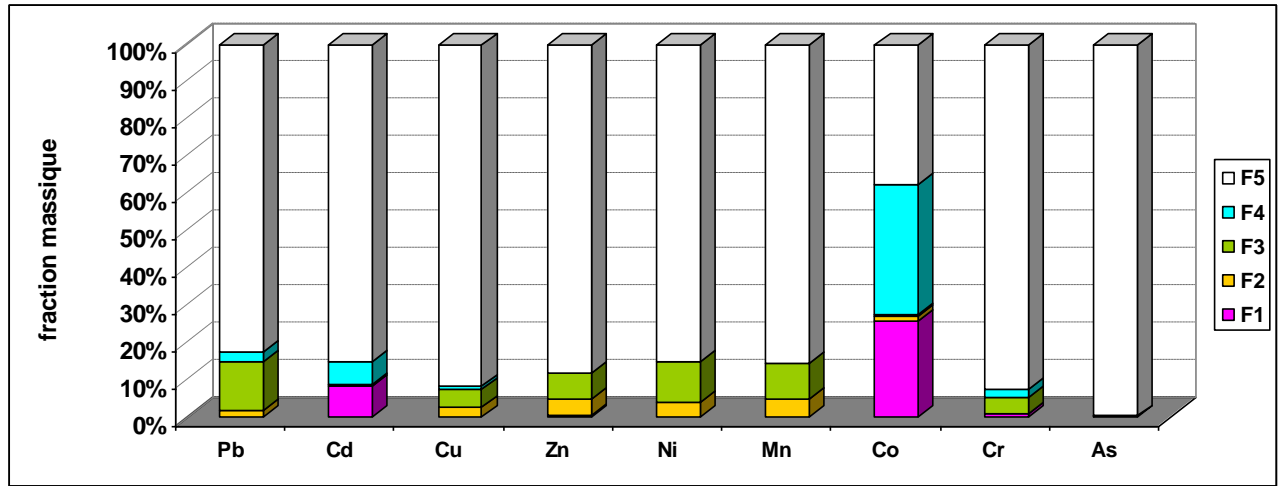


(K)

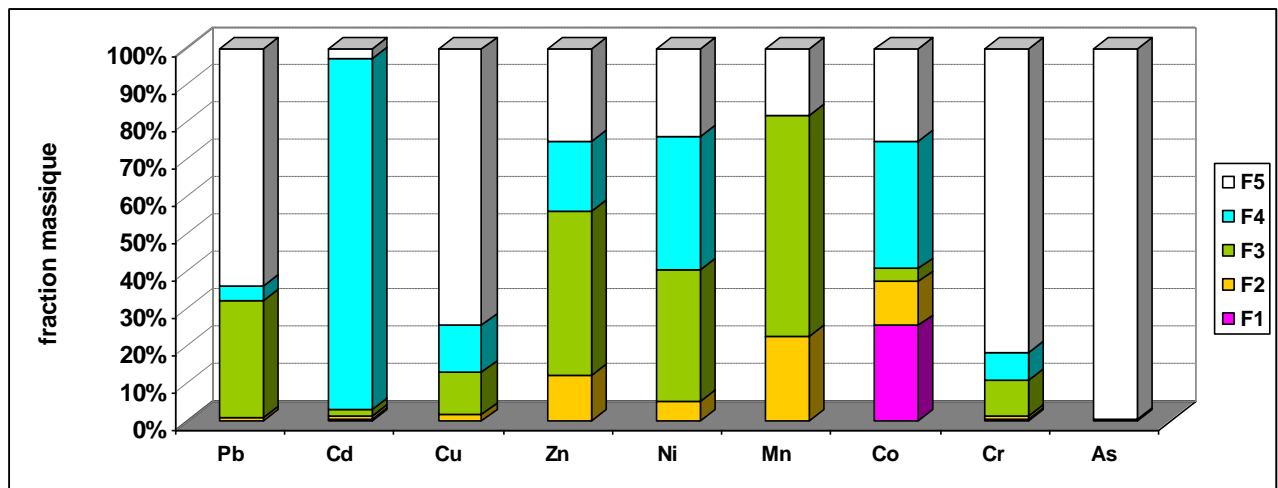


(R)

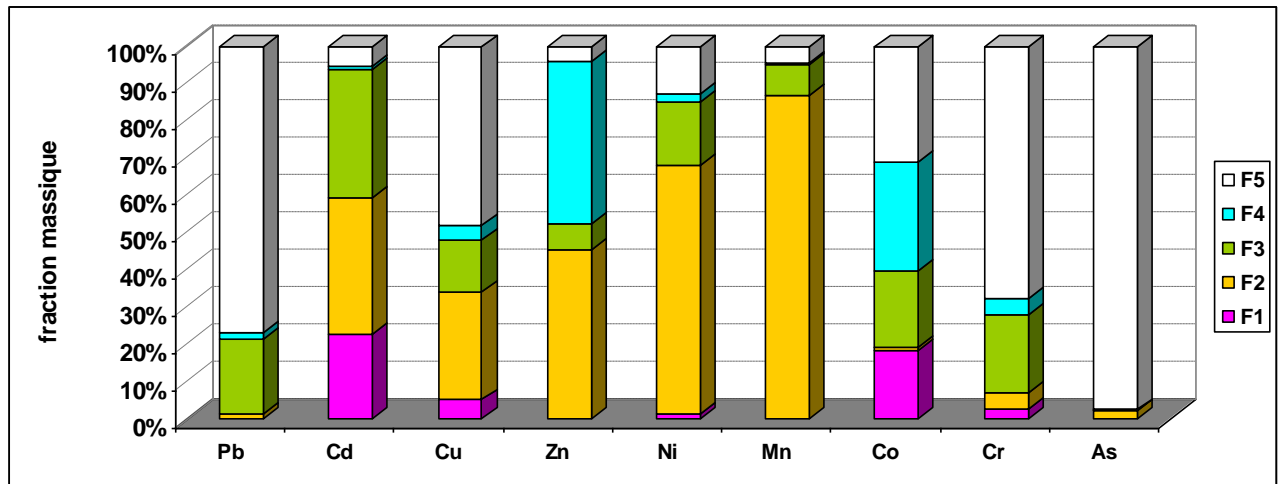
**Figure III-43:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments traces métalliques en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en surface de l'année 2008.



(F)

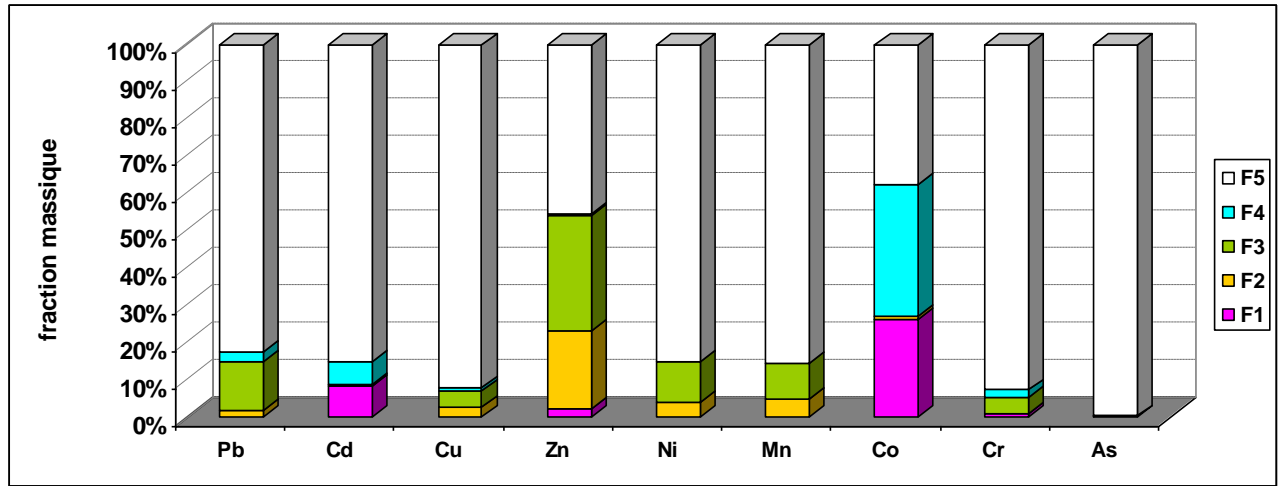


(K)

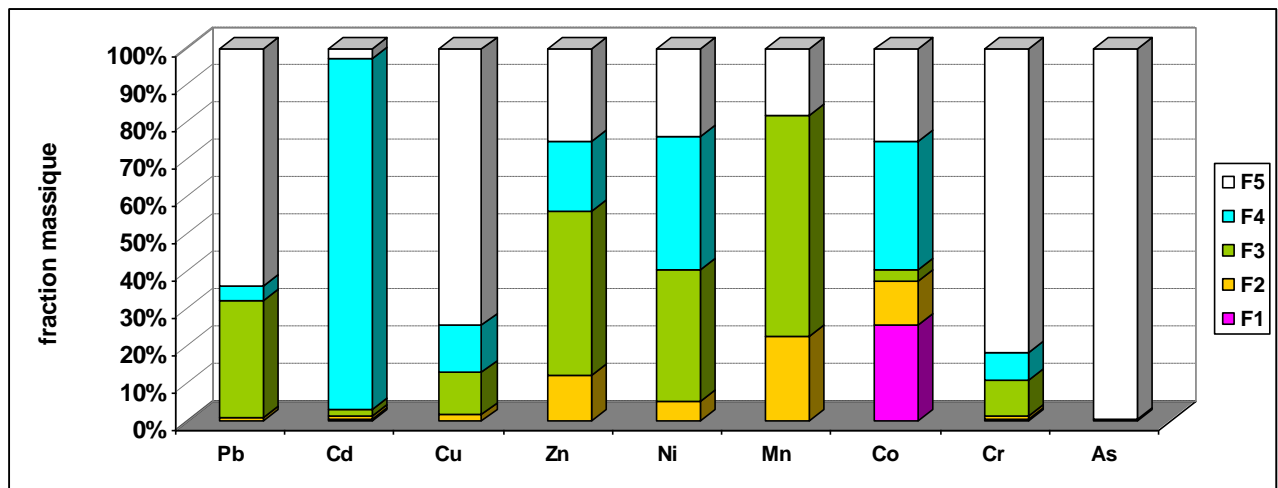


(R)

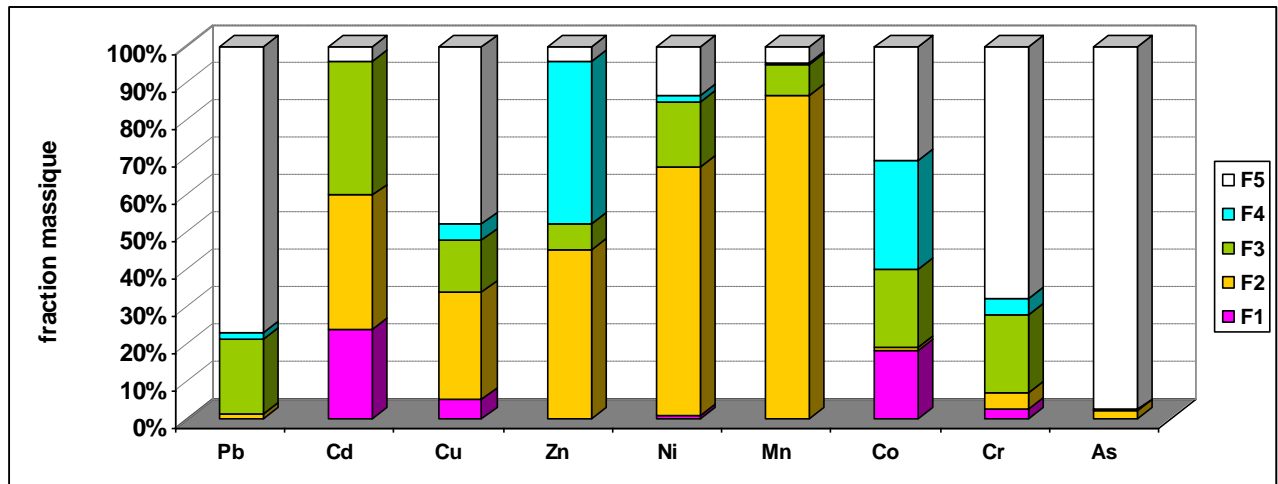
**Figure III-44:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments traces métalliques en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en surface de l'année 2009.



(F)

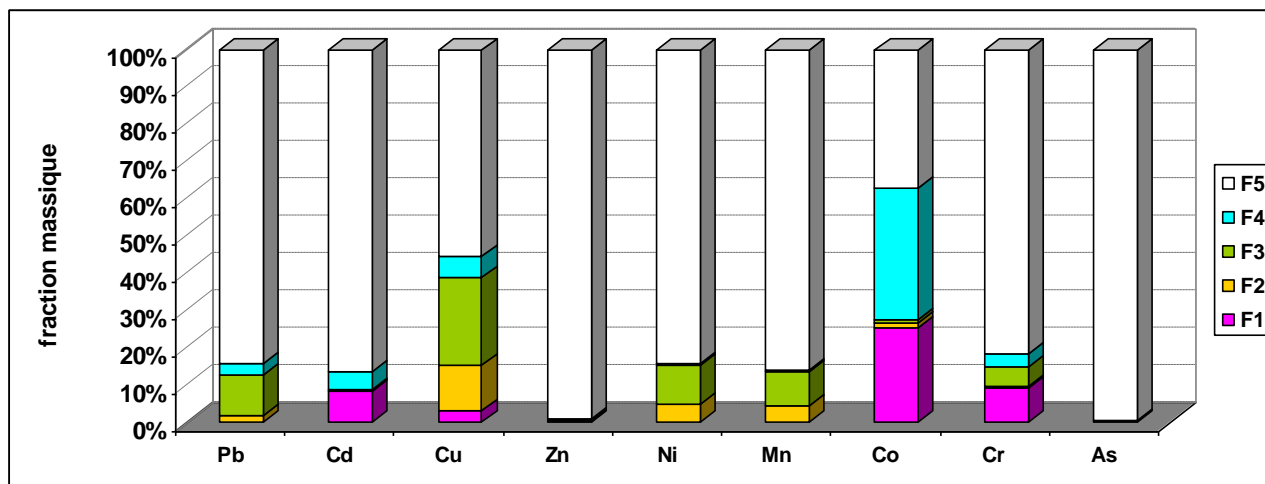


(K)

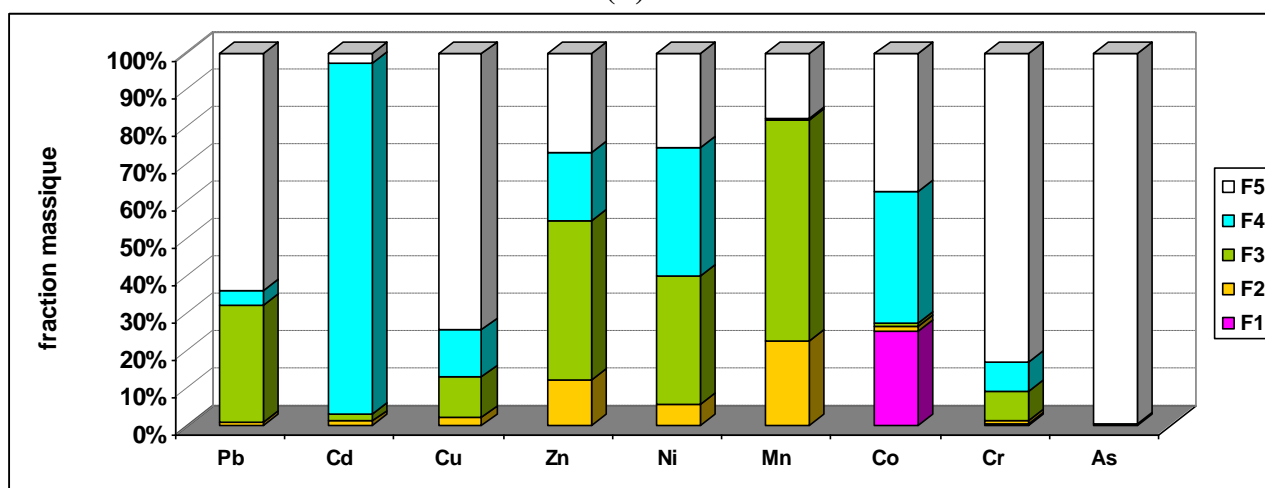


(R)

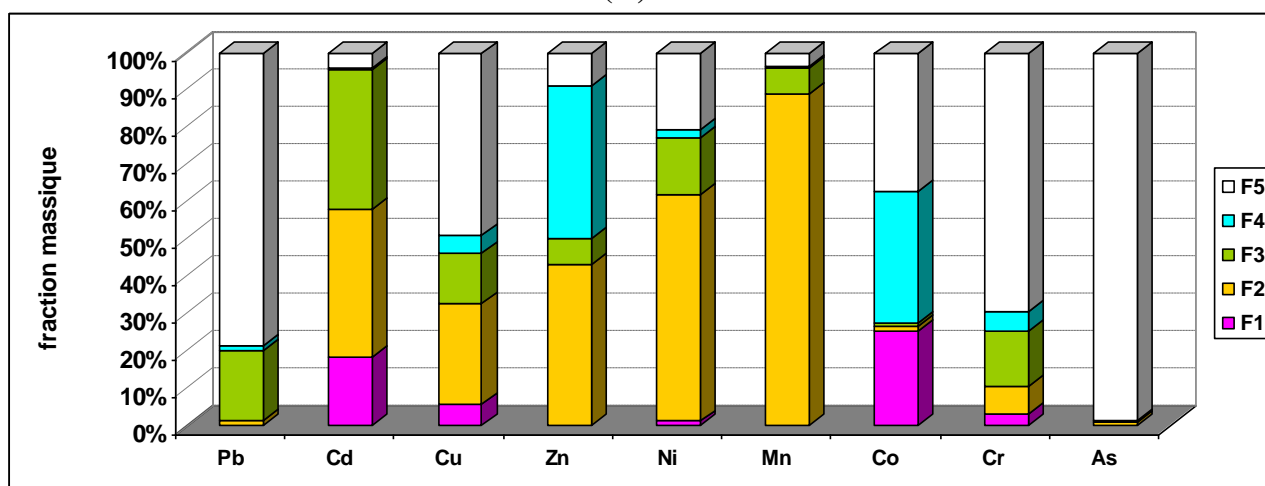
Figure III-45: Histogrammes illustrant la répartition des éléments traces métalliques en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en surface de l'année 2010.



(F)

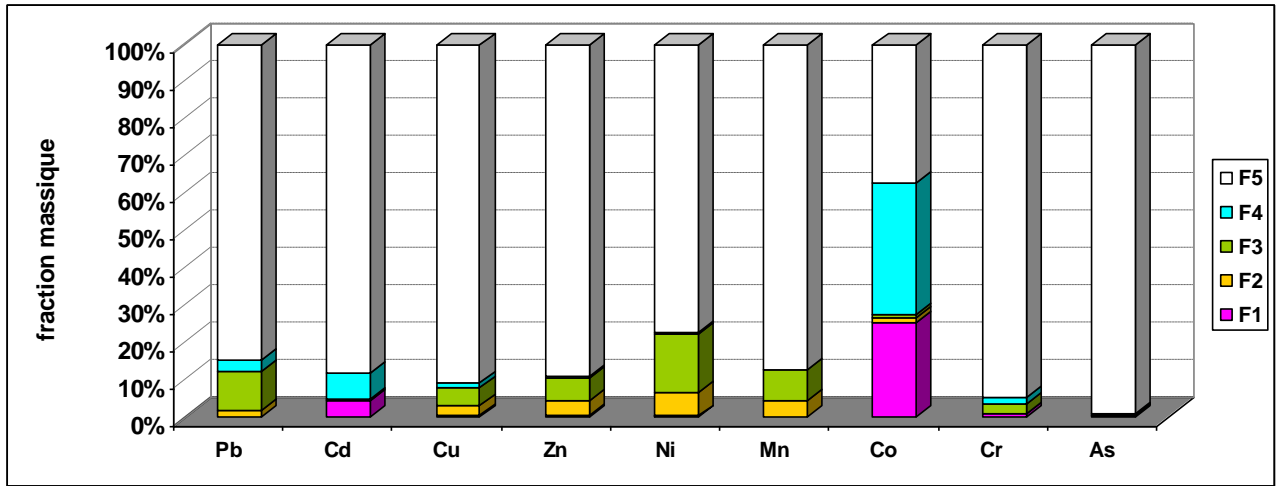


(K)

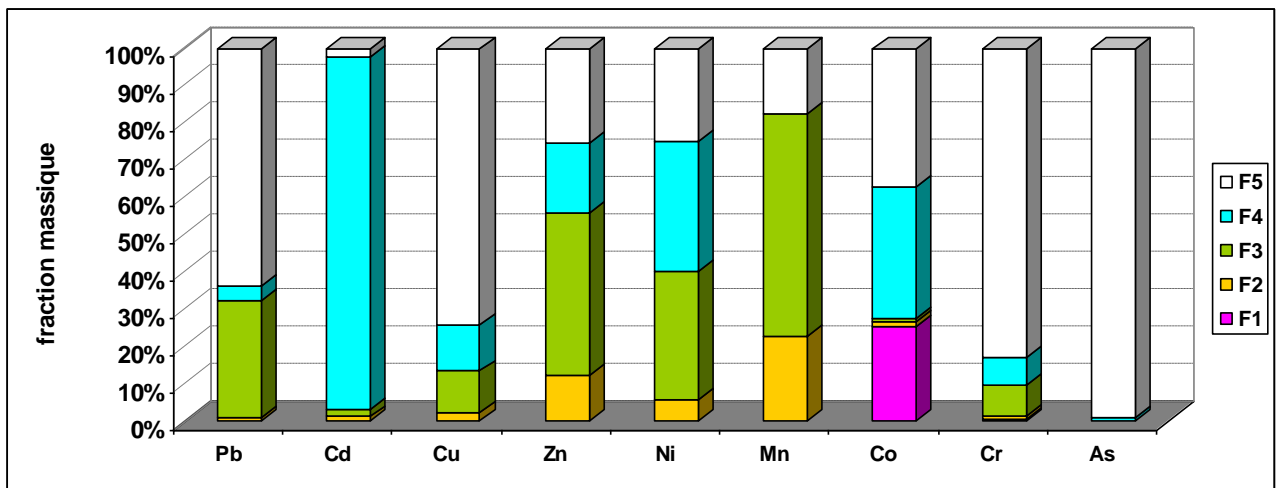


(R)

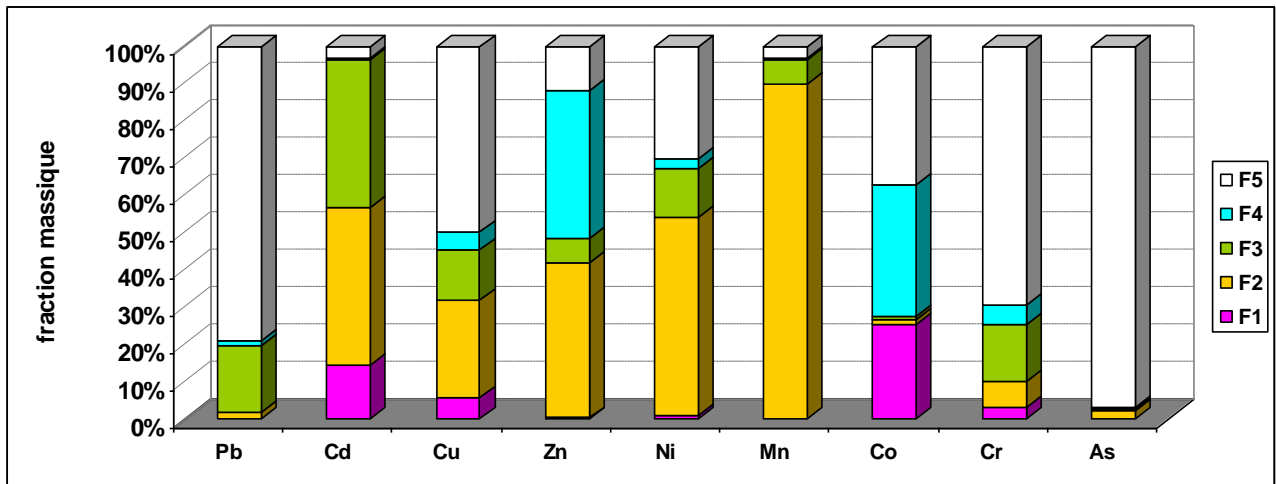
**Figure III-46:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments traces métalliques en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur de l'année 2006.



(F)

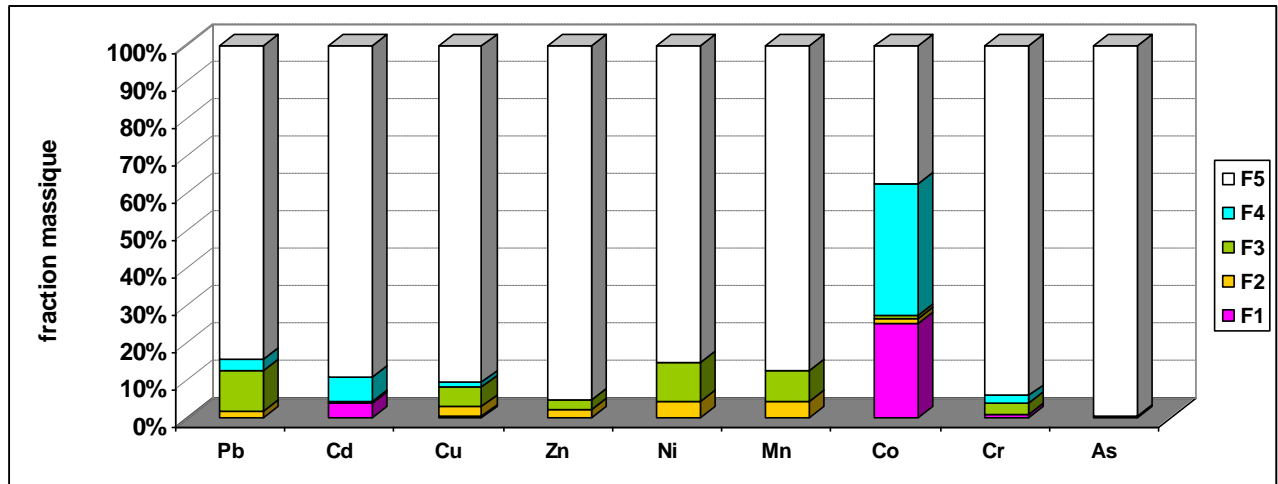


(K)

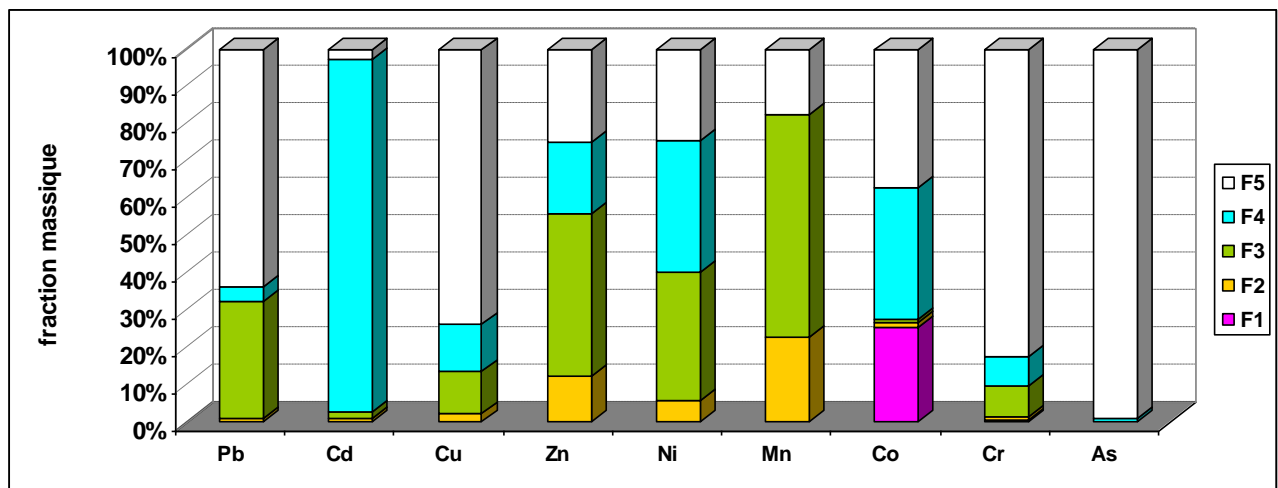


(R)

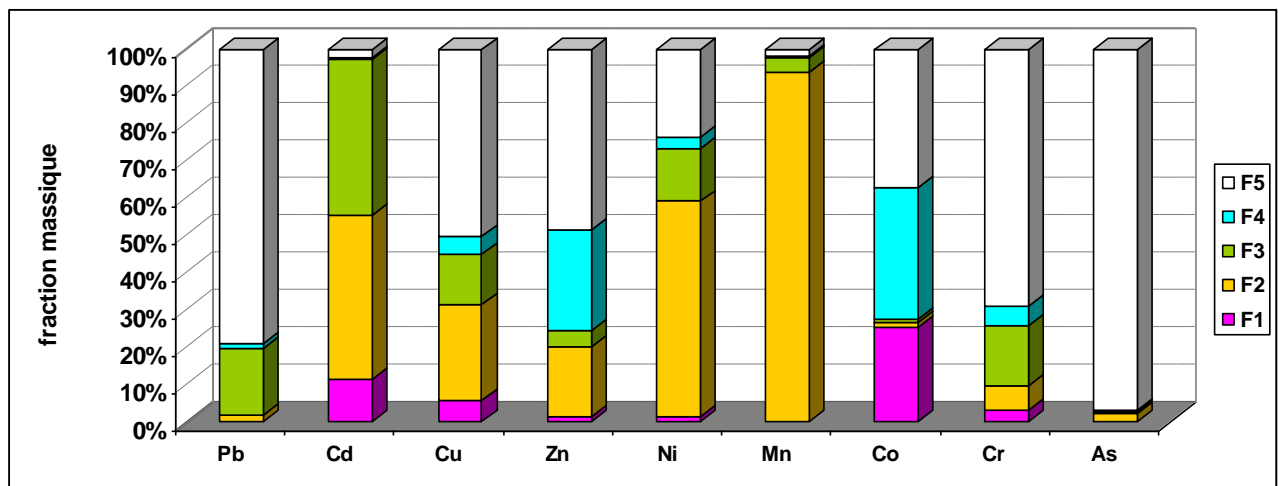
Figure III-47: Histogrammes illustrant la répartition des éléments traces métalliques en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur de l'année 2007.



(F)

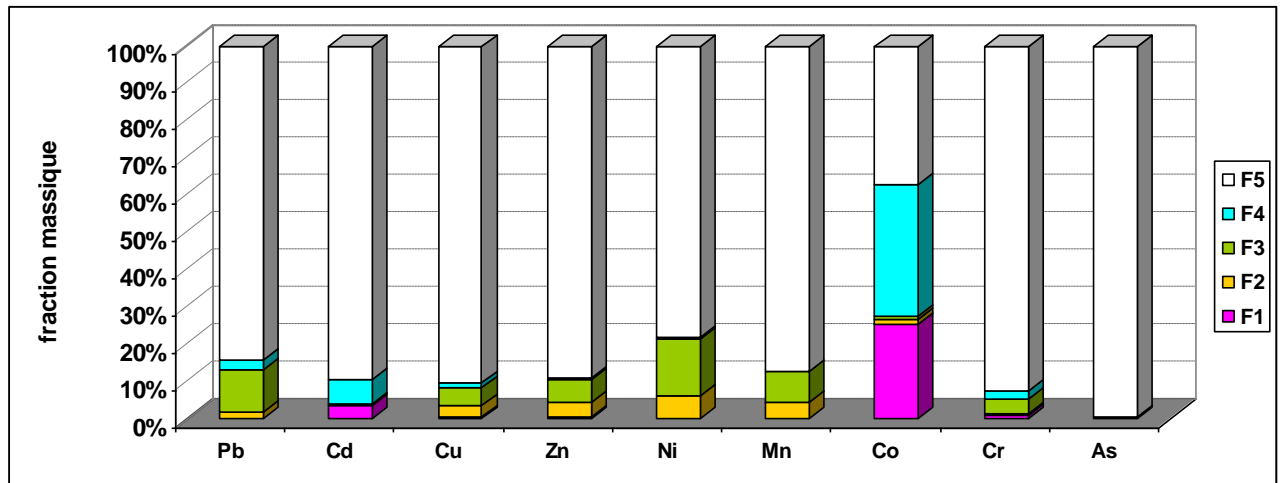


(K)

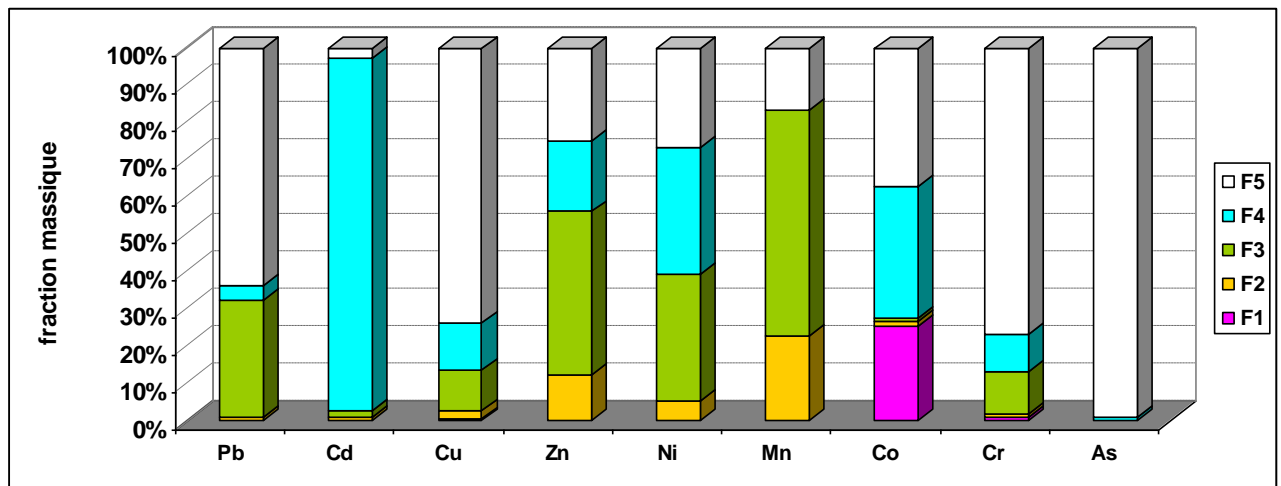


(R)

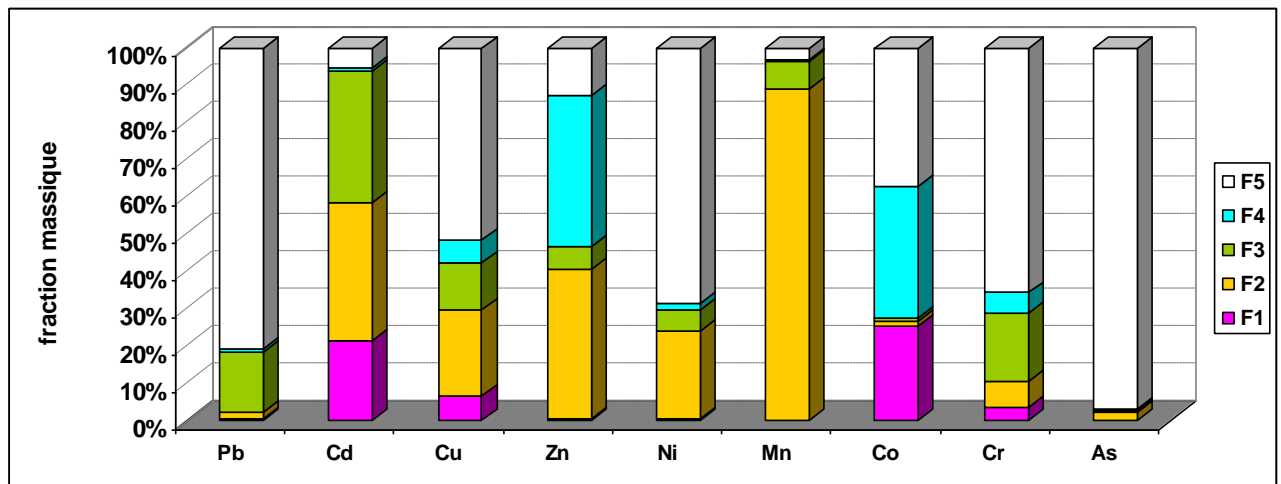
**Figure III-48:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments traces métalliques en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur de l'année 2008.



(F)

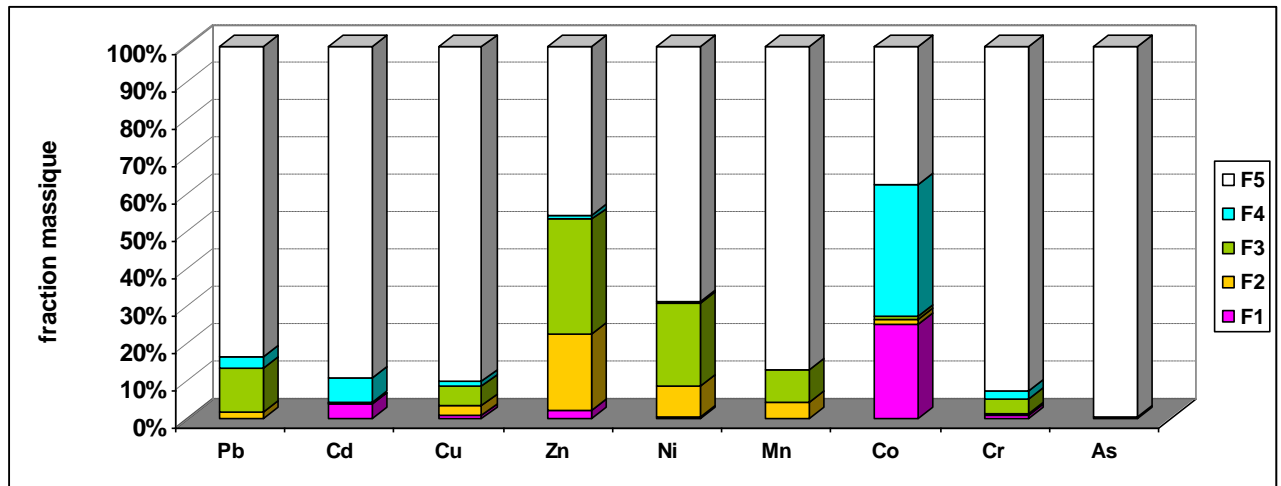


(K)

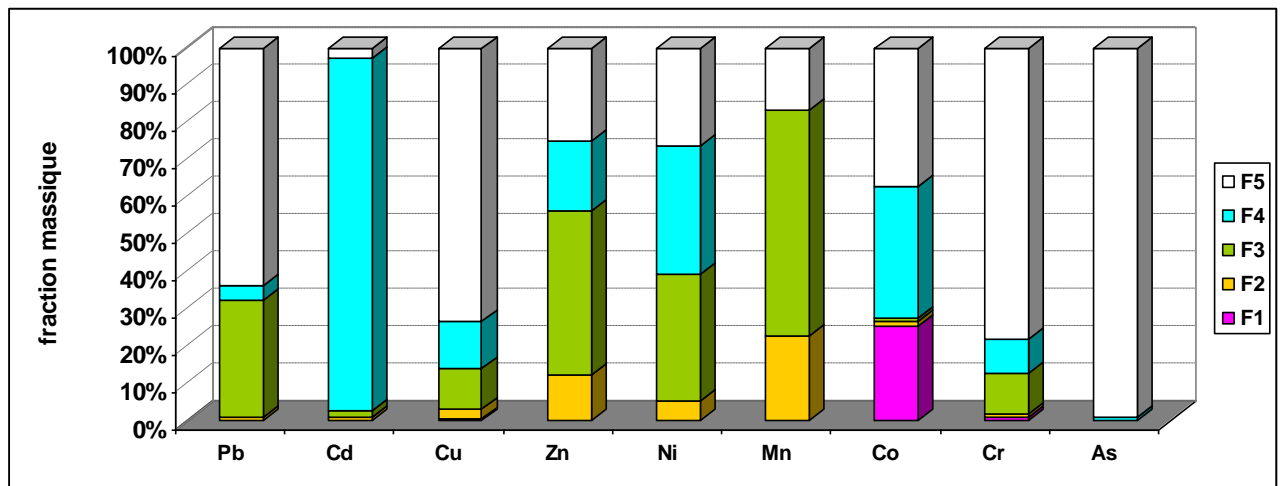


(R)

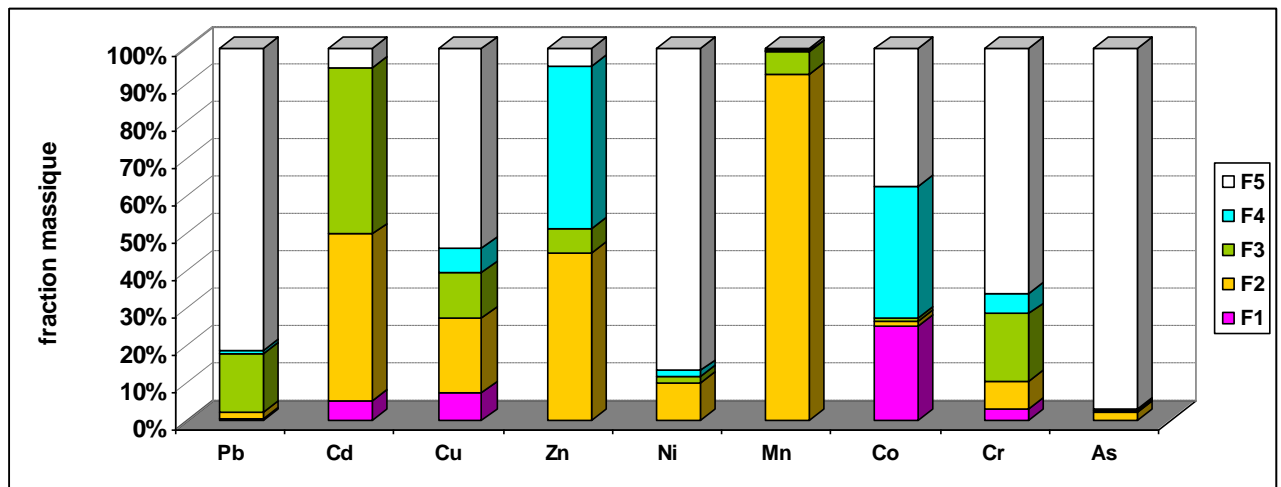
**Figure III-49:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments traces métalliques en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur de l'année 2009.



(F)



(K)



(R)

**Figure III-50:** Histogrammes illustrant la répartition des éléments traces métalliques en pourcentage par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases des sols étudiés en profondeur de l'année 2010.



D'après ces résultats, il ressort que:

#### ✓ Pour le calcium

Les résultats montrent que l'ion Ca est relativement majoritaire dans les phases réductible F3 et résiduelle F5 du sol F avec un pourcentage maximum de 32,64% et 46,86% respectivement. Tandis qu'il est essentiellement lié aux phases carbonates F2 et réductible F3 dans le sol K par un maximum de 32,06% et 42%.

Par contre, il est seulement concentré dans la phase carbonate F2 dans le sol R avec un pourcentage maximum de 71,73% durant les années 2006 et 2007 et dans la phase oxydable F4 avec un pourcentage maximum de 67,74% durant les années 2008 - 2010.

L'ion Ca est peu mobile dans le sol F et moyennement mobile dans les sols K et R.

Le classement de l'affinité de cet ion vis-à-vis aux constituants des sols sera comme suivant:

- pour le sol F:  $F5 > F3 > F2 > F1 > F4$ ;
- pour le sol K:  $F3 > F2 > F5 > F4 > F1$ ;
- pour le sol R:  $F4 < \text{ou} > F2 > F5 > F3 > F1$ .

Pour la distribution massique des éléments majeurs obtenue à partir de la couche profonde, elle est similaire que celle trouvée dans la couche superficielle dans toutes les phases (échangeable F1, carbonate F2, réductible F3, oxydable F4 et résiduelle F5) pour les trois sols durant les cinq années.

#### ✓ Pour le potassium

Les résultats montrent que le potassium est très concentré dans la phase résiduelle F5 dans les trois sols F, K et R, avec les masses relatives suivantes:

- 95,08%, 93,52% et 54,80% en 2006;
- 95,07%, 93,51% et 54,81% en 2007;
- 95,08%, 93,54% et 54,82% en 2008;
- 95,07%, 93,50% et 54,83% en 2009;
- 95,09%, 93,61% et 54,83% en 2010.

Cependant, il est faiblement présent dans les autres phases, sauf dans le sol R où il se trouve dans la phase oxydable F4 avec des masses relatives de 27,42% en 2006; de 27,43% en 2007; de 27,41% en 2008; de 27,47% en 2009 et de 27,41% en 2010.

On constate d'après ces valeurs que l'ion potassium est presque immobile dans les sols F et K et a une certaine mobilité dans le sol R.

L'affinité du potassium aux phases des sols est classée dans la séquence suivante :

- pour le sol F:  $F5 \gg \gg F1 > F3 > F2 > F4$ ;
- pour le sol K:  $F5 \gg \gg F1 > F3 < F2 > F4$ ;
- pour le sol R:  $F5 > F4 > F1 > F2 > F3$ .

#### ✓ Pour le magnésium

Les résultats de l'extraction séquentielle montrent que le Mg se trouve majoritairement dans la phase oxydable F4 du sol R durant les cinq années d'étude avec respectivement un pourcentage massique de :

- 80,84% en 2006;
- 80,85% en 2007;
- 80,87% en 2008;
- 80,87% en 2009;
- 80,83% en 2010.

Sa teneur dans la phase carbonate F2 durant les cinq années est de:

- 12,15% en 2006;
- 12,14% en 2007;
- 12,14% en 2008;
- 12,13% en 2009;
- 12,18% en 2010 alors qu'elle est presque négligeable dans les phases échangeable F1 et réductible F3.

En revanche dans les deux sols F et K, on observe que l'ion Mg est concentré dans la phase résiduelle F5 durant les cinq années avec respectivement un pourcentage massique de:

- 41,96% et 45,08% en 2006;
- 41,91% et 45,10% en 2007;
- 42,03% et 45,11% en 2008;
- 42,01% et 45,10% en 2009;
- 41,98% et 45,10% en 2010.

Suivi par un pourcentage moins dans les phases échangeable F1, carbonates F2 et réductible F3 avec respectivement un pourcentage massique maximum entre (21,52%; 10,25% et 21,70%) et (21,57%; 10,32% et 21,73%) durant les cinq années.

Ces résultats révèlent que le Mg a une mobilité moyenne dans les sols F, K et R.

La répartition du Mg dans les différentes phases et dans l'ordre suivant :

- pour le sol F:  $F5 > F3 > F1 > F2 > F4$ ;
- pour le sol K:  $F5 > F3 > F2 > F1 > F4$ ;
- pour le sol R:  $F4 >>> F2 >> F5 > F3 > F1$ .

#### ✓ Pour le sodium

Les résultats ont montré que le Na est très présent dans les deux phases, la phase résiduelle F5 et la phase carbonate F2 des deux sols F et K durant les cinq années d'étude avec respectivement un pourcentage massique de:

- (84,50% et 8,74%), (60,65% et 28,44%) en 2006;
- (84,50% et 8,74%), (60,65% et 28,44%) en 2007;
- (84,49% et 8,74%), (60,65% et 28,44%) en 2008;
- (84,51% et 8,73%), (60,65% et 28,43%) en 2009;
- (84,53% et 8,74%), (60,66% et 28,42%) en 2010.

Et il existe faiblement dans les trois phases restantes.

Pour le sol R, le Na est fortement associé aux phases carbonate F2 et oxydable F4 durant les cinq années d'étude avec respectivement un pourcentage massique de:

- (46,21% et 41,40%) en 2006;
- (46,20% et 41,40%) en 2007;
- (46,21% et 41,40%) en 2008;
- (46,21% et 41,40%) en 2009;
- (46,19% et 41,39%) en 2010.

Il est pratiquement absent dans les phases F1 et F3 (phase échangeable et réductible), alors qu'il est faiblement lié à la phase résiduelle F5 avec respectivement un pourcentage massique de:

- 8,45% en 2006;
- 8,45% en 2007;
- 8,45% en 2008;
- 8,44% en 2009;
- 8,43% en 2010.

La distribution de cet ion dans les différentes phases des sols est classée dans l'ordre décroissant suivant:

- pour le sol F:  $F5 \gg \gg F2 > F1 > F3 > F4$ ;
- pour le sol K:  $F5 \gg \gg F2 > F3 > F1 > F4$ ;
- pour le sol R:  $F2 > F4 > F5 > F1 > F3$ .

#### ✓ Pour le fer

Les résultats ont montré que le Fe est concentré totalement dans la phase résiduelle des trois sols F, K et R durant les cinq années d'étude avec respectivement un pourcentage massique de:

- (94,51%, 80,87% et 75, 88%), en 2006;
- (94,51%, 81,62% et 75,95%), en 2007;
- (94,44%, 81,64% et 75,38%), en 2008;
- (94,51%, 81,64% et 75,72%), en 2009;
- (94,50%, 81,56% et 76,78%), en 2010.

Alors qu'il est faiblement présent dans les phases réductible F3 et oxydable F4 des trois sols F, K et R durant les cinq années d'étude avec respectivement un pourcentage massique de:

- (5,31% et 0,08%), (18,07% et 0,99%) et (20,56% et 0,91%) en 2006;
- (5,31% et 0,08%), (18,07% et 0,05%) et (20,57% et 0,79%) en 2007;
- (5,38% et 0,08%), (18,22% et 0,06%) et (20,99% et 0,95%) en 2008;
- (5,32% et 0,07%), (18,22% et 0,07%) et (20,43% et 1,20%) en 2009;
- (5,33% et 0,07%), (18,27% et 0,10%) et (20,60% et 0,0%) en 2010.

Par contre il est pratiquement négligeable dans les deux premières fractions.

Contrairement à ce qu'on pouvait penser à priori, la fraction majoritaire est la fraction résiduelle et non pas la fraction représentant les éléments aux oxydes de fer et de manganèse (réductible). Ce résultat indique qu'un faible pourcentage de Fe se trouve sous forme d'oxyde ou d'hydroxyde de fer tel que la goethite, la ferrihydrite ou l'hématite. Quant à la présence du Fe dans la phase oxydable, elle peut être due à la complexation d'une partie des oxydes et hydroxydes de Fe avec la substance humique.<sup>38</sup> Elle peut également être due à la présence de Fe sous forme de sulfure tel que le  $FeS_2$  (pyrite) ou  $FeS$ .

Ces résultats montrent que le Fe est peu disponible ( $F1+F2+F3+F4 \ll \ll F5$ ) et donc peu mobile. L'affinité du Fe avec les constituants des sols est dans l'ordre suivant:

- pour le sol F:  $F5 \gg \gg F3 > F4 > F2 > F1$ ;
- pour le sol K:  $F5 \gg \gg F3 > F4 > F2 > F1$ ;
- pour le sol R:  $F5 \gg \gg F3 > F2 > F4 > F1$ .

Le total des teneurs en Fe contenues dans les différentes fractions (entre 12,43 et 14,62 g/kg, sol F); (entre 9,90 à 23,29 g/kg, sol K) et (entre 0,83 à 3,30 g/kg, sol R) sont en dessous des limites définies dans le tableau I-7. Ces valeurs ne causent aucun risque pour les plantes et l'environnement.

Par ailleurs, d'après les résultats donnés dans les tableaux (III-46 à III-55), il ressort que:

#### ✓ Pour le plomb

L'analyse des résultats montre que dans la profondeur 0-20cm des trois sols F, K et R, le Pb est fortement présent dans la phase résiduelle F5 et la phase réductible F3 avec respectivement un pourcentage massique de:

- (98,44% et 1,15%), (63,61% et 31,28%) et (76,92% et 19,98%) en 2006;
- (82,28% et 13,07%), (63,61% et 31,28%) et (76,89% et 19,99%) en 2007;
- (82,30% et 13,07%), (63,61% et 31,28%) et (76,85% et 19,99%) en 2008;
- (82,26% et 13,09%), (63,61% et 31,28%) et (76,93% et 19,97%) en 2009;
- (82,30% et 13,07%), (63,60% et 31,28%) et (76,96%, 20,00%) en 2010.

L'affinité du Pb à la phase résiduelle et à la phase réductible a été démontrée par Oste et al,<sup>99</sup> ainsi que par McKenzie et al,<sup>59</sup> dans des sols et des sédiments.

Dans la profondeur 20-40cm, le Pb est toujours concentré dans la phase résiduelle F5 durant les années d'étude.

Le Pb est donc plus stable et peu mobile dans les trois sols.

L'affinité du Pb aux différents constituants des trois sols est classée dans l'ordre décroissant:

- F5 > F3 > F4 > F2 > F1.

Le total des teneurs moyennes en Pb contenues dans les différentes fractions, varie pour:

- le sol F entre (27,320 à 356,834) mg/kg en surface (0-20) cm et de (23,812 à 50,685) mg/kg en profondeur (20-40) cm.
- le sol K entre (222,004 à 301,740) mg/kg en surface et de (218,440 à 298,140) mg/kg en profondeur.
- Le sol R entre (11,500 à 28,980) mg/kg en surface et de (8,020 à 25,470) mg/kg en profondeur.

Seules les valeurs en Pb dans le sol K dépassent les normes définies dans le tableau I-7, donc ce sol est contaminé par le Pb.

#### ✓ Pour le cadmium

Les résultats de l'extraction séquentielle montrent qu'en surface du sol F, le Cd est présent majoritairement dans la phase résiduelle F5 par un rapport massique relative de 84,93% en 2006; de 85,02% en 2007; de 84,93% en 2008 ; de 84,91% en 2009 et de 85,00% en 2010. Cela signifie que la majorité du Cd est inclus dans les silicates d'alumine, ce résultat a été expliqué par Andersen et al, <sup>38</sup> ils rapportent que le Cd possède une grande affinité pour les argiles à cause de son rayon atomique qui est similaire à celui du potassium habituellement associé aux argiles. Par contre dans le sol K, nous remarquons que le Cd est majoritairement associé à la matière organique, phase oxydable F4 avec un pourcentage massique de 93,64% en 2006; de 93,65% en 2007; de 93,65% en 2008; de 93,64% en 2009 et de 93,63% en 2010. La présence dominante du Cd dans cette fraction peut le rendre mobile. Quant au sol R, le Cd est équitablement réparti entre la phase carbonate F2 et la phase réductible F3 avec un pourcentage massique de 36,61% et 34,32% en 2006; de 36,63% et 34,32% en 2007; de 36,68% et 34,51% en 2008; de 36,43% et 34,50% en 2009 et de 36,00% et 36,00% en 2010.

En profondeur pour les trois sols, le Cd présente la même répartition que celle trouvée dans la couche superficielle des sols.

Le Cd est potentiellement mobilisable avec une proportion relargable importante pour les sols R et K, car elle est majoritairement non associée à la phase résiduelle F5 ( $F1+F2+F3+F4 > F5$ ).

L'affinité du Cd vis-à-vis des constituants des cinq phases suit l'ordre suivant:

- pour le sol F:  $F5 > F1 > F4 > F3 > F2$ ;
- pour le sol K:  $F4 > F5 > F3 > F2 > F1$ ;
- pour le sol R:  $F2 > F3 > F1 > F5 > F4$ .

Le total des teneurs moyennes contenues dans les différentes fractions en Cd dans ces sols (en surface entre 10,600 et 12,211 mg/kg, sol F; entre 62,500 et 161,540 mg/kg, sol K et entre 0,250 et 8,739 mg/kg, sol R; en profondeur entre 6,061 et 11,080 mg/kg, sol F; 62,044 et 160,100 mg/kg, sol K et entre 0,180 et 8,049 mg/kg, sol R) dépasse largement les normes rapportées dans le tableau I-7, donc ces sols sont considérés contaminés par le Cd, et ceci présente un risque et un réel danger pour l'environnement.

#### ✓ Pour le cuivre

Les résultats de l'extraction séquentielle montrent qu'en surface dans les deux sols F et K, le Cu se trouve majoritairement dans la phase résiduelle F5, avec un pourcentage massique de 91,71% et 74,29% en 2006; de 91,75% et 74,29% en 2007; de 91,72% et 74,28% en 2008; de 91,72% et 74,28% en 2009 et de 91,76% et 74,27% en 2010. Tandis qu'en surface dans le sol R il se trouve lié préférentiellement à la phase résiduelle F5 et la phase acido-soluble (carbonate) F2 par un pourcentage massique de 47,89% et 28,98% en 2006; de 47,88% et 29,04% en 2007; de 47,90% et 28,96% en 2008; de 47,89% et 28,98% en 2009 et de 47,81% et 28,95% en 2010.

En profondeur pour les trois sols, le Cu présente la même distribution que celle trouvée dans la couche superficielle des sols.

Il ressort de ces résultats que la répartition du Cu au niveau des différents compartiments des sols, est classée dans la séquence suivante:

- pour le sol F:  $F5 \gg F3 > F2 > F4 > F1$ ;
- pour le sol K:  $F5 \gg F4 > F3 > F2 > F1$ ;
- pour le sol R:  $F5 > F2 > F3 > F1 > F4$ .

Cette affinité rend le Cu potentiellement immobile ( $F5 > F1 + F2 + F3 + F4$ ).

Le total des teneurs en Cu contenues dans les différentes fractions des sols (sol F: 32,047 à 59,270 mg/kg en surface et 12,000 à 61,270 mg/kg en profondeur; sol K: 27,363 et 105,380 mg/kg en surface et 29,363 et 107,380 mg/kg en profondeur et sol R: 2,280 et 17,980 mg/kg en surface et 4,280 à 19,980 mg/kg en profondeur) est inférieur aux normes de références ramenées dans le tableau I-7, donc le Cu ne présente aucun danger.

#### ✓ Pour le zinc

Le synthèse des résultats de l'extraction séquentielle montre qu'en surface dans le sol F, le Zn est très concentré dans la phase résiduelle F5 avec une fraction massique supérieure à 87,91% durant les années 2006-2009, en revanche en 2010, la distribution est différente, le Zn se trouve réparti dans les phases résiduelle F5, réductible F3 et carbonate F2 avec respectivement un pourcentage massique de 45,27%, de 30,98% et de 20,66%.

Quant au sol K, le Zn est présent essentiellement dans les phases réductible F3, résiduelle F5 et oxydable F4 avec une fraction massique de 43,84%, 24,81% et 18,87% en 2006; de 43,84%, 24,80% et 18,88% en 2007; de 43,84%, 24,80% et 18,88% en 2008; de 43,84%, 24,81% et 18,88% en 2009 et de 43,84%, 24,81% et 18,86% en 2010.

Pour le sol R, le Zn est reparti majoritairement entre les phases carbonate F2 et oxydable F4 avec un pourcentage massique de 45,22% et 43,84% en 2006; de 45,22% et 43,62% en 2007; de 45,21% et 43,61% en 2008; de 45,20% et 43,60% en 2009 et de 45,22% et 43,62% en 2010.

En profondeur pour les trois sols, le Zn présente la même distribution que celle trouvée dans la couche superficielle des sols.

Ainsi, la répartition sur les différentes phases est classée dans l'ordre décroissant:

- pour le sol F:  $F5 > F3 > F2 > F1 > F4$ ;
- pour le sol K:  $F3 > F5 > F4 > F2 > F1$ ;
- pour le sol R:  $F2 > F4 > F3 > F5 > F1$ .

Suite à cela, on remarque que le Zn est stable dans le sol F alors qu'il est mobile dans les sols K et R.

Le total des teneurs moyennes en Zn contenues dans les différentes fractions des sols (sol F: 743,823 à 6186,597 mg/kg en surface et 3150,160 à 6954,344 mg/kg en profondeur; sol K: 1257,466 à 4423,22 mg/kg en surface et 1264,194 à 7518,652 mg/kg en profondeur; sol R: 33,077 à 3986,050 mg/kg en surface et 91,75 à 4044,72 mg/kg en profondeur) dépasse largement les normes définies dans le tableau I-7. On conclut que ces sols sont très contaminés par le Zn.

#### ✓ Pour le nickel

Les résultats de l'extraction séquentielle montrent qu'en surface du sol F, le Ni possède une grande affinité vers la phase résiduelle F5 et une affinité moyenne à la phase réductible F3 avec un pourcentage massique respectivement de :

- (84,92% et 10,83%) en 2006;
- (84,92% et 10,82%) en 2007;
- (84,93% et 10,83%) en 2008;
- (84,93% et 10,83%) en 2009;
- (84,93% et 10,83%) en 2010.

Quant au sol K, le Ni est également majoritairement lié à la phase oxydable F4, à la phase réductible F3 et à la phase résiduelle F5 respectivement par un maximum de 35,54%, de 35,19% et de 23,72%.

Cependant dans le sol R, le Ni a un comportement différent, il se trouve lié à la phase carbonate F2 avec un rapport massique de 66,66% en 2006; de 66,70% en 2007; de 66,59% en 2008; de 66,59% en 2009 et de 66,67% en 2010. Et il est associé à la phase réductible F3 et à la phase résiduelle F5 avec rapport massique maximal de 17,17% et de 13,13% respectivement.



En profondeur on a observé que la répartition du Ni vis-à-vis des constituants (phases) des sols est pratiquement semblable à celle de la surface, sauf que les teneurs détectées sont légèrement supérieures.

Le classement de présence du Ni dans les différentes fractions est enchaîné dans l'ordre décroissant suivant:

- pour le sol F:  $F5 > F3 > F2 > F1 > F4$ ;
- pour le sol K:  $F4 > F5 > F3 > F2 > F1$ ;
- pour le sol R:  $F2 > F3 > F5 > F4 > F1$ .

Ces résultats montrent que dans le sol F, le Ni est immobile du fait qu'il est quasiment associé à la phase résiduelle. Par contre dans les deux sols K et R, le Ni révèle un potentiel de mobilisation et une disponibilité considérable aux végétaux.

Le total des teneurs moyennes en Ni contenues dans les différentes fractions des sols (sol F: 30,367 à 124,412 mg/kg en surface et 32,700 à 88,730 mg/kg en profondeur; sol K: 133,800 à 262,686 mg/kg en surface et 137,346 à 272,220 mg/kg en profondeur; sol R: 0,990 à 29,153 mg/kg en surface et 10,391 à 32,710 mg/kg en profondeur) dépasse les normes données dans le tableau I-7 pour le sol K et pour le sol F en 2009-2010, donc les sols K et F sont contaminés par le Ni.

#### ✓ Pour le manganèse

Les résultats de l'extraction séquentielle montrent qu'en surface du sol F, le Mn est majoritairement concentré dans la phase résiduelle F5 avec un pourcentage relatif stable dont le maximum est de 85,35%.

Quant au sol K, la distribution de Mn est majoritaire dans la phase oxyde de Fer-Mn F3 et dans la phase carbonate F2 avec respectivement un pourcentage massique de:

- (58,44% et 22,23%) en 2006;
- (59,21% et 22,52%) en 2007;
- (59,21% et 22,52%) en 2008;
- (59,21% et 22,52%) en 2009;
- (59,21% et 22,52%) en 2010.

Dans le sol R, le Mn est essentiellement présent dans la phase carbonate F2 avec un pourcentage massique de 86,49% en 2006; de 86,49% en 2007; de 86,48% en 2008; de 86,49% en 2009 et de 86,48% en 2010.

En profondeur on a enregistré la même distribution et répartition aux niveaux des différentes phases, avec des teneurs détectées légèrement inférieures.

L'affinité du Mn vers les différentes phases est structurée par la séquence suivante:

- pour le sol F:  $F5 \gg F3 > F2 > F4 > F1$ ;
- pour le sol K:  $F3 > F2 > F5 > F1 > F4$ ;
- pour le sol R:  $F2 \gg F3 > F5 > F4 > F1$ .

Ces valeurs nous informent que le Mn est stable dans le sol F, et a un potentiel important de mobilité dans les sols K et R.

Le total des teneurs moyennes en Mn contenues dans les différentes fractions des sols (en surface: sol F: entre 681,190 et 774,620 mg/kg; sol K: entre 371,617 et 897,570 mg/kg et sol R: 69,763 et 564,104 mg/kg et en profondeur: sol F: entre 634,760 et 750,020 mg/kg; sol K: 346,98 et 865,20 mg/kg et sol R: entre 60,360 et 543,550 mg/kg) dépasse les normes rapportés dans le tableau I-7. Par la suite, on remarque que le Mn cause une pollution et une contamination à ces sols.

#### ✓ Pour le cobalt

Les résultats d'extraction séquentielle trouvés en surface du sol F montrent que le Co est fortement lié à la phase résiduelle F5, à la phase oxydable F4 et à la phase réductible F3 respectivement avec un rapport massique de:

- (37,66%, 35,06% et 25,97%) en 2006;
- (37,55%, 34,93% et 26,20%) en 2007;
- (37,50%, 35,07% et 26,04%) en 2008;
- (37,61%, 34,99% et 25,95 %) en 2009;
- (37,65%, 35,06% et 26,12%) en 2010.

Quant au sol K, le Co est très localisée dans la phase oxydable F4, dans la phase échangeable F1 et dans la phase résiduelle F5 avec un pourcentage massique qui varie de:

- (34,43%, 25,82% et 25,00%) en 2006;
- (34,17%, 25,83% et 25,00%) en 2007;
- (34,17%, 25,83% et 25,00%) en 2008;
- (34,35%, 25,65% et 24,78%) en 2009;
- (34,29%, 25,80% et 24,89%) en 2010.

Par contre, dans le sol R le Co est majoritaire dans la phase résiduelle F5, dans la phase oxydable F4, dans la phase oxyde de Fe/Mn F3 et dans la phase échangeable F1, par un pourcentage massique maximum de 30,87%, de 29,30%, de 20,94% et de 18,43% respectivement.

En profondeur la répartition est similaire à celle trouvée en surface.

L'affinité du Co vers les différentes phases des sols est classée dans l'ordre suivant:

- pour le sol F:  $F5 > F4 > F1 > F2 > F3$ ;
- pour le sol K:  $F4 > F1 > F5 > F2 > F3$ ;
- pour le sol R:  $F5 > F4 > F3 > F1 > F2$ .

Le total des teneurs moyennes en Co contenues dans l'ensemble des fractions des sol (en surface: sol F: entre 2,290 et 4,250 mg/kg; sol K: entre 2,300 et 6,590 mg/kg et sol R: entre 2,730 et 6,240 mg/kg et en profondeur: sol F: entre 2,450 à 2,463 mg/kg, sol K: entre 2,442 et 2,460 mg/kg et sol R: entre 2,445 et 2,453 mg/kg) est totalement inférieur aux normes de référence citées dans le tableau I-7. Donc le Co ne présente aucun danger pour l'environnement.

#### ✓ Pour le chrome

La lecture des résultats de l'extraction séquentielle a révélé qu'en surface des deux sols F et K, le Cr est totalement incorporé dans la phase résiduelle F5 respectivement avec un pourcentage massique de:

- (92,62% et 81,61%) en 2006;
- (92,62% et 81,60%) en 2007;
- (92,62% et 81,60%) en 2008;
- (92,61% et 81,61%) en 2009;
- (92,62% et 81,61%) en 2010.

Par contre dans le sol R, le Cr est plus lié à la phase résiduelle F5, et moyennement associé à la phase réductible F3 par un pourcentage massique de:

- (67,77% et 20,94%) en 2006;
- (67,84% et 20,90 %) en 2007;
- (67,83% et 20,90%) en 2008;
- (67,83% et 20,92%) en 2009;
- (67,82% et 20,93%) en 2010.

En profondeur, la répartition du Cr est semblable à celle trouvée en surface pour les trois sols.

Le classement d'affinité du Cr par ordre décroissant dans les phases des sols est comme suit:

- dans le sol F et K:  $F5 >> F3 > F4 > F1 > F2$ ;
- dans le sol R:  $F5 > F3 > F2 > F4 > F1$

Le total des teneurs moyenne en Cr trouvées dans les différents constituants des sols (en surface: sol F: entre 46,635 et 191,400 mg/kg; sol K: entre 80,380 et 191,400 mg/kg et sol R: entre 14,179 et 17,682 mg/kg et en profondeur: sol F: entre 3,640 et 155,000 mg/kg ; sol K: entre 73,987 et 130,650 mg/kg et sol R: entre 7,769 et 10,279 mg/kg) dépasse les normes données dans le tableau I-7. Donc, le Cr manifeste une menace pour l'environnement.

#### ✓ Pour le arsenic

Les résultats de l'extraction séquentielle montrent qu'en surface des sols F, K et R, l'As est majoritairement lié à la phase résiduelle F5 respectivement avec un pourcentage massique maximum de 99,58%, de 99,26% et de 97,41%. Cette répartition rend l'As, l'élément le plus potentiellement immobile.

L'échelle de classement d'existence de l'As dans les phases des sols est comme suit:

- pour le sol F: F5 > F3 > F4 > F2 > F1;
- pour le sol K: F5 > F4 > F3 > F2 > F1;
- pour le sol R: F5 > F2 > F4 > F1 > F3.

En profondeur, on a constaté la même affinité de l'As vers les différentes phases par des masses relativement supérieures que celle trouvée en surface.

Le total des teneurs moyennes enregistrées en As dans ces sols (en surface: sol F: entre 407,139 et 634,787 mg/kg; sol K: entre 674,937 et 1728,947 mg/kg et sol R: entre 207,001 et 347,660 mg/kg et en profondeur: sol F: entre 422,348 et 841,204 mg/kg; sol K: entre 690,071 et 2154,335 mg/kg et sol R: entre 222,180 et 772,860 mg/kg) dépasse très largement les normes définies dans le tableau I-7, donc ces sols sont très infectés et contaminés par l'As, par conséquent présente un danger réel pour les plantes et la santé humaine.

Ces résultats se concordent avec ceux de la littérature. <sup>81, 85,86</sup>

### III.1.4. EXTRACTION PAR L'EDTA, FRACTION MOBILISABLE

L'agent chélatant EDTA, ou acétylène diamine tétra acétique, est communément utilisé en agronomie, pour étudier la mobilité des métaux dans les sols.<sup>100</sup>

Les extractions chimiques avec ce réactif permettent de déterminer la fraction de métal biodisponible contenue dans un sol, c'est à dire la quantité de métal susceptible d'être absorbée par les plantes.

Ce réactif n'est pas spécifique d'une phase ou d'une forme des métaux lourds, néanmoins il donne des informations sur la mobilité et le mode de liaison des métaux dans le matériau. L'EDTA est un réactif complexant susceptible d'extraire les métaux échangeable, les métaux adsorbés, ainsi que les métaux associés aux matières organiques.<sup>100</sup>

Les résultats de l'extraction par l'EDTA sont donnés dans les tableaux (III-56 à III-65) et illustrés par les figures (III-51 à III-60). Et encore pour bien interpréter ces résultats, on a estimé le rapport de la fraction disponible par rapport au total des teneurs moyennes contenues dans les différentes phases des sols. Ces rapports sont reportés dans les tableaux (III-66 à III-67).

**Tableau III-56:** Teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments majeurs extraits par l'EDTA en profil des trois sols étudiés en 2006.

Echantillon	Sol F				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	7242 ± 33,96	354 ± 15,25	358,5 ± 14,16	5556 ± 25,01	37,80 ± 2,03
Sol 20-40cm	7074,94 ± 34,87	345,83 ± 14,90	350,23 ± 3,83	5427,83 ± 28,74	36,93 ± 1,99
Echantillon	Sol K				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	7176 ± 30,37	348 ± 14,99	353,1 ± 13,94	5598 ± 18,41	17,13 ± 0,92
Sol 20-40cm	7006,11 ± 31,13	339,76 ± 14,64	344,74 ± 13,61	5465,47 ± 18,20	16,72 ± 0,90
Echantillon	Sol R				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	7623 ± 41,69	171 ± 7,37	221,94 ± 8,76	5136 ± 17,02	37,80 ± 2,03
Sol 20-40cm	7412,36 ± 40,23	166,27 ± 7,16	215,81 ± 8,52	4994,08 ± 16,30	36,76 ± 1,98

**Tableau III-57:** Teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments majeurs extraits par l'EDTA en profil des trois sols étudiés en 2007.

Echantillon	Sol F				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	7430,30 ± 44,20	363,20 ± 15,65	367,82 ± 14,52	5700,46 ± 19,82	38,78 ± 2,09
Sol 20-40cm	7250,56 ± 39,43	354,42 ± 15,27	358,92 ± 14,17	5562,57 ± 15,23	37,85 ± 2,04
Echantillon	Sol K				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	7793,14 ± 42,94	377,93 ± 16,28	383,47 ± 15,14	6079,43 ± 22,44	18,60 ± 1,00
Sol 20-40cm	7606,38 ± 41,36	1568,78 ± 67,61	79,25 ± 3,13	1169,44 ± 18,94	4,08 ± 0,219
Echantillon	Sol R				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	6566,04 ± 37,19	318,42 ± 13,72	323,09 ± 12,76	5122,17 ± 17,56	15,67 ± 0,845
Sol 20-40cm	6779,06 ± 36,78	152,07 ± 6,55	197,37 ± 7,79	4567,39 ± 15,09	33,61 ± 1,811

**Tableau III-58:** Teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments majeurs extraits par l'EDTA en profil des trois sols étudiés en 2008.

Echantillon	Sol F				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	7083,11 ± 35,32	346,23 ± 14,92	350,63 ± 13,85	5434,10 ± 18,95	36,97 ± 1,99
Sol 20-40cm	6915,42 ± 30,19	338,04 ± 14,57	342,33 ± 13,52	5305,45 ± 17,67	36,09 ± 1,94
Echantillon	Sol K				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	8409,22 ± 47,46	407,81 ± 17,57	413,78 ± 16,34	6560,04 ± 21,44	20,07 ± 1,08
Sol 20-40cm	8166,12 ± 42,23	396,02 ± 17,06	401,82 ± 15,87	6370,39 ± 25,13	19,49 ± 1,050
Echantillon	Sol R				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	6651,00 ± 31,81	149,20 ± 6,43	193,64 ± 7,64	4481,11 ± 19,22	32,98 ± 1,77
Sol 20-40cm	6482,62 ± 28,65	145,42 ± 6,26	188,74 ± 7,45	4367,67 ± 15,44	32,15 ± 1,73

**Tableau III-59:** Teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments majeurs extraits par l'EDTA en profil des trois sols étudiés en 2009.

Echantillon	Sol F				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	7354,88 ± 40,10	359,52 ± 15,49	364,09 ± 14,38	5642,60 ± 187,89	38,39 ± 2,06
Sol 20-40cm	7107,73 ± 36,66	347,44 ± 14,97	351,85 ± 13,89	5452,99 ± 181,58	37,10 ± 1,99
Echantillon	Sol K				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	7896,34 ± 49,56	382,93 ± 16,50	388,54 ± 15,34	6159,93 ± 205,12	18,85 ± 1,01
Sol 20-40cm	7787,49 ± 42,63	377,65 ± 16,27	383,19 ± 15,13	6075,02 ± 202,29	18,59 ± 1,00
Echantillon	Sol R				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	7695,9 ± 41,65	172,64 ± 7,44	224,06 ± 10,85	5185,11 ± 17,66	38,16 ± 2,05
Sol 20-40cm	7571,77 ± 34,90	169,85 ± 9,32	220,45 ± 8,70	5101,48 ± 19,87	37,54 ± 2,02

**Tableau III-60:** Teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments majeurs extraits par l'EDTA en profil des trois sols étudiés en 2010.

Echantillon	Sol F				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	7199,50 ± 21,65	351,92 ± 15,16	356,40 ± 14,07	5523,39 ± 183,92	37,58 ± 2,02
Sol 20-40cm	6994,27 ± 16,48	341,89 ± 14,73	346,24 ± 13,67	5365,94 ± 178,68	36,51 ± 1,96
Echantillon	Sol K				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	6990,34 ± 50,27	339,00 ± 14,61	343,96 ± 13,58	5453,17 ± 181,59	16,69 ± 0,90
Sol 20-40cm	6791,71 ± 39,46	329,36 ± 14,19	334,19 ± 13,20	5298,22 ± 176,43	16,21 ± 0,87
Echantillon	Sol R				
	Ca	K	Mg	Na	Fe
Sol 0-20cm	6754,67 ± 37,45	151,52 ± 6,53	196,66 ± 7,76	4550,96 ± 61,54	33,49 ± 1,80
Sol 20-40cm	6558,09 ± 30,76	147,11 ± 6,34	190,94 ± 7,54	4418,51 ± 47,13	32,52 ± 1,75

**Tableau III-61:** Teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments traces métalliques extraits par l'EDTA en profil des trois sols étudiés en 2006.

Echantillon	sol F								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	4,77 ± 1,43	0,42 ± 0,12	0,69 ± 0,04	56,34 ± 3,54	0,36 ± 0,07	8,70 ± 0,05	0,11 ± ,60	0,27 ± 0,01	1,02 ± 0,01
Sol 20-40cm	4,66 ± 1,40	0,41 ± 0,12	0,67 ± 0,04	55,04 ± 3,23	0,35 ± 0,06	8,50 ± 0,01	0,10 ± 0,59	0,26 ± 0,01	1,00 ± 0,05
Echantillon	sol K								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	8,04 ± 2,42	0,42 ± 0,12	0,90 ± 0,06	88,50 ± 2,28	0,24 ± 0,04	13,35 ± 0,93	0,26 ± 0,04	0,20 ± 0,01	1,00 ± 0,05
Sol 20-40cm	7,85 ± 2,36	0,41 ± 0,12	0,88 ± 0,06	86,41 ± 2,77	0,23 ± 0,04	13,03 ± 0,90	0,26 ± 0,04	0,20 ± 0,01	0,97 ± 0,05
Echantillon	sol R								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	4,77 ± 1,43	0,42 ± 0,12	0,69 ± 0,04	56,34 ± 3,54	0,36 ± 0,07	8,70 ± 0,60	0,11 ± 0,01	0,27 ± 0,01	1,02 ± 0,05
Sol 20-40cm	4,64 ± 1,39	0,41 ± 0,12	0,67 ± 0,04	54,78 ± 3,17	0,35 ± 0,06	8,46 ± 0,59	0,10 ± 0,01	0,26 ± 0,01	0,99 ± 0,05

**Tableau III-62:** Teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments traces métalliques extraits par l'EDTA en profil pour les trois sols étudiés en 2007.

Echantillon	Sol F								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	4,89 ± 1,47	0,43 ± 0,13	0,71 ± 0,05	57,80 ± 2,89	0,37 ± 0,07	8,93 ± 0,62	0,11 ± 0,02	0,28 ± 0,01	1,05 ± 0,05
Sol 20-40cm	4,78 ± 1,43	0,42 ± 0,12	0,69 ± 0,04	56,41 ± 2,56	0,36 ± 0,07	8,71 ± 0,60	0,11 ± 0,01	0,27 ± 0,01	1,02 ± 0,06
Echantillon	Sol K								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	8,73 ± 2,62	0,46 ± 0,13	0,98 ± 0,07	96,11 ± 4,11	0,26 ± 0,05	14,49 ± 1,01	0,29 ± 0,04	0,22 ± 0,01	1,08 ± 0,06
Sol 20-40cm	8,52 ± 2,56	0,44 ± 0,13	0,95 ± 0,06	93,81 ± 4,55	0,25 ± 0,04	14,15 ± 0,98	0,28 ± 0,04	0,22 ± 0,01	1,06 ± 0,05
Echantillon	Sol R								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	7,35 ± 2,21	0,38 ± 0,11	0,82 ± 0,06	80,98 ± 4,47	0,22 ± 0,04	12,21 ± 0,85	0,24 ± 0,03	0,18 ± 0,01	0,91 ± 0,05
Sol 20-40cm	4,24 ± 1,27	0,37 ± 0,11	0,61 ± 0,04	50,10 ± 2,04	0,32 ± 0,06	7,74 ± 0,54	0,09 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,91 ± 0,05

**Tableau III-63:** Teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments traces métalliques extraits par l'EDTA en profil pour les trois sols étudiés en 2008.

Echantillon	Sol F								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	4,67 ± 0,40	0,41 ± 0,12	0,67 ± 0,04	55,10 ± 3,24	0,35 ± 0,07	8,51 ± 0,59	0,10 ± 0,02	0,26 ± 0,01	1,00 ± 0,05
Sol 20-40cm	4,56 ± 0,37	0,40 ± 0,12	0,66 ± 0,05	53,79 ± 2,93	0,34 ± 0,06	8,31 ± 0,58	0,10 ± 0,01	0,26 ± 0,01	0,97 ± 0,05
Echantillon	Sol K								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	9,42 ± 0,83	0,49 ± 0,14	1,05 ± 0,07	103,71 ± 4,93	0,28 ± 0,05	15,64 ± 1,09	0,31 ± 0,05	0,24 ± 0,01	1,17 ± 0,06
Sol 20-40cm	9,15 ± 0,75	0,48 ± 0,14	1,02 ± 0,07	100,71 ± 4,21	0,27 ± 0,05	15,19 ± 1,06	0,30 ± 0,04	0,23 ± 0,01	1,14 ± 0,06
Echantillon	Sol R								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	4,16 ± 0,25	0,37 ± 0,11	0,60 ± 0,04	49,16 ± 1,82	0,31 ± 0,06	7,59 ± 0,53	0,09 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,89 ± 0,04
Sol 20-40cm	4,057 ± 0,22	0,35 ± 0,11	0,58 ± 0,04	47,912 ± 1,52	0,30 ± 0,06	7,40 ± 0,51	0,09 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,87 ± 0,04



**Tableau III-64:** Teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments traces métalliques extraits par l'EDTA en profil pour les trois sols étudiés en 2009.

Echantillon	sol F								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	4,85 ± 0,46	0,43 ± 0,13	0,70 ± 0,05	57,22 ± 2,75	0,37 ± 0,07	8,84 ± 0,61	0,11 ± 0,02	0,27 ± 0,01	1,04 ± 0,05
Sol 20-40cm	4,68 ± 0,41	0,41 ± 0,12	0,68 ± 0,04	55,29 ± 1,29	0,35 ± 0,06	8,54 ± 0,59	0,10 ± 0,01	0,26 ± 0,01	1,00 ± 0,05
Echantillon	sol K								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	8,85 ± 0,66	0,46 ± 0,13	0,99 ± 0,07	97,38 ± 3,41	0,26 ± 0,05	14,69 ± 1,02	0,29 ± 0,04	0,23 ± 0,01	1,10 ± 0,06
Sol 20-40cm	8,72 ± 0,62	0,46 ± 0,13	0,98 ± 0,07	96,04 ± 3,09	0,26 ± 0,04	14,49 ± 1,01	0,28 ± 0,04	0,22 ± 0,01	1,08 ± 0,06
Echantillon	sol R								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	4,82 ± 0,45	0,42 ± 0,13	0,70 ± 0,05	56,88 ± 2,67	0,36 ± 0,07	8,78 ± 0,61	0,11 ± 0,02	0,27 ± 0,01	1,03 ± 0,05
Sol 20-40cm	4,74 ± 0,427	0,41 ± 0,12	0,68 ± 0,04	55,96 ± 2,45	0,35 ± 0,06	8,64 ± 0,60	0,10 ± 0,01	0,26 ± 0,01	1,01 ± 0,05

**Tableau III-65:** Teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments traces métalliques extraits par l'EDTA en profil pour les trois sols étudiés en 2010.

Echantillon	sol F								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	4,74 ± 0,42	0,42 ± 0,12	0,69 ± 0,04	56,01 ± 3,46	0,36 ± 0,07	8,65 ± 0,60	0,11 ± 0,02	0,27 ± 0,01	1,01 ± 0,05
Sol 20-40cm	4,61 ± 0,38	0,41 ± 0,12	0,67 ± 0,04	54,41 ± 3,08	0,35 ± 0,06	8,40 ± 0,58	0,10 ± 0,01	0,26 ± 0,01	0,98 ± 0,05
Echantillon	sol K								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	7,83 ± 1,35	0,41 ± 0,12	0,88 ± 0,06	86,21 ± 2,73	0,23 ± 0,04	13,00 ± 0,90	0,26 ± 0,04	0,20 ± 0,01	0,97 ± 0,05
Sol 20-40cm	7,61 ± 1,29	0,40 ± 0,12	0,85 ± 0,06	83,76 ± 1,14	0,22 ± 0,04	12,63 ± 0,88	0,25 ± 0,04	0,19 ± 0,01	0,95 ± 0,05
Echantillon	sol R								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Sol 0-20cm	4,23 ± 0,27	0,37 ± 0,11	0,61 ± 0,04	49,92 ± 1,00	0,32 ± 0,06	7,71 ± 0,53	0,09 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,90 ± 0,04
Sol 20-40cm	4,10 ± 0,23	0,36 ± 0,10	0,59 ± 0,04	48,47 ± 1,65	0,31 ± 0,06	7,48 ± 0,52	0,09 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,88 ± 0,04

**Tableau III-66:** Rapport de la fraction disponible en éléments majeurs par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases dans les sols étudiés en fonctions des années d'étude.

		<b>Sol F</b>					
		profondeur	Ca	K	Mg	Na	Fe
Années d'étude	2006	0-20cm	3,57	0,48	5,95	5,83	0,30
		20-40cm	3,57	0,48	5,95	5,84	0,32
	2007	0-20cm	3,67	0,55	5,67	7,63	0,31
		20-40cm	3,67	0,55	5,68	7,64	0,34
	2008	0-20cm	3,58	0,54	3,56	9,86	0,28
		20-40cm	6,67	5,72	4,93	45,58	5,13
	2009	0-20cm	3,80	0,60	1,87	16,37	0,28
		20-40cm	7,09	6,13	2,86	64,38	4,99
2010	0-20cm	3,63	0,63	1,22	21,74	0,26	
	20-40cm	3,63	0,63	1,22	21,72	0,26	

		<b>Sol K</b>					
		profondeur	Ca	K	Mg	Na	Fe
Années d'étude	2006	0-20cm	1,24	0,30	1,57	3,76	0,07
		20-40cm	1,24	0,30	1,57	3,76	0,08
	2007	0-20cm	1,43	0,37	1,02	4,97	0,10
		20-40cm	1,45	0,39	1,02	4,97	0,12
	2008	0-20cm	1,60	0,80	0,77	5,99	0,12
		20-40cm	2,12	6,56	1,35	14,10	0,65
	2009	0-20cm	1,67	1,38	0,51	8,19	0,13
		20-40cm	7,09	6,13	2,86	64,38	4,99
2010	0-20cm	1,71	2,78	0,37	25,66	0,17	
	20-40cm	1,71	2,77	0,37	25,66	0,17	

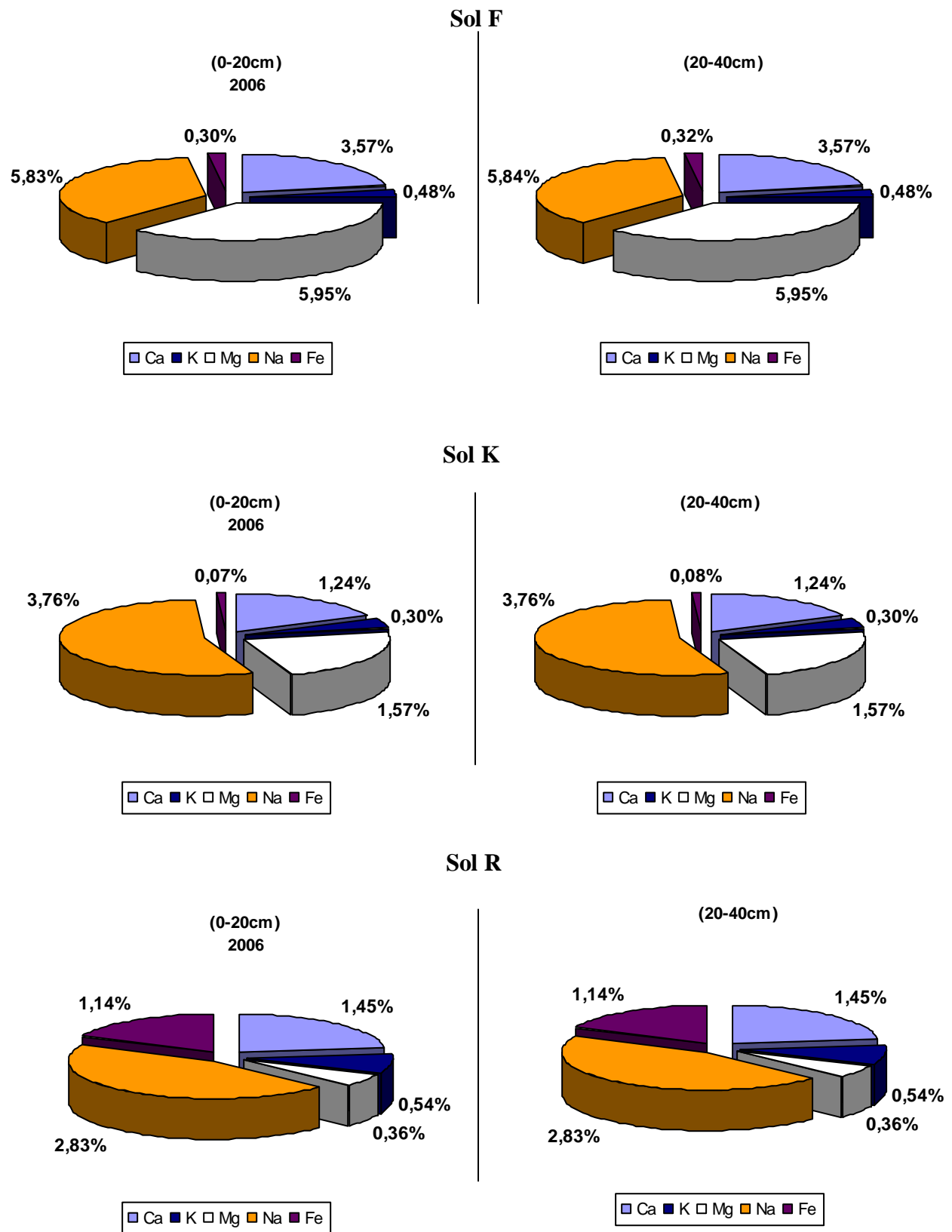
		<b>Sol R</b>					
		profondeur	Ca	K	Mg	Na	Fe
Années d'étude	2006	0-20cm	1,45	0,54	0,36	2,83	1,14
		20-40cm	5,97	0,30	9,42	4,99	0,24
	2007	0-20cm	1,48	0,62	0,86	3,29	1,24
		20-40cm	1,67	0,60	0,54	3,22	11,83
	2008	0-20cm	0,78	0,67	0,63	4,23	3,15
		20-40cm	0,80	1,15	0,62	4,46	14,10
	2009	0-20cm	1,37	1,87	1,49	10,89	4,59
		20-40cm	2,22	8,19	0,90	18,69	0,69
2010	0-20cm	2,17	4,72	2,92	28,41	6,27	
	20-40cm	2,17	4,72	2,92	28,41	23,06	

**Tableau III-67:** Rapport de la fraction disponible en éléments traces métalliques par rapport au total des teneurs contenues dans les différentes phases dans les sols étudiés en fonctions des années d'étude.

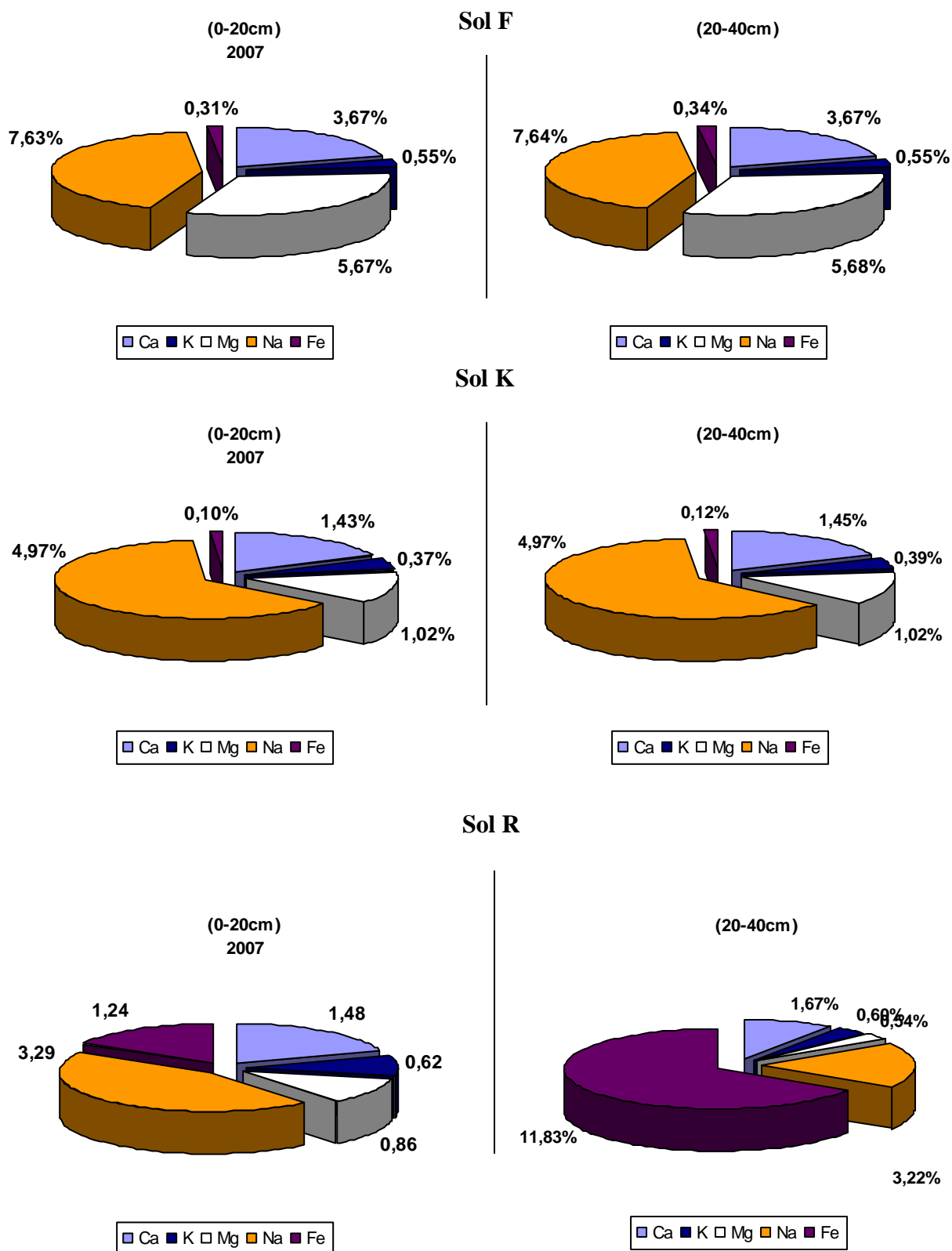
		sol F									
		profond	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Années d'étude	2006	0-20cm	1,34	3,44	1,25	7,57	1,19	1,23	4,76	0,58	0,25
		20-40cm	16,73	6,77	5,58	0,81	1,07	1,34	4,08	7,14	0,12
	2007	0-20cm	17,90	3,66	1,20	1,84	0,72	1,31	4,80	0,30	0,26
		20-40cm	20,08	4,17	1,13	1,79	0,98	1,32	4,49	0,32	0,24
	2008	0-20cm	14,82	3,51	1,57	0,96	0,41	1,14	3,47	0,19	0,19
		20-40cm	16,28	3,63	1,48	0,94	0,38	1,14	4,08	0,20	0,18
	2009	0-20cm	13,03	4,06	1,81	0,93	0,36	1,17	3,21	0,16	0,19
		20-40cm	13,90	4,12	1,67	0,79	0,48	1,16	4,08	0,20	0,17
2010	0-20cm	8,74	3,58	2,15	1,25	0,29	1,12	2,59	0,14	0,16	
	20-40cm	9,10	3,70	1,97	1,20	0,57	1,12	4,08	0,17	0,15	

		sol K									
		profond	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Années d'étude	2006	0-20cm	3,62	0,26	0,85	5,05	0,18	1,49	10,86	0,26	0,06
		20-40cm	3,59	0,26	0,82	4,80	0,17	1,51	10,61	0,27	0,05
	2007	0-20cm	3,93	0,28	1,12	2,17	0,17	2,37	12,08	0,23	0,10
		20-40cm	3,90	0,28	1,06	2,10	0,16	2,40	11,43	0,25	0,09
	2008	0-20cm	3,68	0,38	1,42	1,39	0,15	3,27	12,90	0,22	0,17
		20-40cm	3,63	0,38	1,35	1,34	0,14	3,32	12,24	0,22	0,17
	2009	0-20cm	3,17	0,50	2,25	0,78	0,11	3,34	12,61	0,18	0,12
		20-40cm	3,16	0,50	2,13	0,77	0,11	3,49	11,43	0,23	0,12
2010	0-20cm	2,60	0,66	3,22	0,26	0,09	3,50	3,95	0,12	0,11	
	20-40cm	2,55	0,64	2,90	0,25	0,08	3,64	10,20	0,15	0,10	

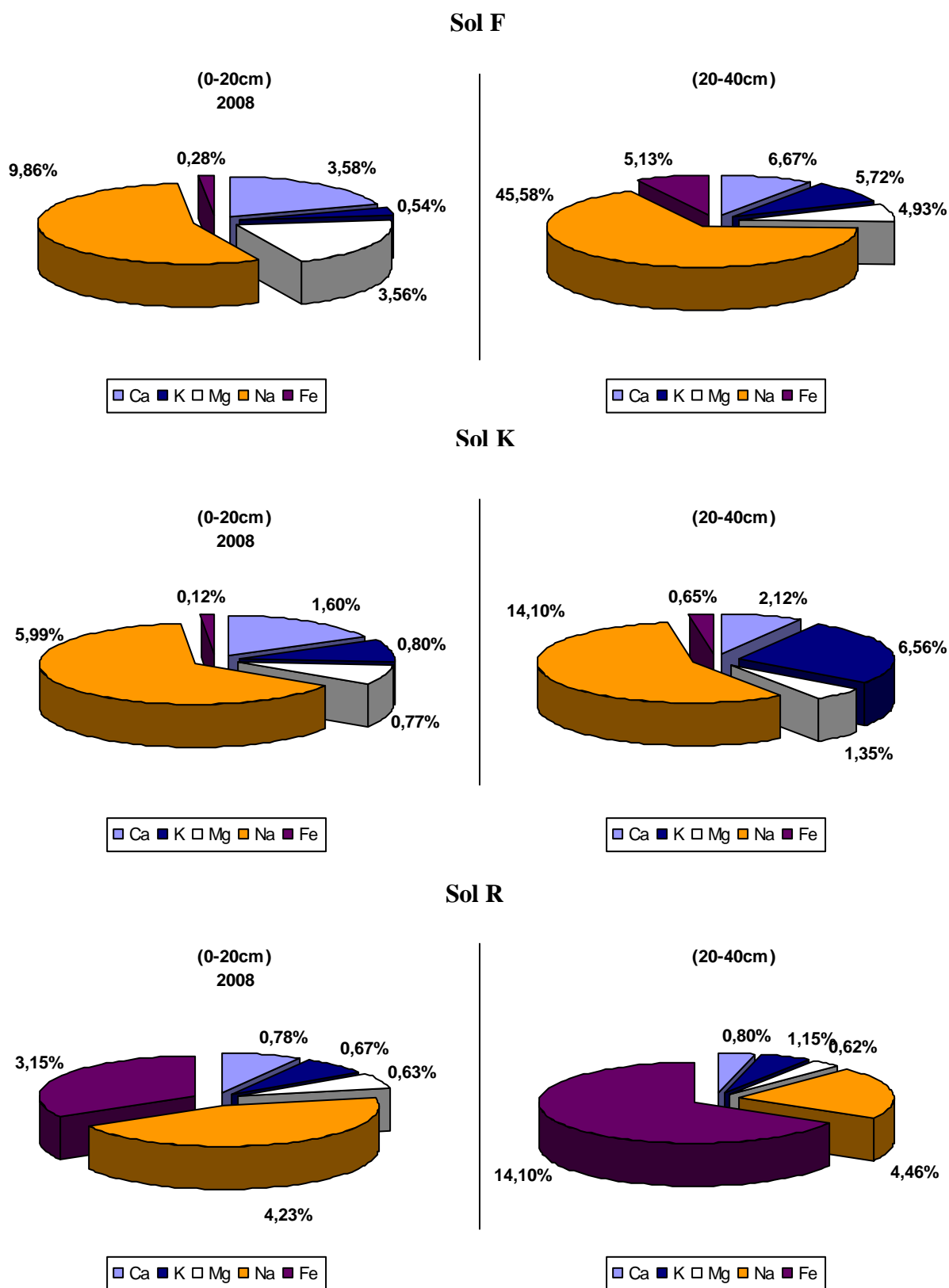
		sol R									
		profond	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Années d'étude	2006	0-20cm	16,46	4,81	3,84	6,68	1,23	1,54	4,03	1,90	0,29
		20-40cm	18,22	5,09	3,35	6,14	1,07	1,56	4,08	3,35	0,13
	2007	0-20cm	35,23	8,00	7,39	16,85	2,01	2,91	7,32	1,21	0,31
		20-40cm	24,42	9,02	4,66	9,47	2,21	1,94	3,67	2,85	0,30
	2008	0-20cm	20,53	10,05	6,46	54,61	3,66	3,72	1,98	1,50	0,35
		20-40cm	24,22	11,84	5,20	52,22	2,95	4,03	3,67	2,40	0,32
	2009	0-20cm	38,33	16,29	15,83	13,86	8,26	4,64	2,03	1,59	0,45
		20-40cm	52,13	16,32	10,59	11,93	2,51	4,81	4,08	2,72	0,42
2010	0-20cm	36,78	14,80	26,75	1,25	32,32	11,05	1,44	1,36	0,43	
	20-40cm	51,12	20,00	13,79	1,20	2,94	12,39	3,67	2,24	0,40	



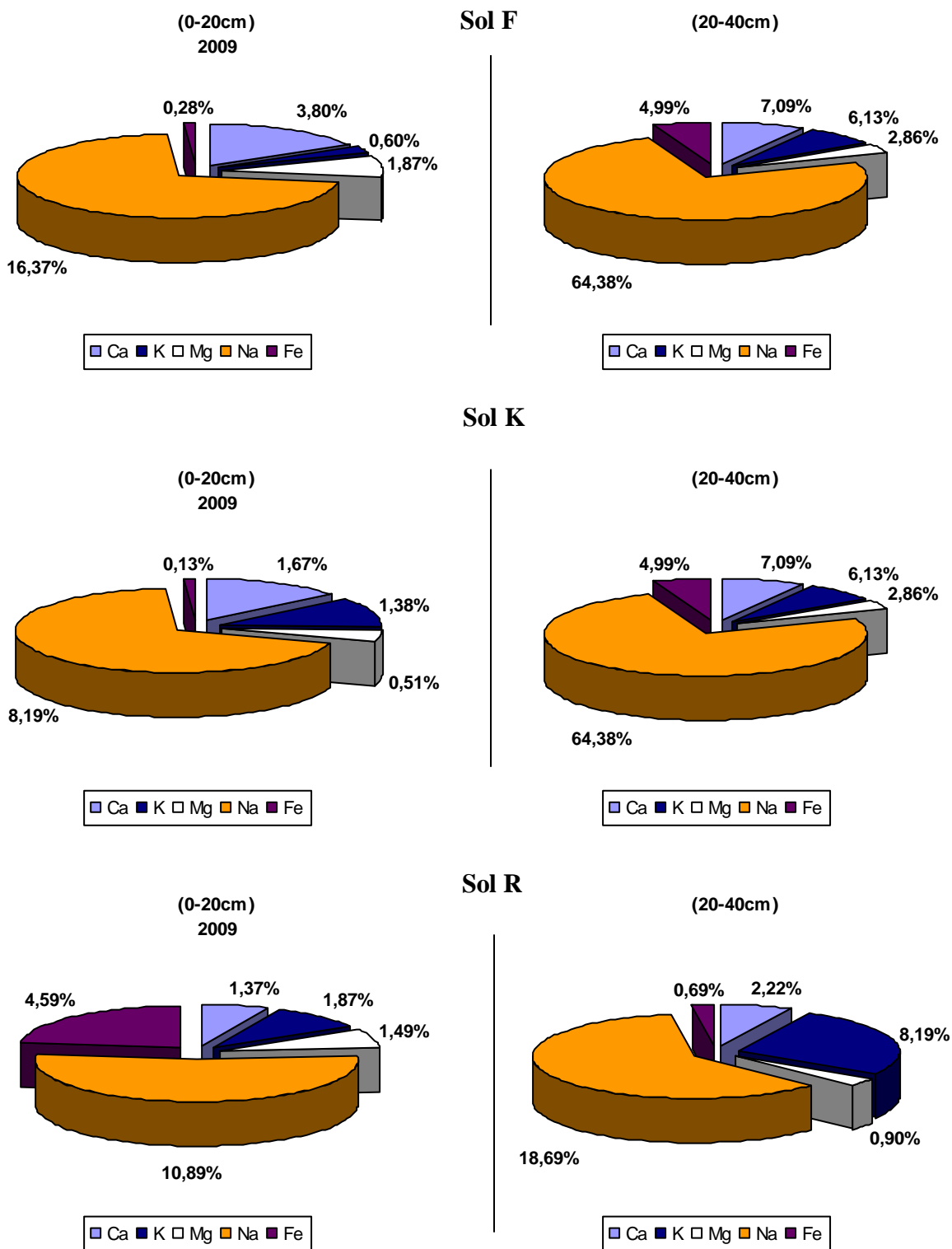
**Figure III-51:** Histogrammes illustrant l'évolution en teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments majeurs dans les sols étudiés extraits par l'EDTA de l'année 2006.



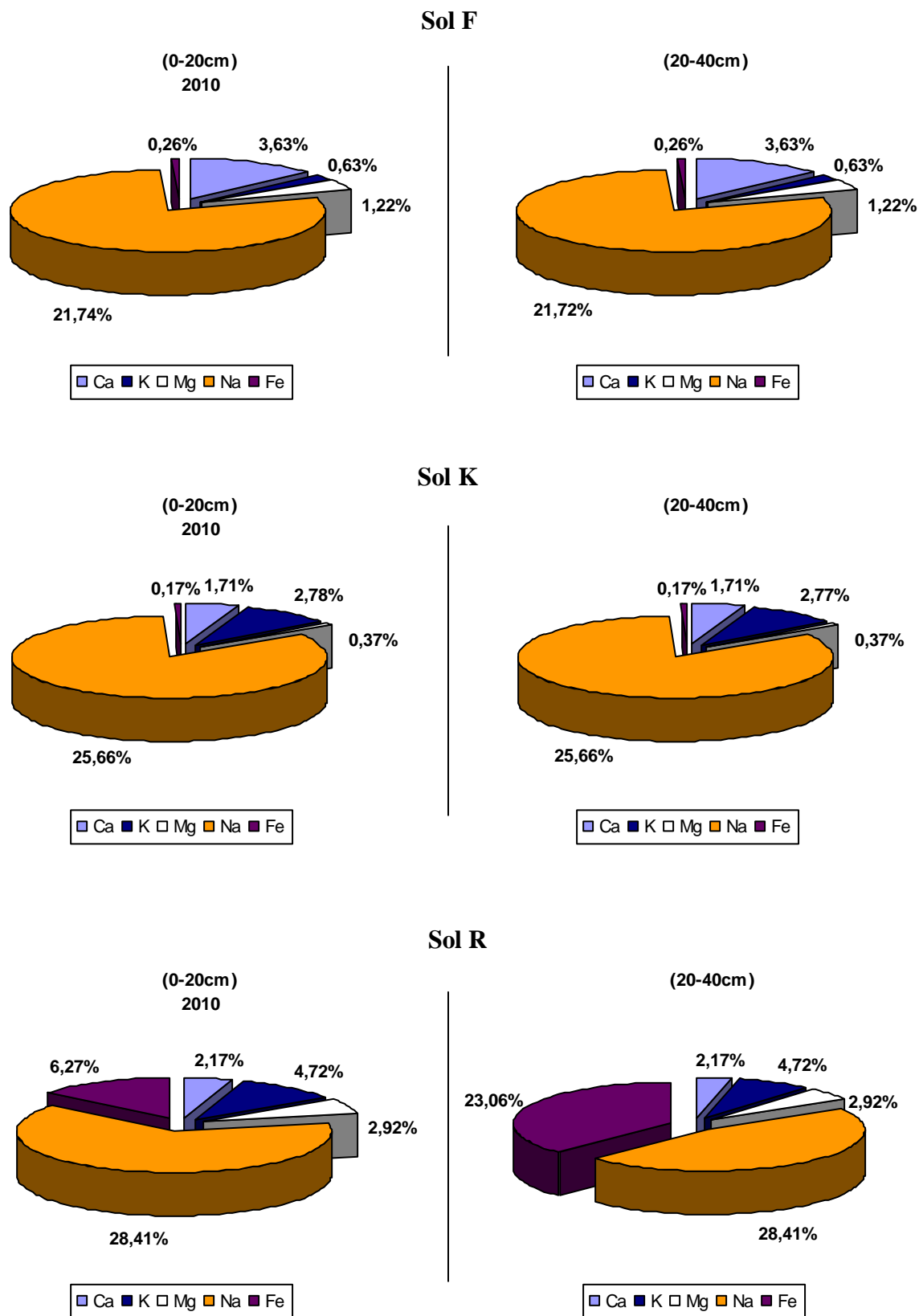
**Figure III-52:** Histogrammes illustrant l'évolution en teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments majeurs dans les sols étudiés extraits par l'EDTA de l'année 2007.



**Figure III-53:** Histogrammes illustrant l'évolution en teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments majeurs dans les sols étudiés extraits par l'EDTA de l'année 2008.



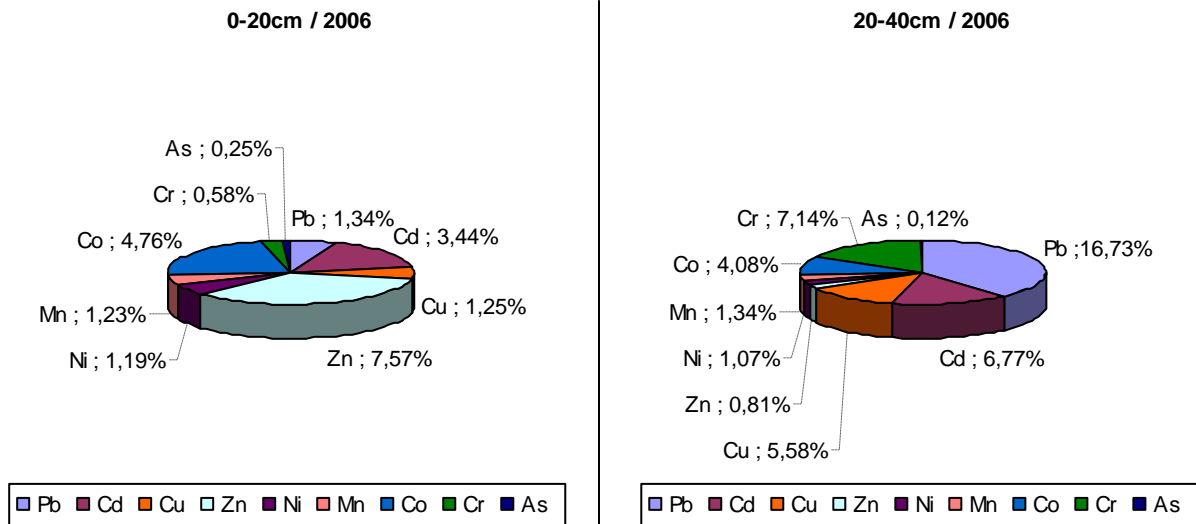
**Figure III-54:** Histogrammes illustrant l'évolution en teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments majeurs dans les sols étudiés extraits par l'EDTA de l'année 2009.



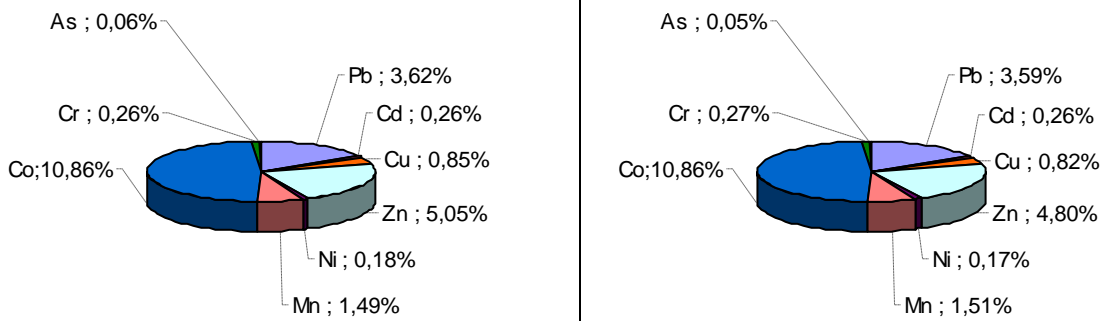
**Figure III-55:** Histogrammes illustrant l'évolution en teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments majeurs dans les sols étudiés extraits par l'EDTA de l'année 2010.



Sol F



Sol K



Sol R

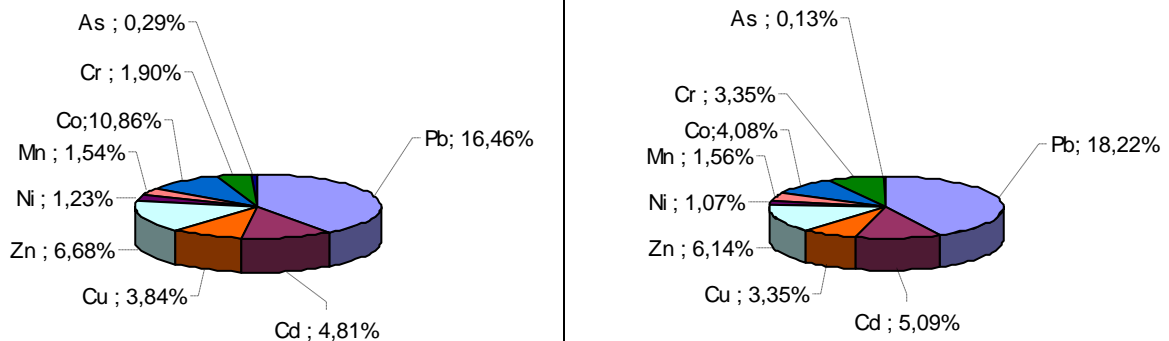
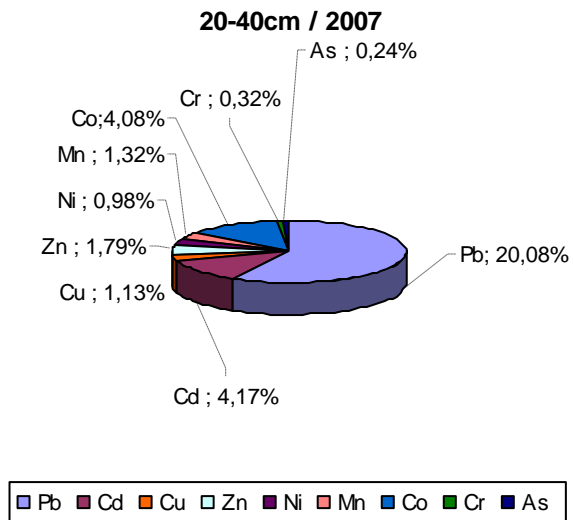
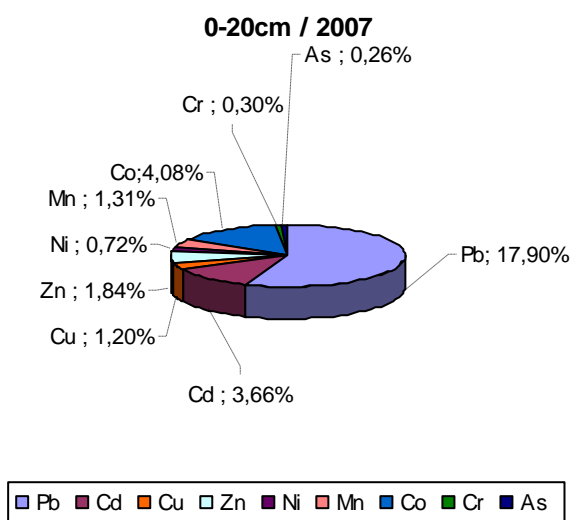
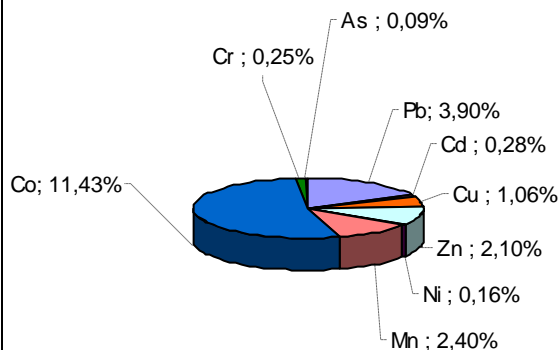
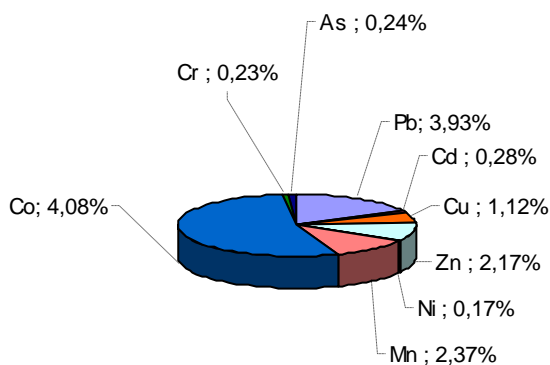


Figure III-56: Histogrammes illustrant l'évolution en teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments traces métalliques dans les sols étudiés extraits par l'EDTA de l'année 2006.

Sol F



Sol K



Sol R

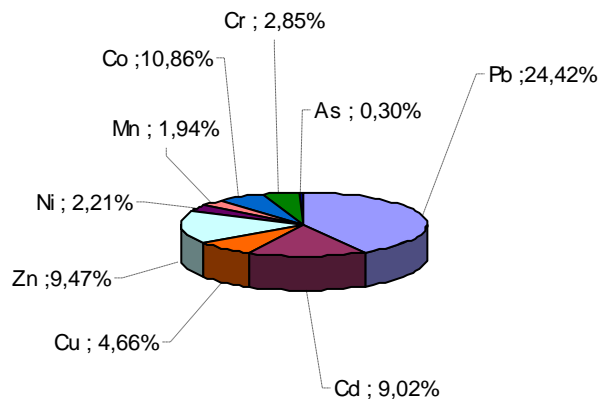
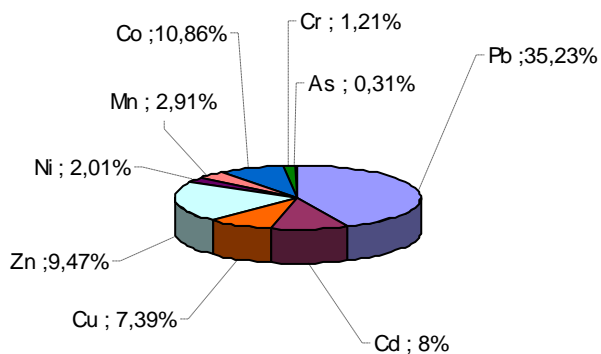
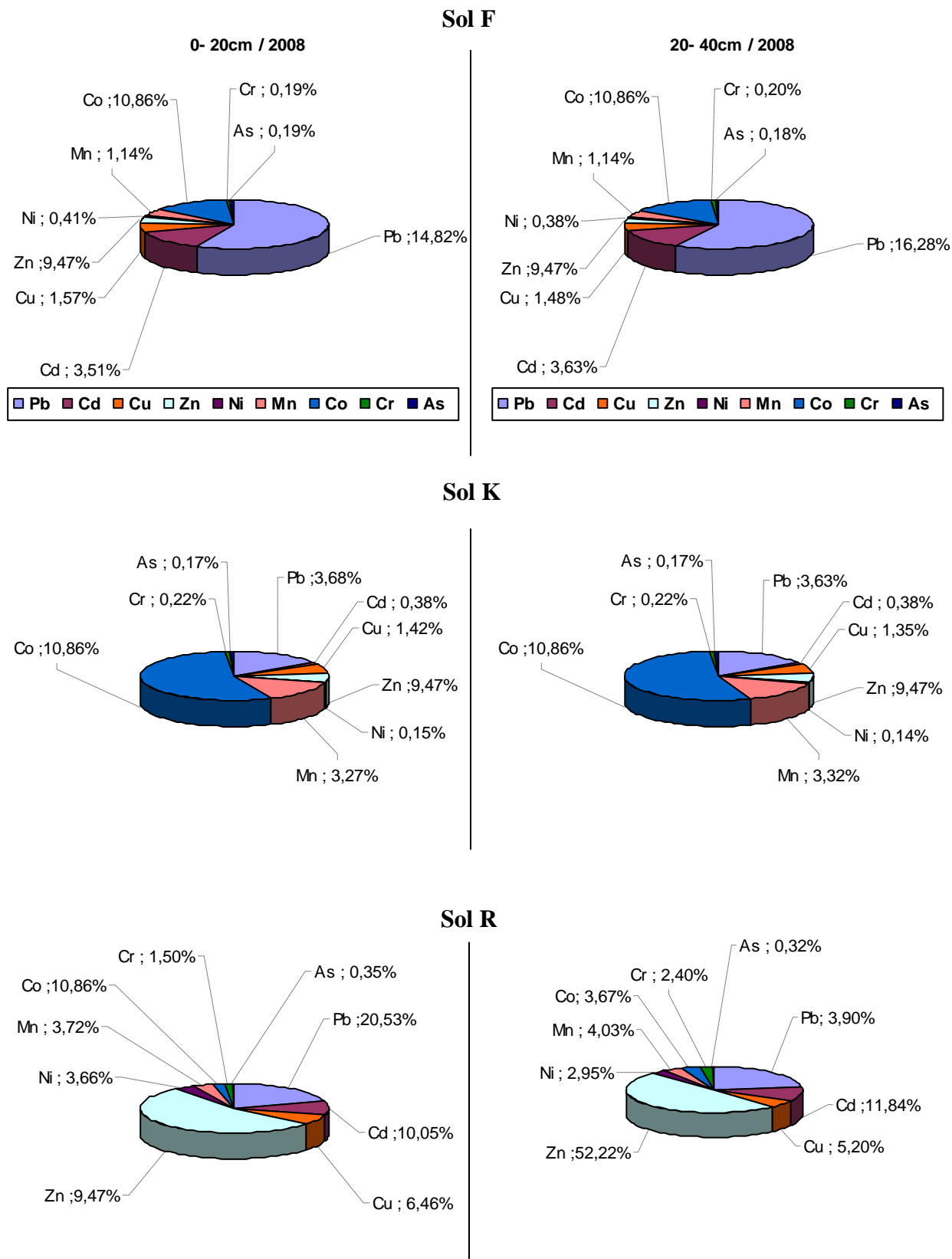
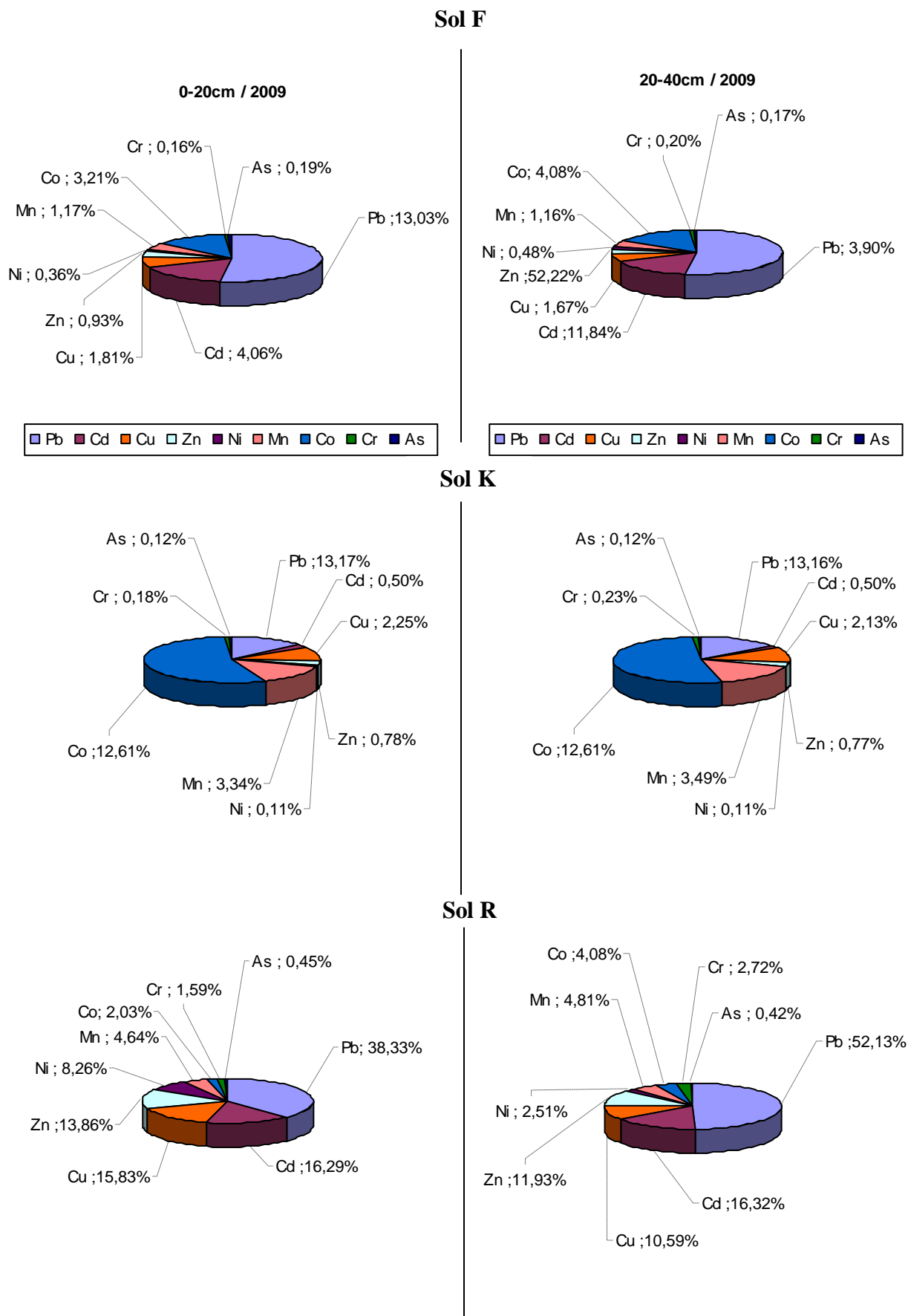


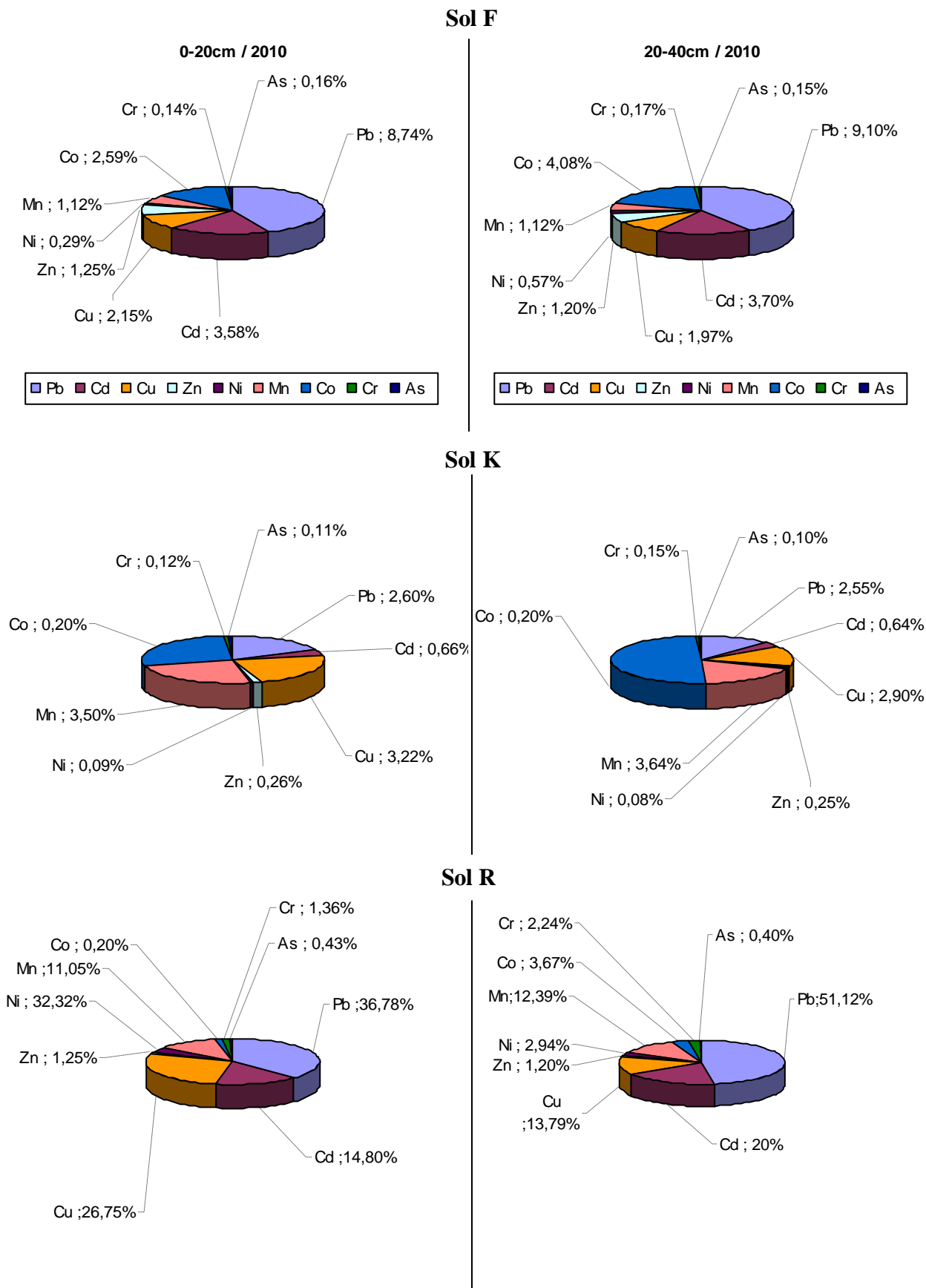
Figure III-57: Histogrammes illustrant l'évolution en teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments traces métalliques dans les sols étudiés extraits par l'EDTA de l'année 2007.



**Figure III-58:** Histogrammes illustrant l'évolution en teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments traces métalliques dans les sols étudiés extraits par l'EDTA de l'année 2008.



**Figure III-59:** Histogrammes illustrant l'évolution en teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments traces métalliques dans les sols étudiés extraits par l'EDTA de l'année 2009.



**Figure III-60:** Histogrammes illustrant l'évolution en teneurs moyennes (en mg/kg/MS) des éléments traces métalliques dans les sols étudiés extraits par l'EDTA de l'année 2010.

D'après ces résultats, on note que les fractions assimilables par les plantes sont de:

- ✓ **Pour le calcium:** sol F: 3,57% à 3,80%;  
sol K: 1,24 % à 1,71%;  
sol R: 0,78% à 2,17%.

Généralement l'évolution des quantités en fonction de la profondeur est croissante.

- ✓ **Pour le potassium:** sol F: 0,48% à 0,63%;  
sol K: 0,30% à 2,78%;  
sol R: 0,54% à 4,72%.

On observe un enrichissement pour la couche inférieure (20-40) cm durant les années d'étude.

- ✓ **Pour le magnésium:** sol F: 1,22% à 5,95%;  
sol K: 0,37% à 1,57%;  
sol R: 0,36% à 2,92%.

Cependant les quantités disponibles en profondeur deviennent plus significatives que celles estimées en surface.

- ✓ **Pour le sodium:** sol F: 5,83% à 21,74%;  
sol K: 3,76% à 25,66%;  
sol R: 2,83% à 28,41%.

D'autre part, on a constaté que le pourcentage du Na augmente légèrement en profondeur.

- ✓ **Pour le fer:** sol F: 0,20% à 0,31%;  
sol K: 0,07% à 0,17%;  
sol R: 0,24% à 23,06%.

L'évolution de la disponibilité augmente pour les trois sols F, K et R en profondeur.

- |                                     |                       |
|-------------------------------------|-----------------------|
| ✓ <b>Pour le plomb: en surface:</b> | <b>en profondeur:</b> |
| sol F: 1,34-17,90%;                 | sol F: 9,10-20,08%.   |
| sol K: 2,60-3,93%;                  | sol K: 2,55-3,90%.    |
| sol R: 16,46-36,78%                 | sol R: 18,22-52,13%.  |

La disponibilité est classée par ordre décroissant dans les trois sols:

$$[\text{Pb}]_{\text{sol R}} > [\text{Pb}]_{\text{sol F}} > [\text{Pb}]_{\text{sol K}}$$

L'évolution intra sol de la fraction mobilisable augmente au sein des sols F et R.

- |                                       |                       |
|---------------------------------------|-----------------------|
| ✓ <b>Pour le cadmium: en surface:</b> | <b>en profondeur:</b> |
| sol F: 3,44-4,06%;                    | sol F: 3,63-6,77%.    |
| sol K: 0,26 à 0,66%;                  | sol K: 0,26 à 0,64%.  |
| sol R: 4,81 à 16,29%;                 | sol R: 5,09 à 20%.    |

La disponibilité est classée par ordre décroissant dans les trois sols:

$$[\text{Cd}]_{\text{sol R}} > [\text{Cd}]_{\text{sol F}} > [\text{Cd}]_{\text{sol K}};$$

L'évolution intra sol de la fraction mobilisable augmente au sein des sols F et R.

✓ **Pour le cuivre: en surface:**

sol F: <2,2 %;  
sol K: <3,3 %;  
sol R: 3,84-26,75%;

**en profondeur:**

sol K: <5,6 %.  
sol K: <5,5 %.  
sol R: 3,35-13,79%.

La disponibilité dans les trois sols est classée par ordre décroissant suivant:

$$[\text{Cu}]_{\text{sol R}} > [\text{Cu}]_{\text{sol K}} > [\text{Cu}]_{\text{sol F}};$$

L'évolution intra sol de la fraction mobilisable diminue au sein des trois sols F, K et R.

✓ **Pour le zinc: en surface:**

sol F: 0,93-7,57%;  
sol K: 0,26-5,05%;  
sol R: 54,61% à 2008;

**en profondeur:**

sol F: 0,81-1,20%.  
sol K: 0,25-4,80%.  
sol R: 52,22% à 2008.

La disponibilité est classée par ordre décroissant dans les trois sols:

$$[\text{Zn}]_{\text{sol R}} > [\text{Zn}]_{\text{sol F}} > [\text{Zn}]_{\text{sol K}};$$

L'évolution intra sol (verticale) de la fraction mobilisable augmente au sein des sols F et R.

✓ **Pour le nickel: en surface:**

sol F: 0,29-1,19 %;  
sol K: 0,09-0,18%;  
sol R: 1,23-32,32%;

**en profondeur:**

sol F: 0,38-1,07%.  
sol K: 0,08-0,17%.  
sol R: 1,07-2,94%.

La disponibilité dans les trois sols est classée par la séquence suivante:

$$[\text{Ni}]_{\text{sol R}} > [\text{Ni}]_{\text{sol F}} > [\text{Ni}]_{\text{sol K}};$$

La fraction mobilisable du Ni est importante dans la couche profonde que dans la couche superficielle pour les sols R et F.

✓ **Pour le manganèse: en surface:**

sol F: < 1,24%;  
sol K: 1,49-3,50 %;  
sol R: 1,54-11,05%;

**en profondeur:**

sol F: < 1,35.  
sol K: 1,51-3,64%.  
sol R: 1,56 à 12,39%.

La disponibilité dans les trois sols est classée par la séquence suivante:

$$[\text{Mn}]_{\text{sol R}} > [\text{Mn}]_{\text{sol F}} > [\text{Mn}]_{\text{sol K}};$$

La fraction mobilisable du Mn est plus grande dans le profond que dans la surface pour les sols R et K.

✓ **Pour le cobalt: en surface:**

sol F: 2,59-4,76%;  
sol K: 3,95-12,90%;  
sol R: 1,44-7,32%;

**en profondeur:**

sol F: 4,08-4,49%.  
sol K: 10,20-12,24%.  
sol R: 3,67-4,08%.

La disponibilité dans les trois sols est classée par l'ordre suivant:

$$[\text{Co}]_{\text{sol K}} > [\text{Co}]_{\text{sol F}} > [\text{Co}]_{\text{sol R}};$$

La fraction mobilisable du Co est plus grande dans le profond que dans la surface pour les sols R et K.

✓ **Pour le chrome: en surface:**

sol F: 0,14-0,58%;  
sol K: 0,12-0,26%;  
sol R: 1,21-1,90%;

**en profondeur:**

sol F: 0,17-7,14%.  
sol K: 0,15-0,27%.  
sol R: 2,24-3,35%.

La disponibilité dans les trois sols est classée par la séquence suivante:

$$[\text{Cr}]_{\text{sol R}} > [\text{Cr}]_{\text{sol F}} > [\text{Cr}]_{\text{sol K}};$$

La fraction mobilisable du Cr est plus grande dans le profond que dans la surface pour le sol R.

✓ **Pour l'arsenic: en surface:**

sol F: < 0,26%;  
sol K: < 0,18%;  
sol R: 0,29-0,45%;

**en profondeur:**

sol F: < 0,25%.  
sol K: < 0,18%.  
sol R: 0,13-0,42%.

La disponibilité dans les trois sols est classée par la séquence suivante :

$$[\text{Cr}]_{\text{sol R}} > [\text{Cr}]_{\text{sol F}} > [\text{Cr}]_{\text{sol K}};$$

La fraction mobilisable d'As est plus grande dans le profond que dans la surface pour le sol R.

### III.2. LES PLANTES VEGETALES ETUDIEES

Pour déterminer le taux d'accumulation et de contamination d'éléments métalliques dans nos végétaux récoltés annuellement de l'été 2006 à l'été 2010, une extraction à l'eau régale a été réalisée.

Le dosage a été effectué sur les racines et la partie aérienne à savoir pour:

- **le poivron et le raisin:** feuilles, fruits, tiges et racines;
- **l'artichaut:** feuilles, tiges et racines.

Les résultats de dosage sont regroupés dans les tableaux (III-68 à III-77) et illustrés sous forme d'histogrammes dans les figures (III-61 à III-74).



**Tableau III-68:** Teneurs totales moyennes (g/kg sur matière sèche) des éléments majeurs dans les différentes parties des plantes étudiées de l'année 2006.

	Ca	K	Mg	Na	Fe
<b>Poivron</b>					
Feuilles	5,68 ± 0,30	3,59 ± 0,15	0,46 ± 0,02	1,07 ± 0,036	0,10 ± 0,01
Fruits	2,03 ± 0,11	0,81 ± 0,03	0,20 ± 0,01	1,31 ± 0,044	0,01 ± 0,01
Tige	0,84 ± 0,04	0,49 ± 0,02	0,23 ± 0,01	0,53 ± 0,018	0,04 ± 0,01
Racines	11,31 ± 0,61	10,12 ± 0,43	0,96 ± 0,04	0,78 ± 0,026	0,15 ± 0,01
<b>Total</b>	19,86	15,01	1,85	3,69	0,30
<b>Artichaut</b>					
Feuilles	13,18 ± 0,72	16,26 ± 0,70	1,42 ± 0,06	11,94 ± 0,34	0,86 ± 0,04
Tige	7,10 ± 0,38	2,83 ± 0,12	0,69 ± 0,02	4,58 ± 0,15	0,63 ± 0,03
Racines	5,41 ± 0,29	4,32 ± 0,18	0,86 ± 0,03	7,43 ± 0,25	0,89 ± 0,05
<b>Total</b>	25,69	23,41	2,97	23,95	2,38
<b>Raisin</b>					
Feuilles	14,46 ± 0,78	2,06 ± 0,09	0,72 ± 0,03	1,18 ± 0,04	0,29 ± 0,02
Fruits	3,51 ± 0,19	0,98 ± 0,04	0,53 ± 0,02	1,37 ± 0,05	0,04 ± 0,002
Tige	1,65 ± 0,09	2,23 ± 0,09	0,26 ± 0,01	1,61 ± 0,05	0,03 ± 0,002
racines	3,32 ± 0,18	2,12 ± 0,09	1,24 ± 0,05	0,65 ± 0,02	0,89 ± 0,05
<b>Total</b>	22,94	7,39	2,75	4,81	1,25

**Tableau III-69:** Teneurs totales moyennes (g/kg sur matière sèche) des éléments majeurs dans les différentes parties des plantes étudiées de l'année 2007.

	Ca	K	Mg	Na	Fe
<b>Poivron</b>					
Feuilles	5,68 ± 0,31	3,14 ± 0,13	0,82 ± 0,03	1,02 ± 0,034	0,12 ± 0,01
Fruits	2,03 ± 0,11	0,98 ± 0,04	0,93 ± 0,04	1,43 ± 0,048	0,09 ± 0,01
Tige	0,84 ± 0,05	0,65 ± 0,03	0,55 ± 0,02	0,73 ± 0,024	0,19 ± 0,01
Racines	11,31 ± 0,61	12,00 ± 0,52	10,74 ± 0,42	0,86 ± 0,029	0,15 ± 0,01
<b>Total</b>	19,86	16,77	13,04	4,04	0,55
<b>Artichaut</b>					
Feuilles	10,12 ± 0,55	13,00 ± 0,56	1,48 ± 0,05	9,35 ± 0,31	0,51 ± 0,02
Tige	9,45 ± 0,51	2,78 ± 0,12	8,89 ± 0,35	2,35 ± 0,07	0,65 ± 0,03
racines	4,32 ± 0,23	4,45 ± 0,19	0,93 ± 0,03	7,64 ± 0,25	0,22 ± 0,01
<b>Total</b>	23,88	20,23	11,30	19,34	1,38
<b>Raisin</b>					
Feuilles	12,23 ± 0,66	2,00 ± 0,08	0,82 ± 0,03	1,35 ± 0,04	0,21 ± 0,01
Fruits	3,07 ± 0,16	1,20 ± 0,05	0,78 ± 0,03	1,12 ± 0,03	0,04 ± 0,002
Tige	2,75 ± 0,15	2,01 ± 0,08	5,08 ± 0,20	1,51 ± 0,05	0,05 ± 0,003
racines	3,37 ± 0,18	2,02 ± 0,08	1,25 ± 0,05	0,68 ± 0,02	0,14 ± 0,01
<b>Total</b>	21,42	7,23	7,95	4,66	0,44

**Tableau III-70:** Teneurs totales moyennes (g/kg sur matière sèche) des éléments majeurs dans les différentes parties des plantes étudiées de l'année 2008.

	Ca	K	Mg	Na	Fe
<b>Poivron</b>					
Feuilles	10,87 ± 0,59	3,00 ± 0,12	1,37 ± 0,05	1,00 ± 0,03	0,39 ± 0,02
Fruits	5,65 ± 0,30	1,03 ± 0,04	2,84 ± 0,11	1,82 ± 0,06	0,14 ± 0,01
Tige	1,43 ± 0,07	0,89 ± 0,03	1,08 ± 0,04	0,94 ± 0,03	0,20 ± 0,01
Racines	15,43 ± 0,83	1,75 ± 0,07	13,46 ± 0,53	0,95 ± 0,03	0,44 ± 0,02
<b>Total</b>	33,38	6,67	18,75	4,71	1,17
<b>Artichaut</b>					
Feuilles	9,72 ± 0,52	9,15 ± 0,39	1,64 ± 0,06	8,73 ± 0,29	0,48 ± 0,02
Tige	10,15 ± 0,55	2,91 ± 0,12	1,19 ± 0,04	1,73 ± 0,06	0,68 ± 0,03
Racines	4,02 ± 0,21	5,02 ± 0,21	1,31 ± 0,05	8,25 ± 0,27	0,23 ± 0,01
<b>Total</b>	23,88	17,08	4,14	18,71	1,39
<b>Raisin</b>					
Feuilles	11,57 ± 0,62	2,15 ± 0,09	0,94 ± 0,03	1,74 ± 0,05	0,21 ± 0,01
Fruits	3,11 ± 0,16	2,01 ± 0,08	1,07 ± 0,04	0,99 ± 0,03	0,05 ± 0,003
Tige	3,11 ± 0,16	1,83 ± 0,07	8,15 ± 0,32	1,32 ± 0,04	0,06 ± 0,003
Racines	3,75 ± 0,20	1,93 ± 0,08	1,31 ± 0,05	0,70 ± 0,02	0,18 ± 0,01
<b>Total</b>	21,54	7,92	11,47	4,75	0,50

**Tableau III-71:** Teneurs totales moyennes (g/kg sur matière sèche) des éléments majeurs dans les différentes parties des plantes étudiées de l'année 2009.

	Ca	K	Mg	Na	Fe
<b>Poivron</b>					
Feuilles	14,46 ± 0,78	2,79 ± 0,12	2,72 ± 0,10	0,74 ± 0,02	0,60 ± 0,03
Fruits	7,43 ± 0,40	1,73 ± 0,07	5,68 ± 0,22	2,55 ± 0,08	0,22 ± 0,01
Tige	3,86 ± 0,21	1,56 ± 0,06	1,73 ± 0,06	1,33 ± 0,04	0,38 ± 0,02
Racines	20,12 ± 1,09	26,87 ± 1,15	18,03 ± 0,71	1,46 ± 0,04	0,69 ± 0,03
<b>Total</b>	45,87	32,95	28,16	6,08	1,89
<b>Artichaut</b>					
Feuilles	8,12 ± 0,44	7,84 ± 0,33	1,68 ± 0,06	5,32 ± 0,17	0,40 ± 0,02
Tige	14,35 ± 0,78	3,18 ± 0,13	1,21 ± 0,04	0,94 ± 0,03	0,70 ± 0,03
Racines	3,82 ± 0,20	5,73 ± 0,24	1,72 ± 0,06	8,88 ± 0,29	0,25 ± 0,01
<b>Total</b>	26,28	16,75	4,61	15,14	1,35
<b>Raisin</b>					
Feuilles	10,11 ± 0,55	2,21 ± 0,09	1,09 ± 0,04	2,10 ± 0,07	0,21 ± 0,01
Fruits	3,19 ± 0,17	4,86 ± 0,20	1,83 ± 0,07	0,73 ± 0,02	0,07 ± 0,004
Tige	4,75 ± 0,25	1,43 ± 0,06	1,53 ± 0,06	1,28 ± 0,04	0,09 ± 0,005
Racines	4,12 ± 0,22	1,90 ± 0,08	1,41 ± 0,05	0,71 ± 0,02	0,21 ± 0,01
<b>Total</b>	22,17	10,40	5,86	4,82	0,58

**Tableau III-72:** Teneurs totales moyennes (g/kg sur matière sèche) des éléments majeurs dans les différentes parties des plantes étudiées de l'année 2010.

	Ca	K	Mg	Na	Fe
<b>Poivron</b>					
Feuilles	19,35 ± 1,05	2,26 ± 0,09	4,85 ± 0,19	0,31 ± 0,01	0,90 ± 0,04
Fruits	6,92 ± 0,37	31,40 ± 1,35	12,27 ± 0,48	4,36 ± 0,14	0,31 ± 0,01
Tige	6,45 ± 0,35	2,43 ± 0,10	2,55 ± 0,10	1,85 ± 0,06	0,40 ± 0,02
Racines	37,04 ± 2,01	35,81 ± 1,54	26,18 ± 1,03	2,54 ± 0,08	0,83 ± 0,04
<b>Total</b>	69,76	71,90	45,85	9,06	2,44
<b>Artichaut</b>					
Feuilles	6,93 ± 0,37	3,92 ± 0,16	1,82 ± 0,07	4,84 ± 0,16	0,36 ± 0,01
Tige	20,36 ± 1,10	3,50 ± 0,15	1,16 ± 0,04	6,25 ± 0,20	0,71 ± 0,03
Racines	3,22 ± 0,17	6,30 ± 0,27	2,07 ± 0,08	9,06 ± 0,30	0,26 ± 0,01
<b>Total</b>	30,51	13,72	5,05	20,15	1,33
<b>Raisin</b>					
Feuilles	8,61 ± 0,46	2,08 ± 0,09	1,38 ± 0,05	2,52 ± 0,08	0,21 ± 0,01
Fruits	3,25 ± 0,17	9,22 ± 0,39	2,96 ± 0,11	0,55 ± 0,01	0,09 ± 0,005
Tige	6,00 ± 0,32	1,12 ± 0,04	2,33 ± 0,09	1,26 ± 0,04	0,09 ± 0,004
Racines	4,72 ± 0,25	1,87 ± 0,08	1,48 ± 0,05	0,71 ± 0,02	0,39 ± 0,02
<b>Total</b>	22,58	14,29	8,15	5,04	0,78

**Tableau III-73:** Teneur totales moyennes (mg/kg sur matière sèche) des éléments traces métalliques dans les différentes parties des plantes étudiées de l'année 2006.

	<b>Poivron</b>								
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
Feuilles	3,35 ±1,01	0,70 ±0,21	3,68 ±0,26	225,45 ±4,21	0,15 ±0,02	15,83 ±1,10	0,21 ±0,03	<b>DL</b>	<b>DL</b>
Fruits	0,72 ±0,21	0,68 ±0,20	1,31 ±0,09	19,79 ±1,75	0,03 ±0,01	0,73 ±0,05	0,11 ±0,01	0,06 ±0,01	0,20 ±0,01
Tige	1,87 ± 0,56	0,29 ± 0,08	1,76 ± 0,12	94,76 ±2,78	0,08 ± 0,01	6,86 ± 0,47	0,08 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,21 ± 0,01
Racines	6,48 ±1,95	0,74 ±0,22	3,76 ±0,26	245,05 ±2,92	0,12 ±0,02	30,43 ±2,12	<b>DL</b>	0,25 ±0,01	0,54 ±0,02
<b>Total</b>	12,42	2,41	10,51	585,05	0,38	53,85	0,40	0,42	0,95
<b>Artichaut</b>									
Feuilles	14,87 ±4,47	1,50 ±0,45	13,21 ±0,94	153,61 ±1,93	2,04 ±0,40	30,04 ±2,09	0,68 ± 0,11	7,63 ± 0,41	1,05 ± 0,05
Tige	3,50 ±1,05	0,33 ± 0,10	23,34 ±1,66	87,88 ±1,13	1,31 ±0,25	12,33 ±0,86	0,30 ± 0,04	1,13 ±0,06	0,01 ±0,001
Racines	19,83 ±5,97	2,54 ±0,76	28,76 ±2,04	138,38 ±3,27	6,45 ±1,26	34,36 ±2,39	0,82 ±0,13	3,56 ±0,19	1,54 ± 0,08
<b>Total</b>	38,20	4,37	65,31	379,87	9,80	76,73	1,80	12,32	2,60
<b>Raisin</b>									
Feuilles	62,38 ±2,78	3,22 ±0,97	25,40 ±1,80	303,74 ±3,04	0,65 ± 0,12	36,10 ± 2,51	0,35 ± 0,05	2,92 ± 0,15	0,03 ±0,01
Fruits	2,12 ± 0,63	0,05 ± 0,01	13,82 ± 0,98	68,60 ± 2,49	0,23 ±0,04	8,19 ± 0,57	0,35 ± 0,05	0,76 ± 0,04	0,64 ±0,03
Tige	0,94 ± 0,28	0,02 ± 0,01	7,40 ± 0,52	34,08 ± 1,19	0,34 ±0,06	5,35 ± 0,37	0,12 ± 0,01	1,49 ±0,08	0,12 ±0,01
Racines	78,67 ±3,68	7,74 ± 2,33	27,34 ± 1,94	272,27 ±5,46	2,82 ± 0,55	42,35 ± 2,95	1,90 ± 0,30	2,98 ±0,16	0,98 ±0,05
<b>Total</b>	144,11	11,03	73,96	678,69	4,04	91,99	2,72	8,15	1,77

**Tableau III-74:** Teneur totales moyennes (mg/kg sur matière sèche) des éléments traces métalliques dans les différentes parties des plantes étudiées de l'année 2007.

<b>Poivron</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
Feuilles	3,11 ± 0,93	0,72 ± 0,21	3,72 ± 0,26	432,75 ±4,05	0,94 ±0,18	17,03 ± 1,18	0,83 ± 0,13	0,82 ±0,04	0,21 ± 0,01
Fruits	0,01 ±0,003	0,63 ±0,19	8,32 ±0,59	93,12 ±2,39	0,82 ± 0,16	3,72 ±0,26	0,10 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,22 ± 0,01
Tige	1,70 ± 0,51	0,51 ± 0,15	3,22 ±0,22	151,16 ±6,34	0,10 ± 0,02	14,37 ± 1,00	0,11 ±0,02	0,43 ± 0,02	0,20 ± 0,01
Racines	0,01 ±0,003	3,71 ±1,12	11,32 ±0,80	140,16 ±3,70	11,76 ±2,30	41,15 ± 2,87	0,18 ±0,03	2,80 ±0,15	2,71 ±0,14
<b>Total</b>	4,83	5,57	26,58	817,20	13,62	76,27	1,22	4,13	3,34
<b>Artichaut</b>									
Feuilles	4,78 ±1,43	1,30 ±0,39	17,31 ±1,23	450,11 ±18,23	3,96 ± 0,77	31,45 ±2,19	0,63 ±0,10	8,21 ± 0,44	0,92 ± 0,05
Tige	3,50 ±1,05	0,18 ±0,05	17,89 ±1,27	102,21 ±4,57	4,13 ± 0,81	10,12 ±0,70	0,58 ±0,09	1,64 ±0,08	0,01 ±0,001
Racines	15,40 ± 2,63	2,02 ±0,61	4,92 ±0,35	32,02 ±2,69	4,40 ±0,86	8,81 ±0,61	0,62 ±0,10	17,05 ± 0,93	0,60 ± 0,03
<b>Total</b>	23,68	3,50	40,12	584,34	12,49	50,38	1,83	26,90	1,53
<b>Raisin</b>									
Feuilles	7,15 ±2,15	3,20 ±0,96	20,13 ± 1,43	361,77 ±6,98	3,04 ±0,59	39,40 ±2,74	0,38 ±0,06	4,20 ±0,22	0,02 ±0,001
Fruits	3,92 ±1,18	0,06 ±0,01	10,00 ±0,71	71,13 ±7,10	2,66 ± 0,52	7,52 ±0,52	2,01 ±0,32	0,78 ± 0,04	0,67 ±0,03
Tige	0,95 ±0,28	0,89 ±0,26	7,51 ± 0,53	107,75 ± 5,90	0,94 ±0,18	8,22 ±0,57	0,01 ±0,002	2,59 ±0,14	0,30 ±0,01
Racines	0,33 ±0,09	0,67 ±0,20	4,14 ±0,29	343,15 ± 8,51	8,39 ±1,64	7,53 ±0,52	1,90 ±0,30	26,09 ±1,42	31,10 ±1,69
<b>Total</b>	12,35	4,82	41,78	883,81	15,03	62,67	4,30	33,67	34,09

*Tableau III-75: Teneur totales moyennes (mg/kg sur matière sèche) des éléments traces métalliques dans les différentes parties des plantes étudiées de l'année 2008.*

<b>Poivron</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
Feuilles	3,90 ±1,17	0,70 ± 0,21	3,02 ±0,21	687,72 ±16,36	1,88 ±0,36	18,07 ±1,26	0,97 ±0,15	0,94 ±0,05	0,30 ±0,01
Fruits	0,01 ± 0,003	0,92 ±0,27	17,58 ± 1,25	117,25 ±2,19	4,19 ± 0,82	12,02 ±0,83	0,09 ±0,01	0,82 ±0,04	0,28 ± 0,01
Tige	1,50 ±0,45	0,72 ±0,21	4,56 ±0,32	259,12 ±8,30	1,36 ±0,26	19,18 ±1,33	0,82 ±0,13	0,80 ±0,04	0,21 ±0,01
Racines	0,01 ±0,001	3,82 ±1,15	19,81 ±1,41	517,57 ±10,45	12,21 ± 2,39	44,11 ±3,07	2,02 ±0,32	6,07 ±0,33	3,04 ±0,16
<b>Total</b>	5,42	6,16	44,97	1581,66	19,65	91,38	3,90	8,63	3,83
<b>Artichaut</b>									
Feuilles	20,23 ±6,09	1,21 ±0,36	19,82 ± 1,41	730,43 ±25,63	4,55 ±0,89	37,71 ± 2,63	0,93 ±0,15	9,73 ±0,53	1,26 ±0,06
Tige	2,82 ±0,84	0,09 ±0,02	15,38 ±1,09	122,39 ± 9,42	7,12 ±1,39	9,80 ±0,68	1,07 ±0,17	1,91 ±0,10	0,03 ±0,002
Racines	5,42 ±1,63	0,93 ±0,28	4,01 ±0,28	35,15 ±1,45	4,21 ±0,82	9,01 ±0,62	0,91 ±0,14	21,98 ± 1,19	0,91 ± 0,05
<b>Total</b>	28,47	2,23	39,21	887,97	15,88	56,52	2,91	33,62	2,20
<b>Raisin</b>									
Feuilles	10,58 ±3,18	3,10 ±0,93	17,22 ±1,22	409,15 ±18,38	5,50 ±1,07	42,05 ±2,93	0,54 ±0,08	7,11 ±0,38	0,10 ±0,01
Fruits	4,00 ±1,20	0,09 ±0,02	10,01 ±0,71	72,19 ±1,35	4,34 ±0,85	7,73 ±0,53	3,16 ±0,51	1,28 ±0,07	0,72 ±0,03
Tige	1,60 ±0,48	0,11 ±0,03	6,90 ±0,49	127,58 ±3,67	1,87 ±0,36	12,13 ±0,84	0,01 ±0,002	4,73 ±0,25	0,90 ±0,04
Racines	0,43 ±0,12	0,13 ±0,03	4,01 ±0,28	309,97 ±4,53	6,87 ±1,34	11,81 ± 0,82	1,74 ±0,28	35,14 ± 1,91	24,45 ±1,33
<b>Total</b>	16,61	3,43	38,14	918,89	18,58	73,72	5,45	48,26	26,17

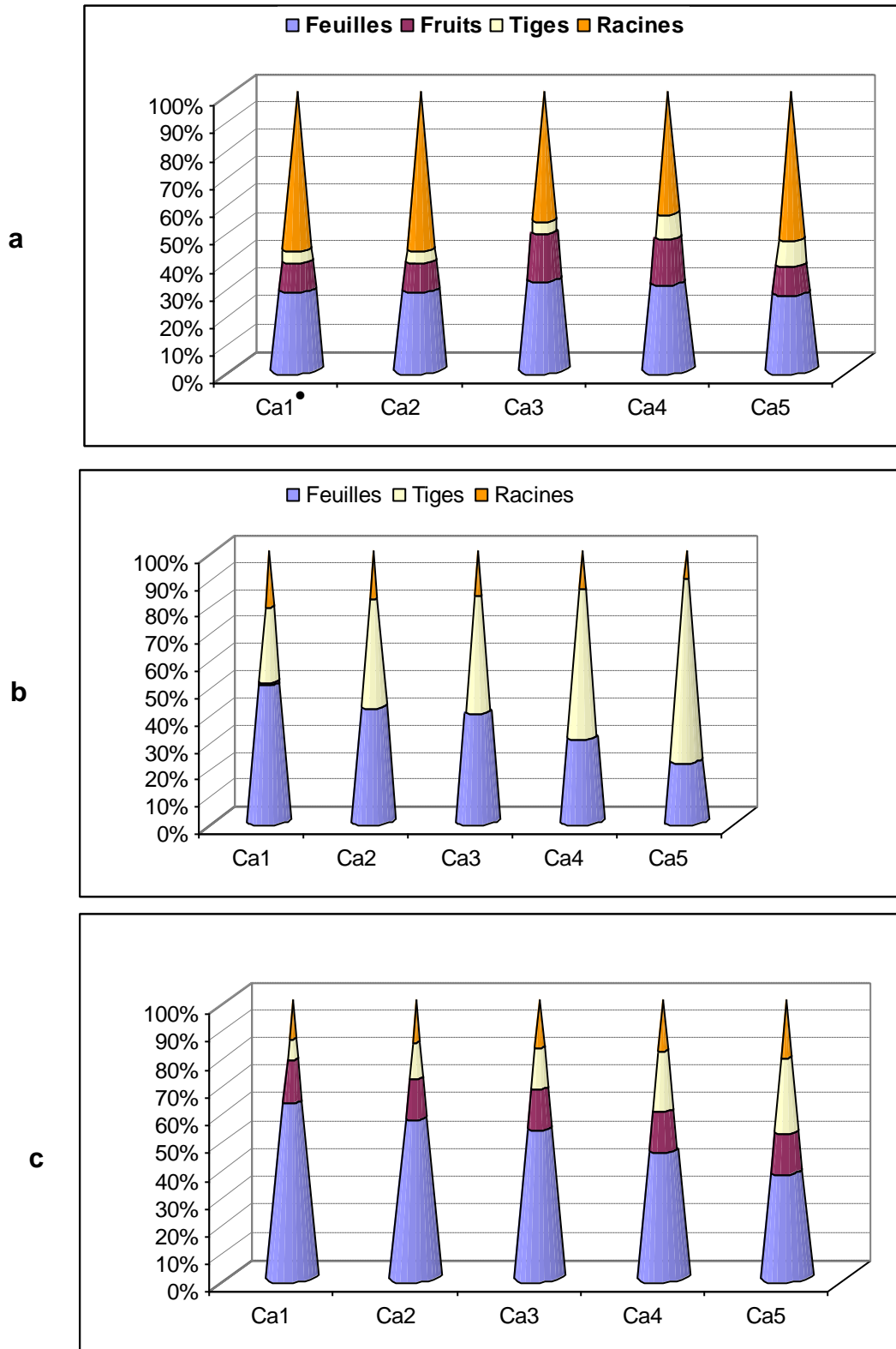
**Tableau III-76 : Teneur totales moyennes (mg/kg sur matière sèche) des éléments traces métalliques dans les différentes parties des plantes étudiées de l'année 2009.**

<b>Poivron</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
Feuilles	4,11 ±0,23	0,80 ±0,24	4,99 ±0,35	731,03 ±17,77	5,08 ±0,99	22,71 ±1,58	2,01 ±0,32	1,19 ±0,06	0,40 ±0,02
Fruits	0,003 ±0,001	1,31 ±0,39	20,26 ±1,44	498,52 ±11,87	8,27 ±1,62	18,10 ±1,26	0,01 ±0,002	1,24 ±0,07	0,32 ±0,02
Tige	1,50 ±0,45	1,18 ±0,35	5,02 ±0,35	301,19 ±12,42	3,66 ±0,71	24,25 ±1,69	1,74 ±0,28	0,97 ±0,05	0,29 ±0,01
Racines	<b>DL</b>	4,90 ±1,48	21,15 ±1,50	779,15 ±18,35	21,32 ± 4,18	49,82 ±3,47	3,21 ± 0,51	9,51 ±0,51	3,01 ±0,16
<b>Total</b>	5,61	8,19	51,41	2309,89	38,33	114,88	6,97	12,91	4,02
<b>Artichaut</b>									
Feuilles	29,31 ±8,82	1,01 ±0,30	22,22 ±1,58	940,01 ±26,02	7,79 ±1,52	40,17 ±2,80	1,57 ±0,25	12,67 ±0,69	1,53 ±0,08
Tige	2,90 ±0,87	0,05 ±0,01	7,38 ±0,52	204,42 ±9,15	10,09 ±1,97	8,82 ±0,61	1,63 ±0,26	2,40 ±0,13	0,02 ±0,001
Racines	1,19 ±0,35	0,14 ±0,04	4,08 ±0,29	37,02 ±2,90	4,93 ±0,96	9,78 ±0,68	1,09 ±0,17	26,06 ±1,42	0,86 ±0,04
<b>Total</b>	33,40	1,20	33,68	1181,45	22,81	58,77	4,29	41,13	2,41
<b>Raisin</b>									
Feuilles	13,55 ±4,08	2,11 ±0,63	15,16 ±1,08	500,47 ±12,34	6,34 ±1,24	45,05 ±3,14	0,90 ±0,14	10,09 ±0,55	<b>DL</b>
Fruits	4,19 ±1,26	0,59 ±0,17	8,20 ±0,58	66,32 ±5,94	7,22 ±1,41	7,09 ±0,49	4,48 ±0,72	2,22 ±0,12	1,09 ± 0,05
Tige	2,09 ±0,62	0,11 ±0,03	5,92 ±0,42	206,75 ±4,71	4,65 ±0,91	14,58 ±1,01	0,01 ±0,001	6,01 ±0,32	1,75 ± 0,09
Racines	0,53 ±0,16	0,14 ±0,04	3,79 ±0,27	186,13 ±14,75	3,21 ±0,62	13,56 ±0,94	1,41 ±0,22	39,76 ±2,16	17,01 ± 0,92
<b>Total</b>	20,36	2,95	33,07	959,67	21,42	80,28	6,79	58,08	19,85

*Tableau III-77: Teneur totales moyennes (mg/kg sur matière sèche) des éléments traces métalliques dans les différentes parties des plantes étudiées de l'année 2010.*

<b>Poivron</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
Feuilles	4,92 ±1,481	0,86 ±0,260	5,02 ±0,358	1340,02 ±32,21	16,73 ±1,28	23,22 ± 1,62	3,97 ± 0,64	2,82 ± 0,15	0,48 ± 0,02
Fruits	<b>DL</b>	1,99 ±0,601	28,56 ± 2,035	623,22 ±9,85	41,55 ±1,14	20,77 ±1,44	<b>DL</b> *	2,01 ±0,11	0,49 ±0,02
Tige	1,32 ±0,397	2,13 ±0,643	5,14 ±0,366	419,81 ±5,94	4,13 ±0,81	30,13 ± 2,10	3,02 ±0,48	1,27 ±0,06	0,32 ±0,01
Racines	<b>DL</b>	6,12 ±1,848	23,35 ±1,663	863,94 ±27,73	46,70 ± 2,15	51,53 ± 3,59	4,03 ±0,65	12,09 ± 0,65	3,19 ±0,17
<b>Total</b>	6,24	11,10	62,07	3246,99	109,11	125,65	11,02	18,19	4,48
<b>Artichaut</b>									
Feuilles	38,13 ±8,48	0,82 ±0,24	24,15 ±1,72	1194,90 ±28,31	10,93 ±2,14	46,29 ±3,23	2,88 ±0,46	17,11 ± 0,93	1,82 ±0,09
Tige	1,67 ±0,50	0,04 ±0,01	2,95 ± 0,21	349,72 ±8,09	12,34 ± 2,42	8,48 ±0,59	1,82 ±0,29	3,14 ±0,17	0,04 ±0,002
Racines	0,83 ±0,25	0,20 ±0,06	3,99 ±0,28	37,15 ±1,93	5,09 ±0,99	10,10 ±0,70	1,79 ±0,28	30,75 ±1,67	1,09 ±0,05
<b>Total</b>	40,63	1,06	31,09	1581,77	28,36	64,87	6,49	51,00	2,95
<b>Raisin</b>									
Feuilles	19,24 ±5,79	0,65 ±0,19	13,75 ±0,98	572,83 ±37,73	7,93 ±1,55	49,88 ±3,48	1,82 ±0,29	11,20 ±0,61	<b>DL</b>
Fruits	4,77 ±1,43	0,65 ±0,19	5,64 ±0,40	67,24 ±3,16	9,11 ±1,78	7,81 ±0,54	5,42 ±0,87	4,03 ± 0,22	2,19 ±0,11
Tige	3,52 ±1,06	0,15 ±0,04	5,59 ±0,39	225,77 ±5,28	7,04 ±1,38	14,80 ±1,03	<b>DL</b>	7,82 ±0,42	3,22 ±0,17
Racines	0,65 ±0,19	0,14 ±0,04	2,47 ±0,17	43,85 ±2,54	2,25 ±0,44	15,29 ±1,06	1,46 ±0,23	45,08 ±2,45	23,17 ±1,26
<b>Total</b>	28,18	1,59	27,45	909,68	26,33	87,78	8,70	68,13	28,58

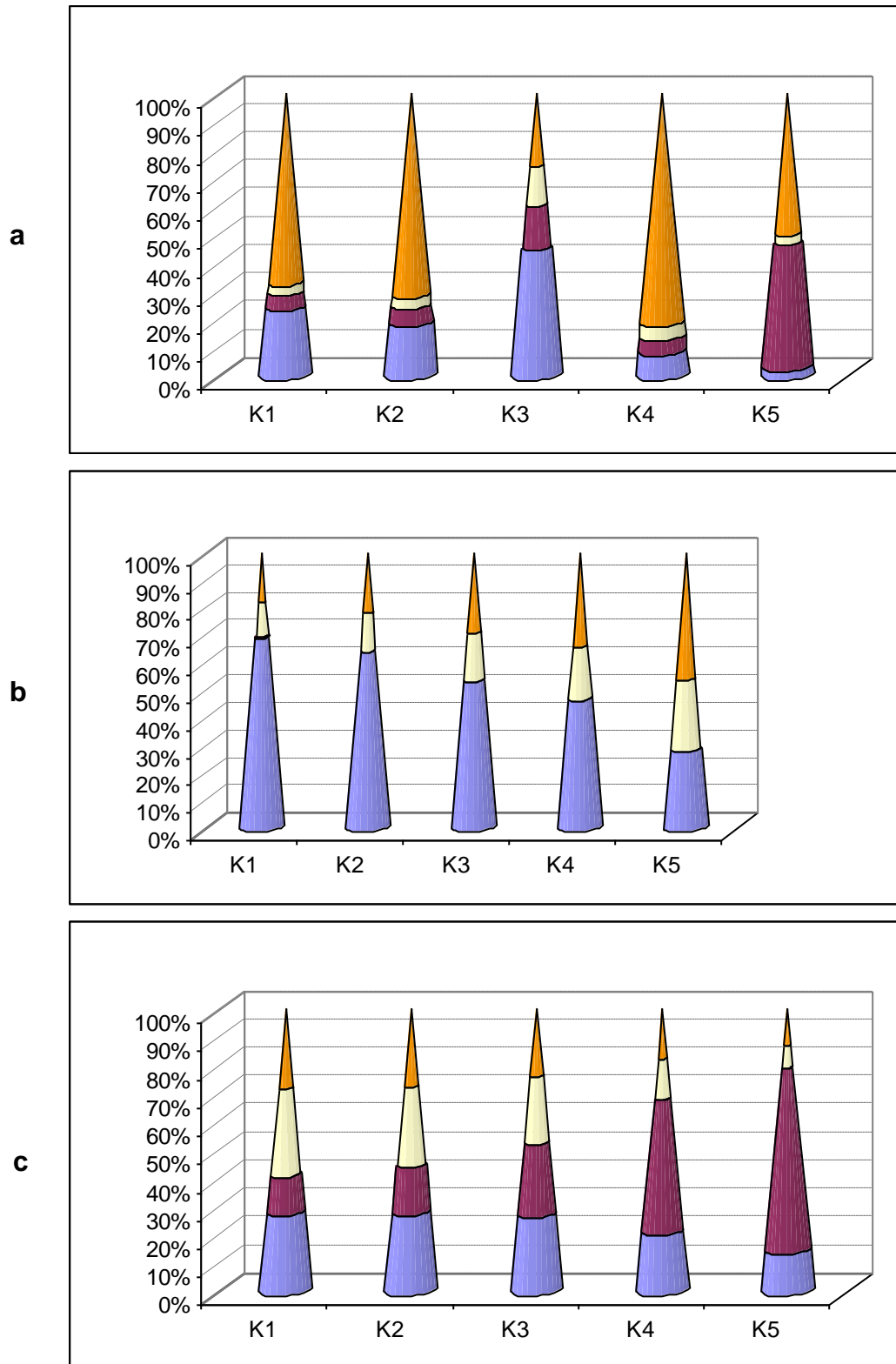
\* **DL**: inférieur à la limite de détection du métal (partie expérimentale) / ou non détecté (nd)



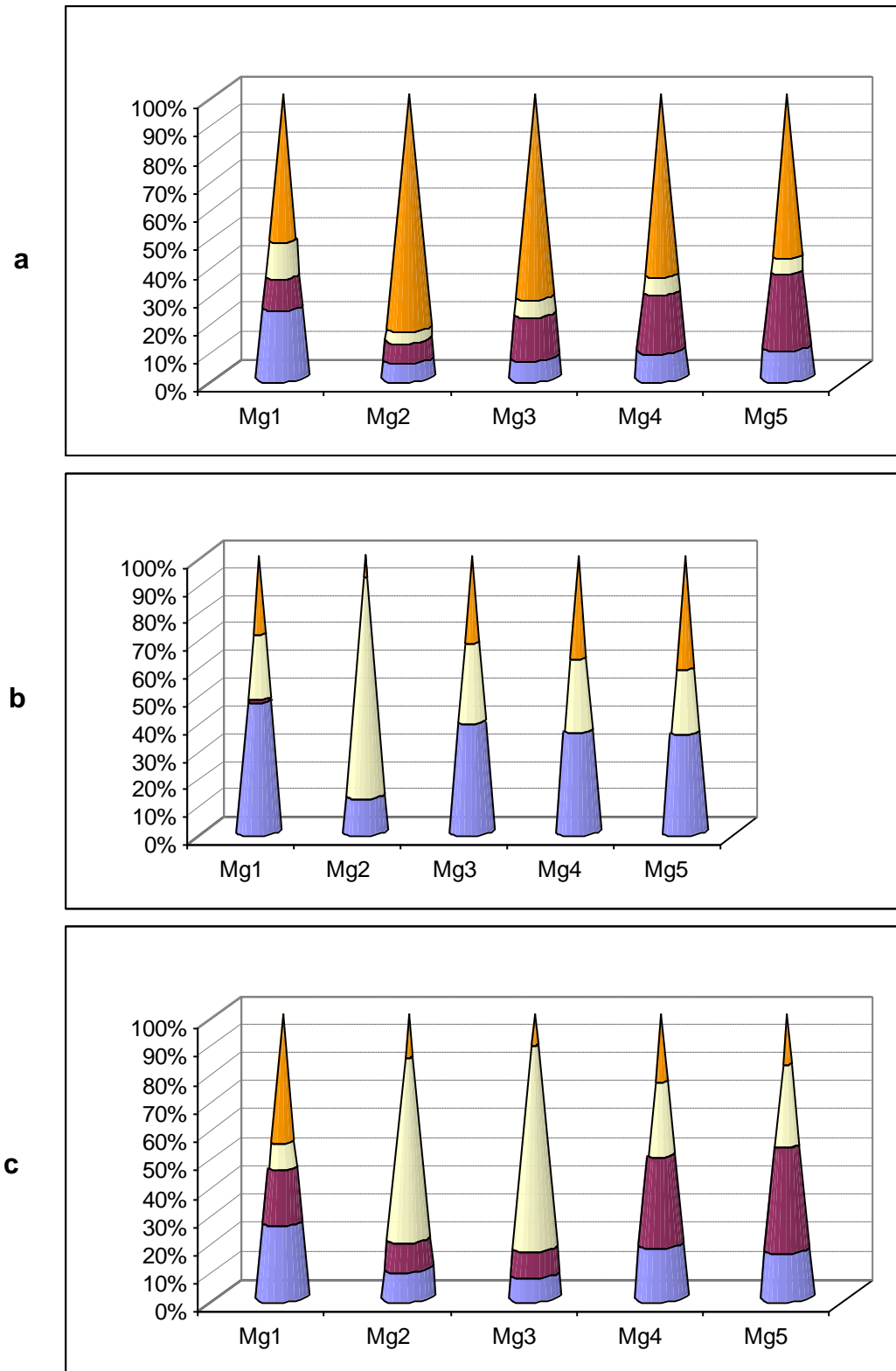
**Figure III-61:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en calcium (en % moyen du contenu total) dans les différentes organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).

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

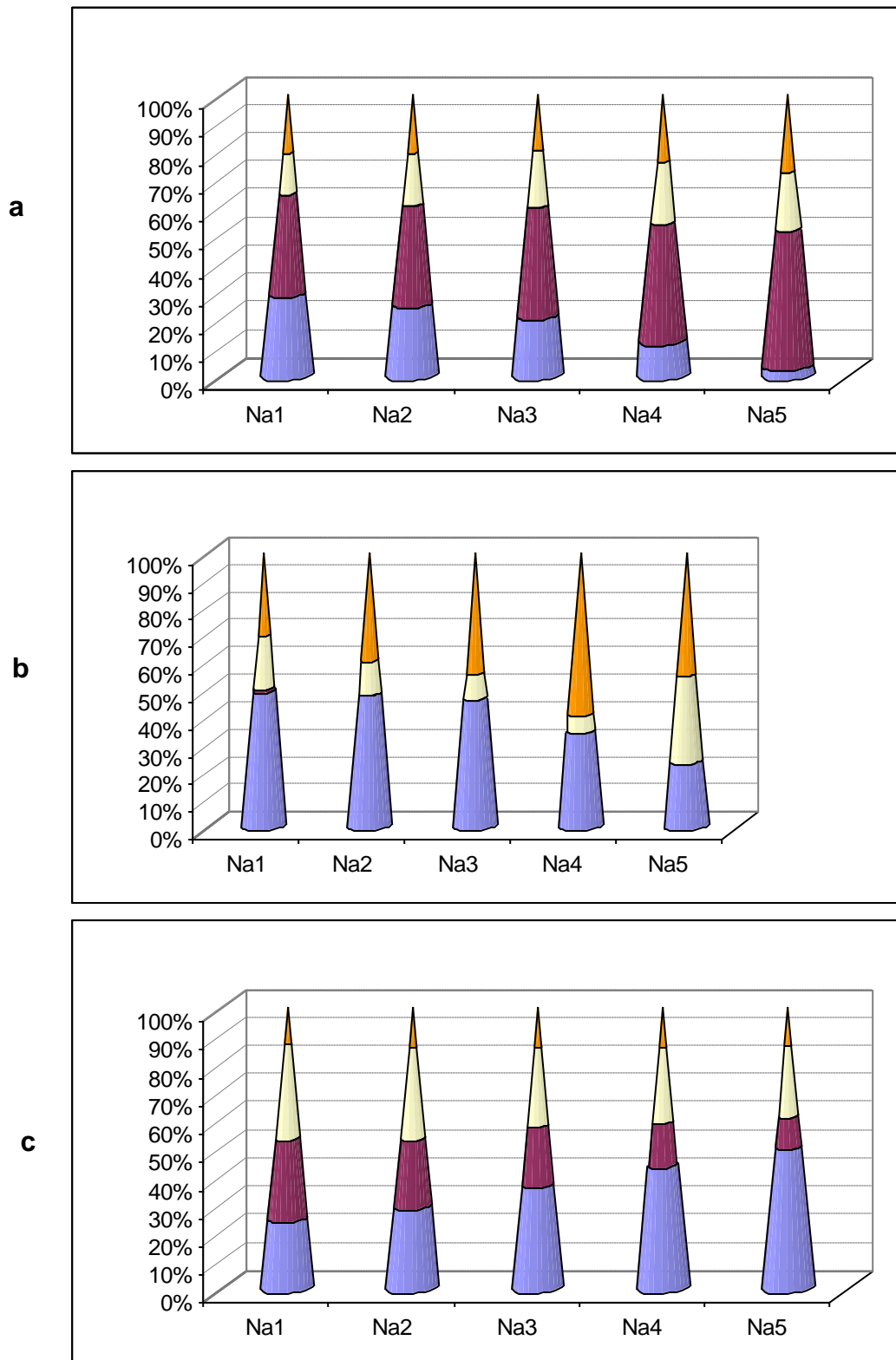




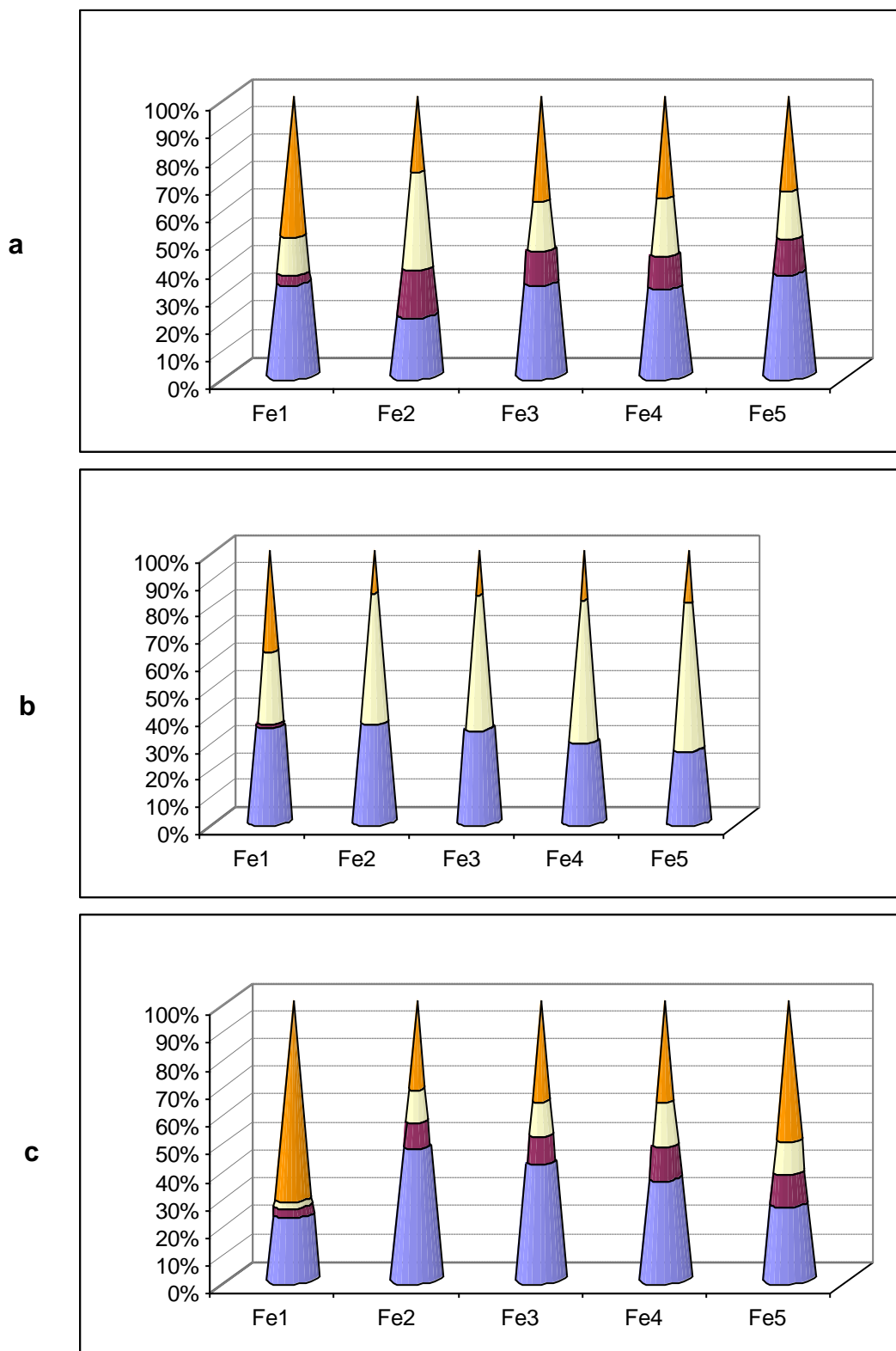
**Figure III-62:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en potassium (en % moyen du contenu total) dans les différentes organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).



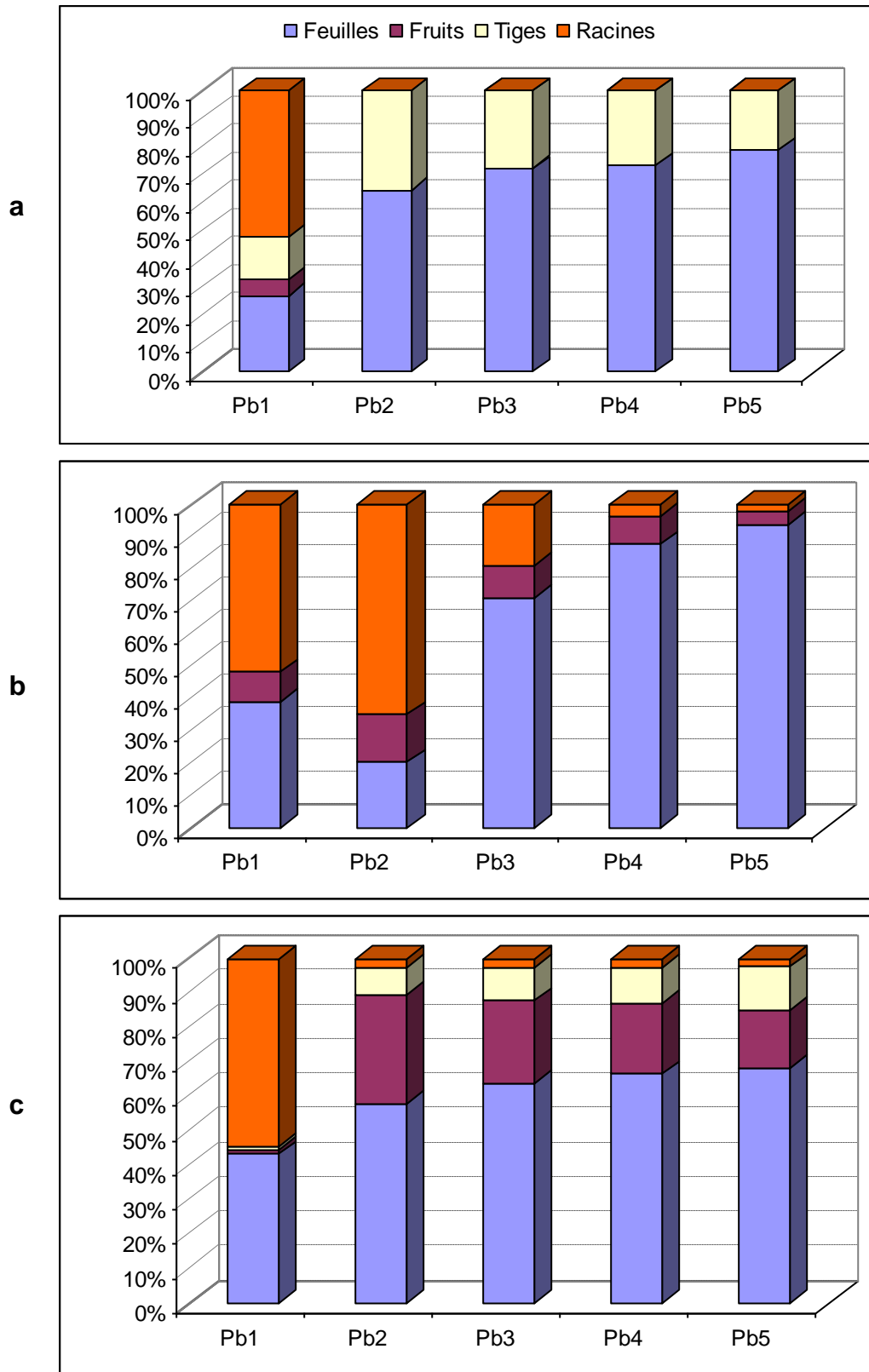
**Figure III-63:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en magnésium (en % moyen du contenu total) dans les différentes organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).



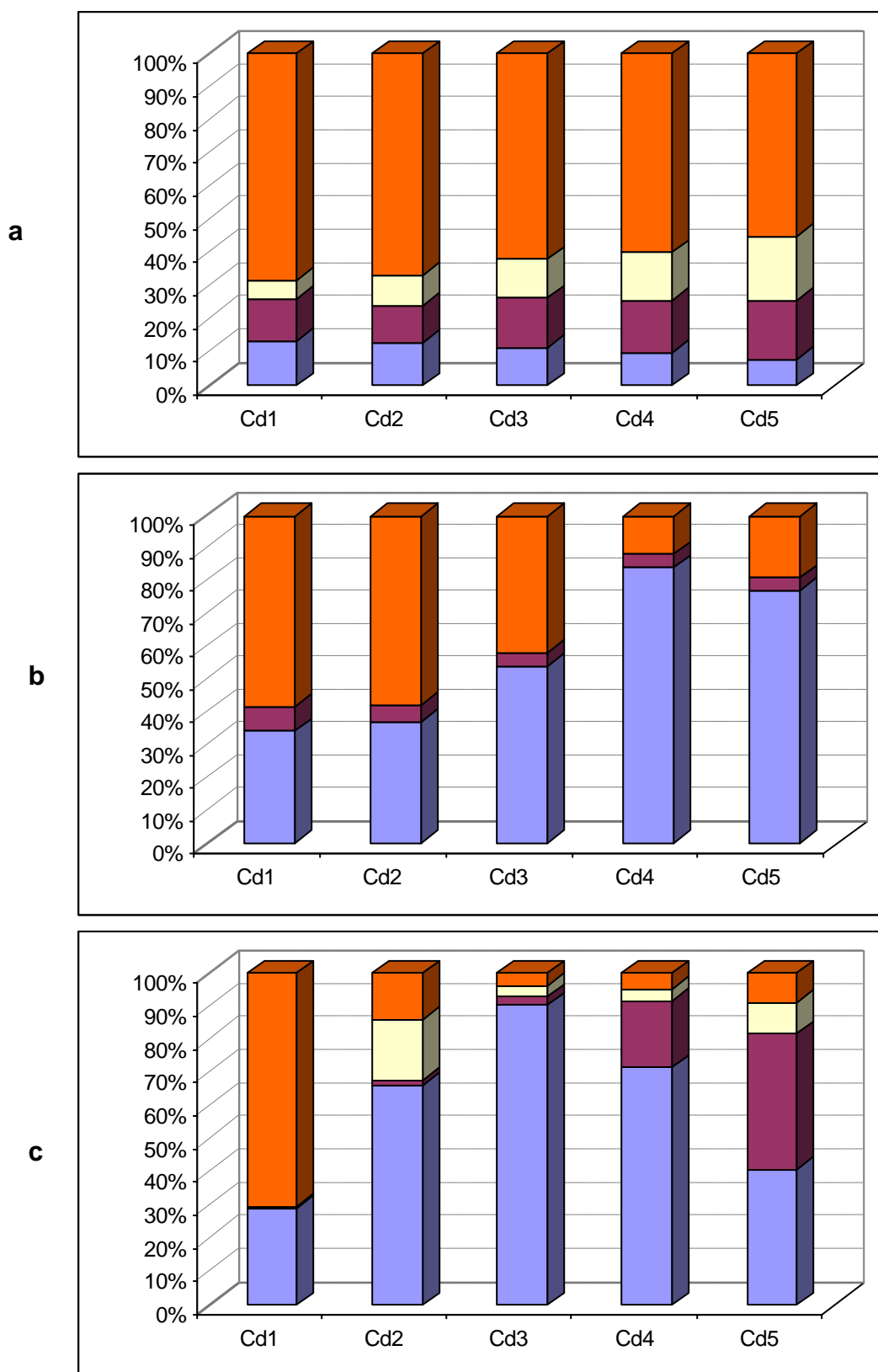
**Figure III-64:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en sodium (en % moyen du contenu total) dans les différentes organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).



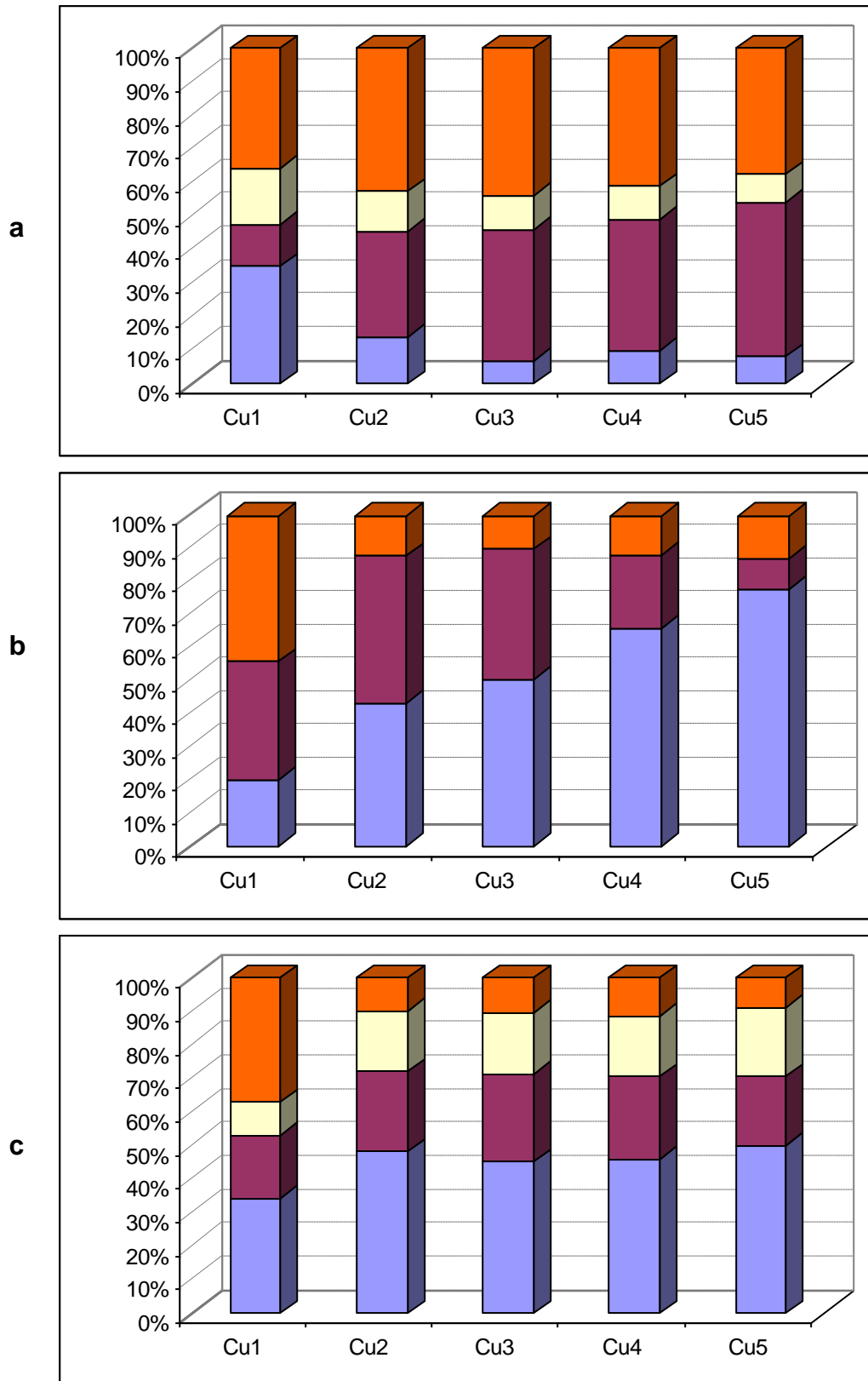
**Figure III-65:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en fer (en % moyen du contenu total) dans les différentes organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).



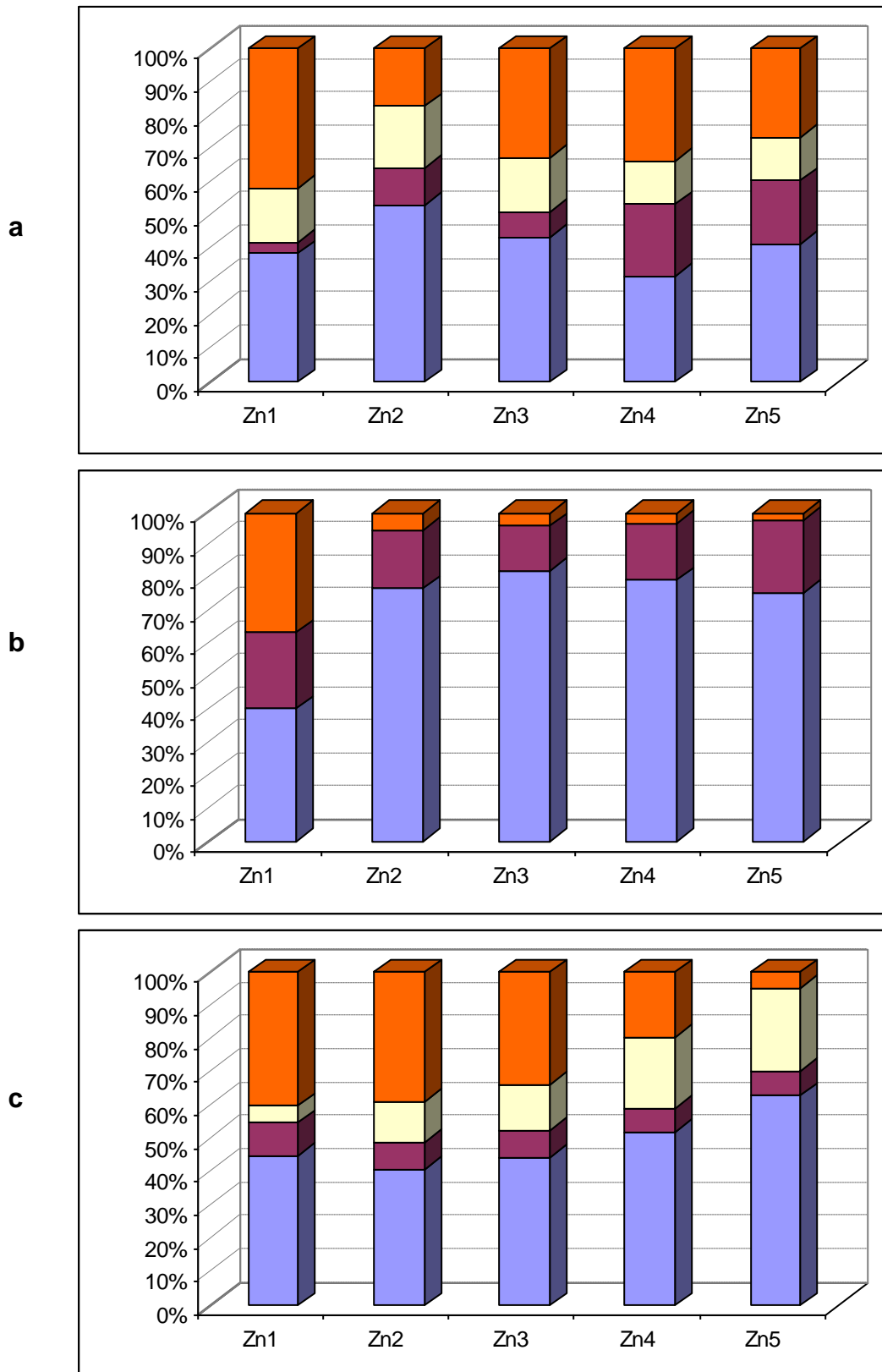
**Figure III-66:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en plomb (en % moyen du contenu total) dans les différentes organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).



**Figure III-67:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en cadmium (en % moyen du contenu total) dans les différents organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).

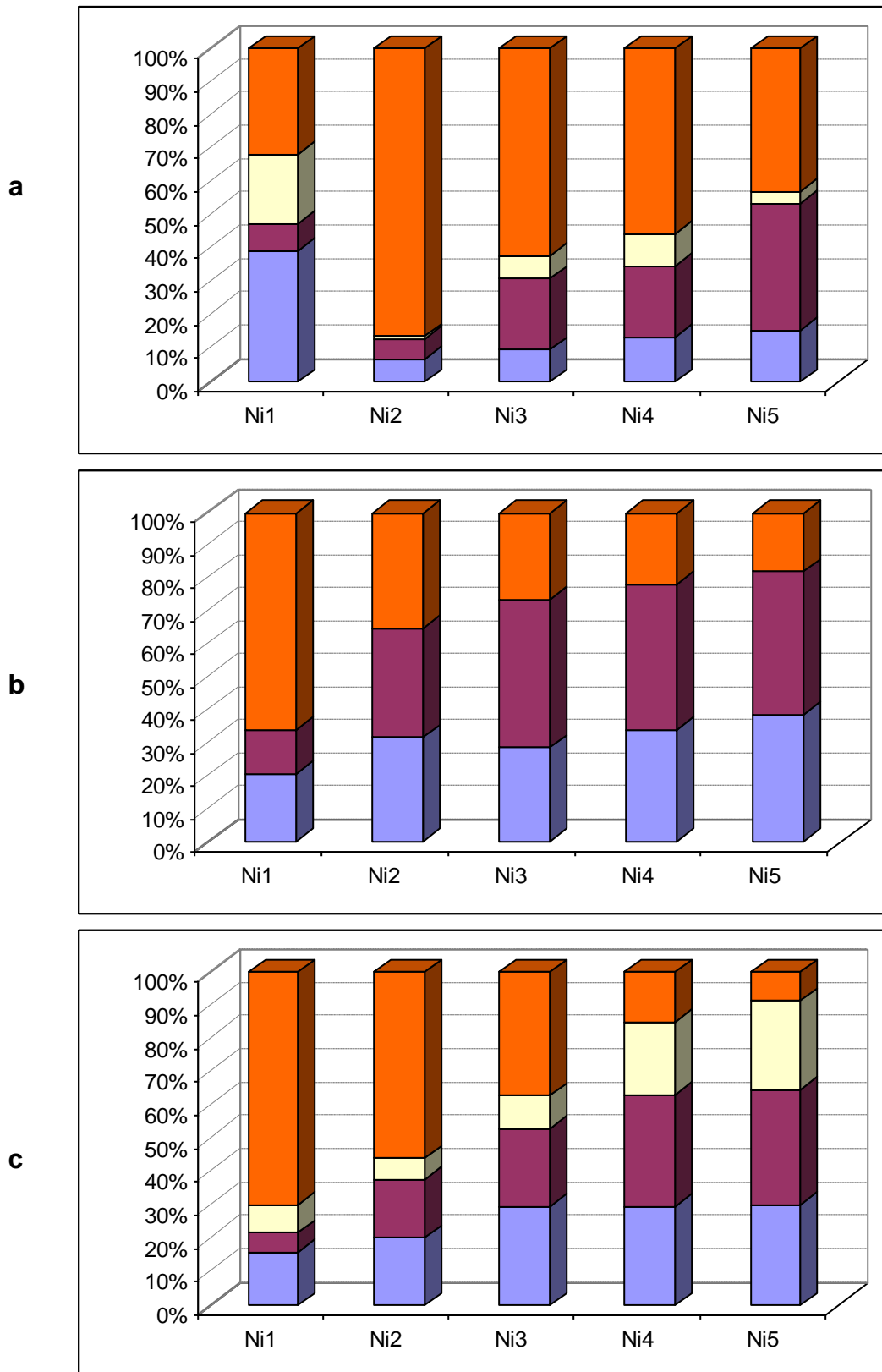


**Figure III-68:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en cuivre (en % moyen du contenu total) dans les différentes organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).

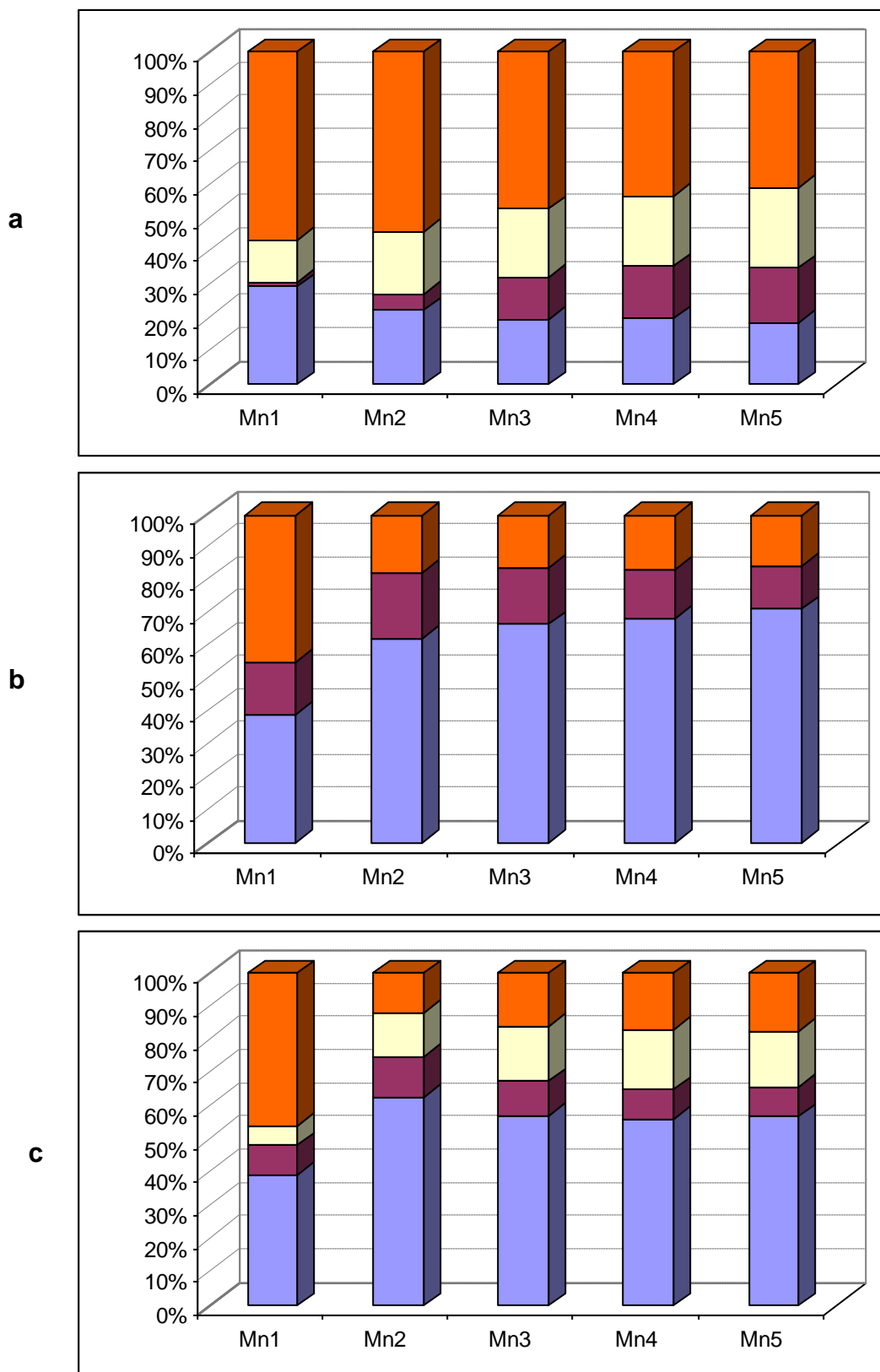


**Figure III-69:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en zinc (en % moyen du contenu total) dans les différents organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).

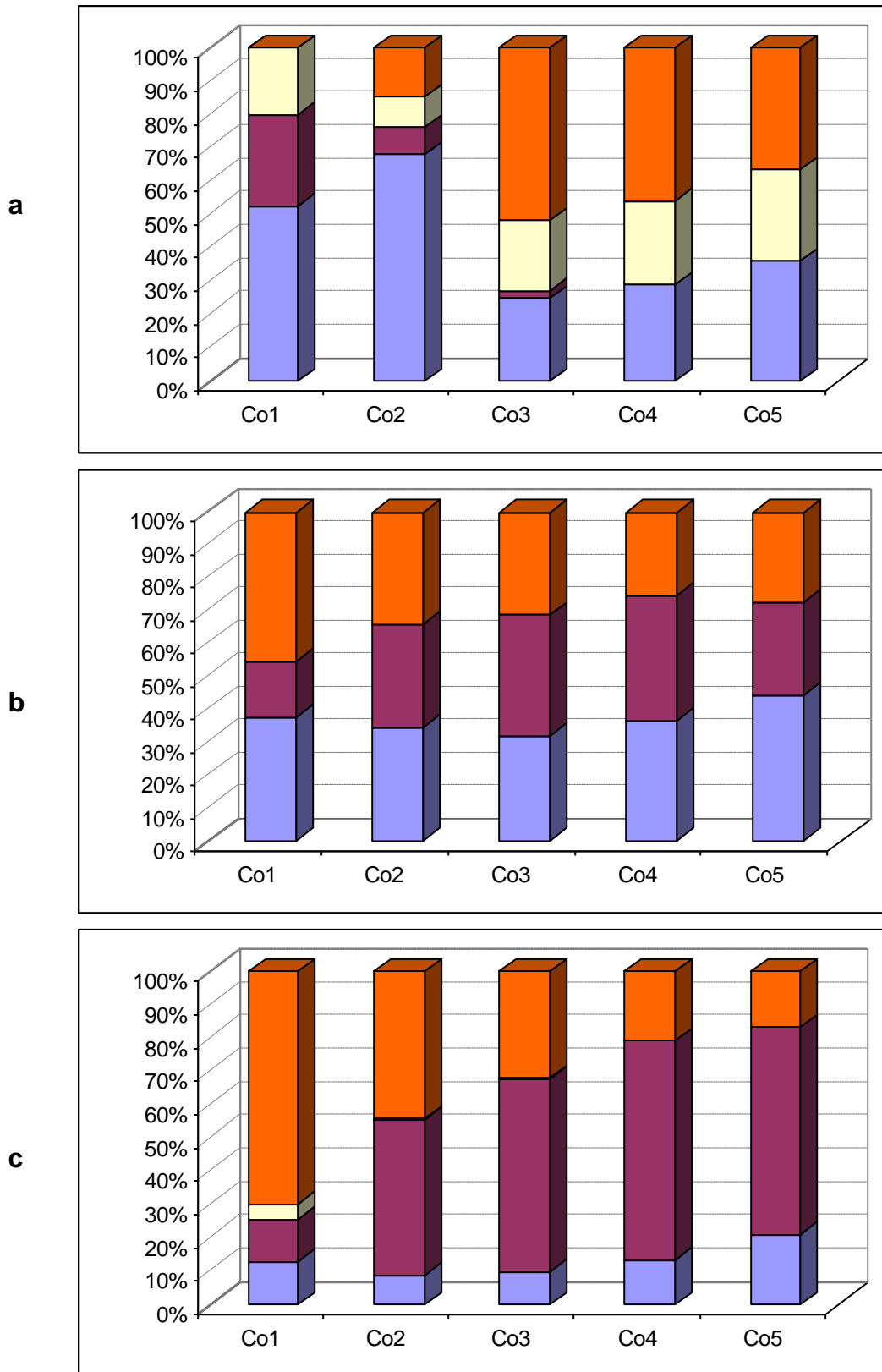




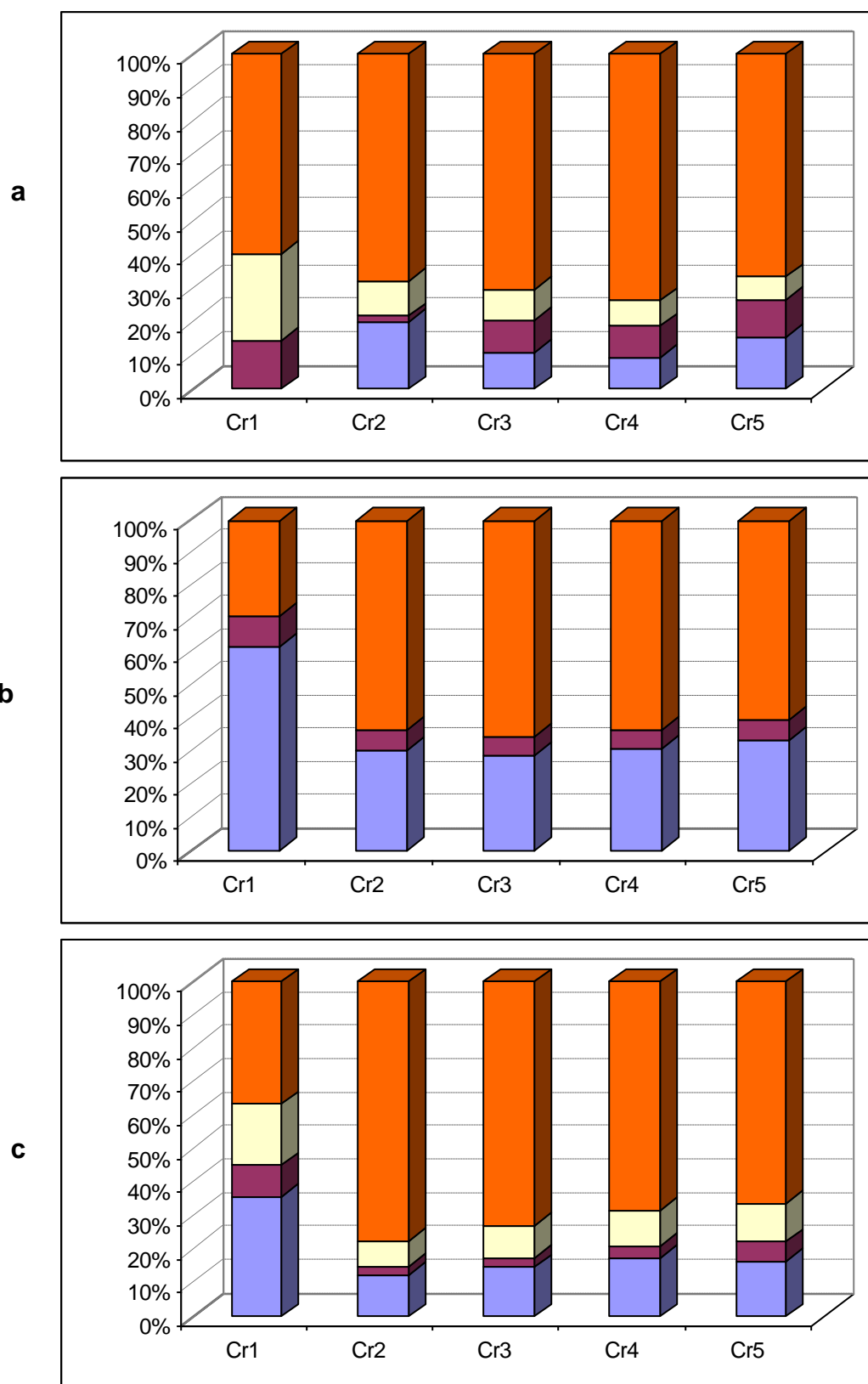
**Figure III-70:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en nickel (en % moyen du contenu total) dans les différents organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).



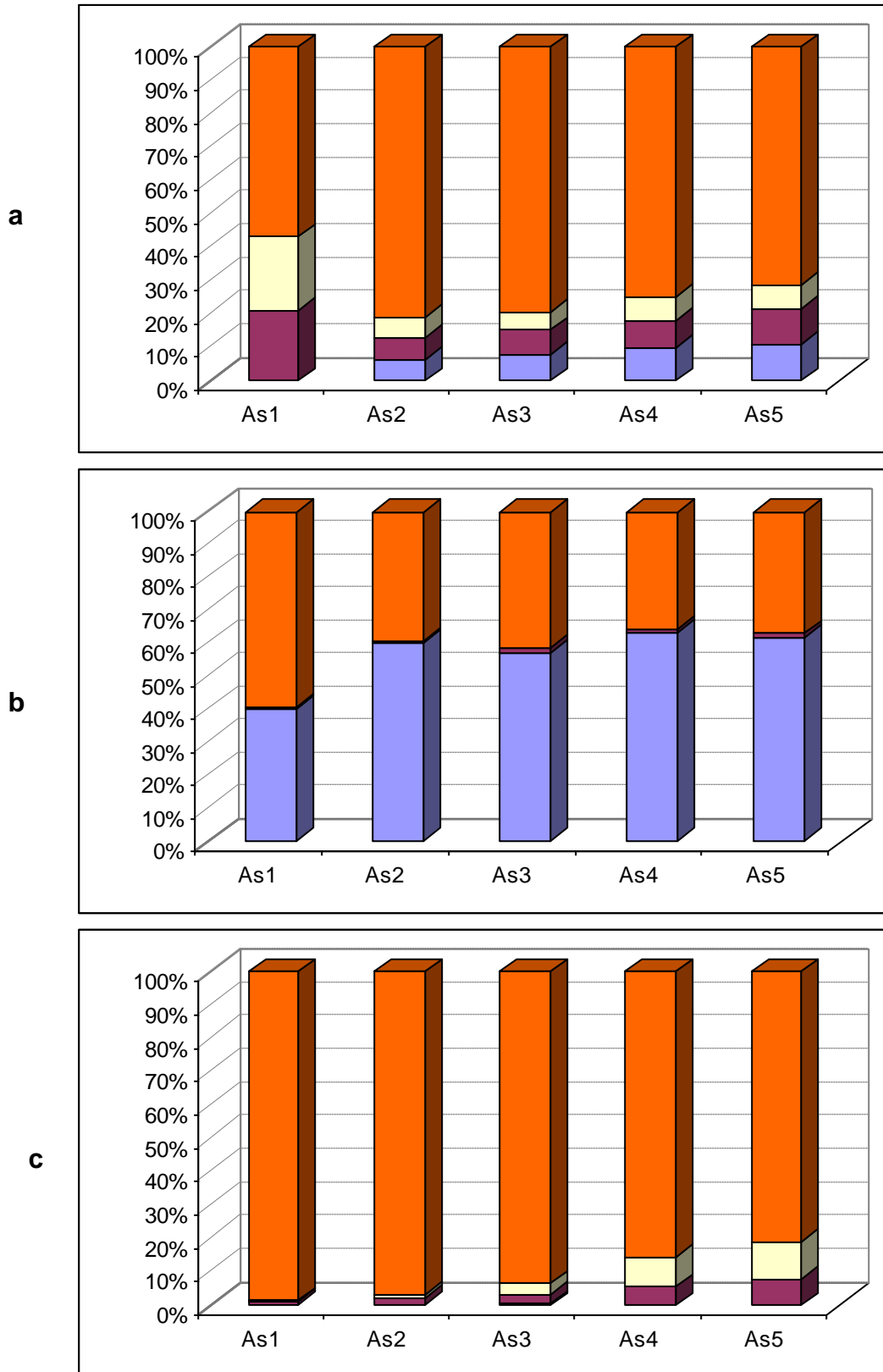
**Figure III-71:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en manganèse (en % moyen du contenu total) dans les différents organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).



**Figure III-72:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en cobalt (en % moyen du contenu total) dans les différentes organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).



**Figure III-73:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en chrome (en % moyen du contenu total) dans les différents organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).



**Figure III-74:** Histogrammes illustrant l'évolution et la répartition en arsenic (en % moyen du contenu total) dans les différents organes dans " a" **poivron**, " b" **artichaut** et " c" **raisin** de l'année 2006 à 2010 (extrait par l'eau régale).

Ces résultats permettront de déterminer d'une part la contamination des plantes et le taux d'accumulation dans leurs différents organes et d'une part de faire une comparaison annuelle entre les plantes.

### III.2.1. Variation annuelle en éléments majeures dans les différents organes des plantes étudiées

#### III.2.1.1. Pour le calcium

- Le Ca dans le poivron se concentre préférentiellement dans l'ordre décroissant:

$$[\text{Ca}]_{\text{racines}} > [\text{Ca}]_{\text{feuilles}} > [\text{Ca}]_{\text{fruits}} > [\text{Ca}]_{\text{tiges}}$$

- Tandis que dans l'artichaut, le Ca s'accumule dans la séquence suivante:

$$[\text{Ca}]_{\text{tiges}} > [\text{Ca}]_{\text{feuilles}} > [\text{Ca}]_{\text{racines}}$$

- Quant au raisin, le Ca se répartit dans l'ordre suivant:

$$[\text{Ca}]_{\text{fruits}} > [\text{Ca}]_{\text{tiges}} > [\text{Ca}]_{\text{racines}} > [\text{Ca}]_{\text{feuilles}}$$

#### III.2.1.2. Pour le potassium

Durant, les années 2006-2009, l'ion potassium se trouve en grande quantité dans les racines et les feuilles du poivron et d'artichaut. En 2010, il se concentre uniquement dans les fruits.

Cependant dans le raisin, le potassium se répartit moyennement dans les feuilles, les tiges et les racines. Par contre durant les années 2009 et 2010, le potassium se concentre uniquement dans les fruits.

#### III.2.1.3. Pour le Magnésium

Durant les cinq années on a constaté que la distribution du Mg est différente dans les trois espèces étudiées:

- le Mg dans le poivron a une tendance de se concentrer dans ses parties selon la séquence suivante:

$$[\text{Mg}]_{\text{racines}} > [\text{Mg}]_{\text{fruits}} > [\text{Mg}]_{\text{feuilles}} > [\text{Mg}]_{\text{tiges}}$$

- le Mg dans l'artichaut s'accumule dans l'ordre suivant:

$$[\text{Mg}]_{\text{feuilles}} > [\text{Mg}]_{\text{racines}} > [\text{Mg}]_{\text{tiges}} \text{ (2006-2009);}$$

$$[\text{Mg}]_{\text{racines}} > [\text{Mg}]_{\text{feuilles}} > [\text{Mg}]_{\text{tiges}} \text{ en 2010.}$$

- le Mg dans le raisin se trouve dans l'ordre des teneurs décroissantes:

$$[\text{Mg}]_{\text{fruits}} > [\text{Mg}]_{\text{tiges}} > [\text{Mg}]_{\text{racines}} > [\text{Mg}]_{\text{feuilles}}$$

#### III.2.1.4. Pour le sodium

- Le Na est localisé dans le poivron comme suit:

$$[\text{Na}]_{\text{fruits}} > [\text{Na}]_{\text{racines}} > [\text{Na}]_{\text{tiges}} > [\text{Mg}]_{\text{feuilles}}.$$

- Le Na se concentre dans l'artichaut comme suit:

$$[\text{Na}]_{\text{feuilles}} > [\text{Na}]_{\text{racines}} > [\text{Na}]_{\text{tige}}.$$

- Dans le raisin, le Na se trouve selon la séquence suivante:

$$[\text{Na}]_{\text{feuilles}} > [\text{Na}]_{\text{tiges}} > [\text{Na}]_{\text{fruits}} > [\text{Na}]_{\text{racines}}.$$

#### III.2.1.5. Pour le Fer

Les teneurs moyennes détectées dans les différents organes, sont comme suit:

- feuilles: entre (0,1 et 0,9) g/kg pour le poivron, entre (0,40 et 0,86) g/kg pour l'artichaut et entre (0,21 et 0,29) g/kg pour le raisin;
- fruits: entre (0,01 et 0,31) g/kg pour le poivron et (0,04 et 0,09) g/kg pour le raisin;
- tiges: entre (0,04 et 0,40) g/kg pour le poivron, entre (0,63 et 0,70) g/kg pour l'artichaut et (0,03 et 0,09) g/kg pour le raisin;
- racines: entre (0,14 et 0,83) g/kg pour le poivron, entre (0,22 et 0,89) g/kg pour l'artichaut et entre (0,18 et 0,89) g/kg pour le raisin.

Selon ces valeurs, le Fe est accumulé dans les feuilles et les racines des trois plantes.

Par ailleurs, ces valeurs dépassent largement les normes définies dans le tableau I-6 (150 mg/kg) et sont inférieures au seuil de toxicité (1 g/kg) (tableau I-5).

### III.2.2. Variation annuelle en éléments trace métalliques dans les différents organes des plantes

#### III.2.2.1. Variation des teneurs des métaux en 2006

##### i. Pour le plomb

Le Pb se concentre dans les racines et les feuilles du poivron, d'artichaut et du raisin avec respectivement des teneurs  $(6,48 \pm 1,95)$  et  $(3,35 \pm 1,01)$  mg/kg;  $(19,83 \pm 5,97)$  mg/kg et  $(14,87 \pm 4,47)$  mg/kg;  $(78,67 \pm 13,68)$  mg/kg et  $(62,38 \pm 8,78)$  mg/kg.

##### ii. Pour le cadmium

Le Cd se trouve majoritairement dans les racines et les feuilles de l'artichaut et le raisin avec respectivement des teneurs  $(2,54 \pm 0,76)$  mg/kg et  $(1,50 \pm 0,45)$  mg/kg;  $(7,74 \pm 2,33)$  mg/kg et  $(3,22 \pm 0,972)$  mg/kg.

Par contre dans le poivron, il est reparti moyennement dans les racines, les feuilles et les fruits avec une teneur maximale de  $(0,74 \pm 0,22)$  mg/kg.

### **iii. Pour le cuivre**

Le Cu est présent essentiellement dans les racines et les feuilles du poivron et du raisin avec respectivement des teneurs  $(3,76 \pm 0,26)$  mg/kg et  $(3,68 \pm 0,26)$  mg/kg;  $(27,34 \pm 1,94)$  mg/kg et  $(25,40 \pm 1,80)$  mg/kg.

Par contre dans l'artichaut, il se trouve dans les racines et les tiges avec respectivement des teneurs  $(28,76 \pm 2,04)$  mg/kg et  $(23,34 \pm 1,66)$  mg/kg.

### **iv. Pour le zinc**

Le Zn a montré une présence dans les différentes parties des plantes à savoir:

- dans le poivron, dans les racines et les feuilles avec respectivement des teneurs  $(245,05 \pm 2,92)$  mg/kg et  $(225,45 \pm 4,210)$  mg/kg;
- dans l'artichaut, dans les feuilles, les racines et les tiges avec respectivement des teneurs  $(153,61 \pm 16,93)$  mg/kg,  $(138,38 \pm 3,27)$  mg/kg et  $(87,88 \pm 11,13)$  mg/kg;
- dans le raisin, dans les feuilles et les racines avec respectivement des teneurs  $(303,74 \pm 3,03)$  mg/kg et  $(272,27 \pm 5,46)$  mg/kg.

### **v. Pour le nickel**

Dans l'artichaut et le raisin, le Ni est présent essentiellement dans les racines et les feuilles avec respectivement des teneurs  $(6,45 \pm 1,26)$  mg/kg et  $(2,04 \pm 0,40)$  mg/kg;  $(2,82 \pm 0,55)$  mg/kg et  $(0,65 \pm 0,12)$  mg/kg.

### **vi. Pour le manganèse**

Le Mn se concentre dans les racines, les feuilles et les tiges du poivron, d'artichaut et du raisin avec respectivement des teneurs  $(30,43 \pm 2,12)$  mg/kg,  $15,83 \pm 1,10$  mg/kg et  $6,86 \pm 0,47$  mg/kg);  $(34,36 \pm 2,39)$  mg/kg,  $30,04 \pm 2,09$  mg/kg et  $12,33 \pm 0,86$  mg/kg) et  $(42,35 \pm 2,95)$  mg/kg,  $36,10 \pm 2,51$  mg/kg et  $8,19 \pm 0,57$  mg/kg).

### **vii. Pour le cobalt**

Le Co est présent faiblement dans les différents organes des trois plantes.



#### viii. Pour le chrome

Le Cr est présent faiblement dans toutes les parties du poivron. Alors qu'il s'accumule dans les feuilles et les racines de l'artichaut et du raisin avec respectivement des teneurs ( $7,63 \pm 0,41$  mg/kg et  $3,56 \pm 0,19$  mg/kg); ( $2,92 \pm 0,15$  mg/kg et  $2,98 \pm 0,16$  mg/kg).

#### ix. Pour l'arsenic

L'As est présent faiblement dans toutes les parties des trois plantes avec une teneur maximale de ( $1,54 \pm 0,08$ ) mg/kg.

### III.2.2. Evolution métallique et toxicité en éléments traces métallique (ETM)

Durant les années d'études, l'accumulation des métaux dans les plantes a évolué comme suit:

#### ✓ Pour le plomb

Le Pb est concentré majoritairement dans les feuilles des plantes allons de ( $3,11 \pm 0,93$ ) mg/kg à ( $4,92 \pm 1,48$ ) mg/kg pour **le poivron**; de ( $4,78 \pm 1,43$ ) mg/kg à ( $38,13 \pm 8,48$ ) mg/kg pour **l'artichaut** et de ( $7,15 \pm 2,15$ ) mg/kg à ( $19,24 \pm 5,79$ ) mg/kg pour **le raisin**.

Les fruits **du raisin** ont eu une teneur maximale en 2010 de ( $4,77 \pm 1,43$ ) mg/kg.

Pour les racines d'artichaut, ils ont révélé une teneur importante en Pb de ( $15,40 \pm 2,63$ ) mg/kg en 2007, depuis ils n'ont accumulé que de faible teneur de l'ordre de ( $0,83 \pm 0,25$ ) mg/kg en 2010, alors que celles du raisin et du poivron, ils ont révélé de très faibles teneurs de l'ordre de ( $0,65 \pm 0,19$ ) mg/kg à non détectable (nd).

Les tiges et les fruits du poivron et les tiges d'artichaut ont enregistré des teneurs de moins en moins faible durant les années d'étude, alors que dans le raisin, ils ont tendance de plus en plus à accumuler le Pb.

Par ailleurs, ces teneurs sont inférieures au teneur critique de toxicité **12-300** mg/kg et dépassent la valeur normale fixée à **1** mg/kg (tableaux I-5 et I-6), sauf dans les feuilles d'artichaut et de raisin des années 2006, 2008, 2009 et 2010 où les teneurs sont dans le seuil de critique.

✓ **Pour le cadmium**

Durant, les années 2007-2010, les teneurs importantes enregistrées sont:

**Dans le poivron,**

- (3,71 ±1,12) mg/kg en 2007 dans les racines;
- (0,92 ±0,27) mg/kg et (3,82 ±1,15) mg/kg en 2008 dans les fruits et les racines;
- (1,31 ±0,39) mg/kg et (1,99 ±0,60) mg/kg; (1,18 ±0,35) mg/kg et (2,13 ±0,64) mg/kg; (4,90 ±1,48) mg/kg et (6,12 ±1,84) mg/kg en 2009 et 2010 dans les fruits, les tige et les racines.

**Dans l'artichaut,** l'évolution en Cd dans les feuilles, les tiges et les racines est décroissante, elle est telle que [(1,30 ±0,39), (0,18 ±0,05) et (2,02 ±0,61)] mg/kg en 2007; [(1,21 ±0,36), (0,09 ±0,02) et (0,93 ±0,28)] mg/kg en 2008; [(1,01 ±0,305), (0,05 ±0,01) et (0,14 ±0,04)] mg/kg en 2009 et [(0,82 ±0,24), (0,04 ±0,01) et (0,20 ±0,06)] mg/kg en 2010.

**Dans le raisin,** l'évolution en Cd a été marquée uniquement au niveau des feuilles où les valeurs des teneurs sont dans l'ordre décroissant (3,20 ±0,96) mg/kg en 2007 à (0,65 ±0,19) mg/kg en 2010.

Toutes ces valeurs sont normales (**0,01-1**) mg/kg, sauf dans les racines du poivron où la teneur estimée en 2010 dépasse la teneur critique toxique **5** mg/kg (tableaux I-5 et I-6).

✓ **Pour le cuivre**

Le Cu a été accumulé comme suit:

**Dans le poivron,** il se concentre majoritairement dans les fruits et les racines avec des valeurs de (8,32 ±0,59) et (11,32 ±0,80) mg/kg en 2007 et de (28,56 ±2,03) et (23,35 ±1,66) mg/kg en 2010. Dans les tiges et les feuilles, l'accumulation évolue dans le sens croissant atteignant les teneurs suivantes (5,14 ±0,36) et (5,02 ±0,35) mg/kg.

**Dans l'artichaut,** le Cu s'accumule dans les feuilles avec une teneur de (24,15 ±1,72) mg/kg et diminue dans les tiges et les racines jusqu'aux teneurs de (2,95 ±0,21) mg/kg et de (3,99 ±0,28) mg/kg en 2010.

**Dans le raisin,** l'évolution en Cu dans tous ses organes est décroissante.

Les valeurs trouvées sont dans les normes **10** mg/kg, sauf dans les fruits et les racines du poivron et les feuilles de l'artichaut où elles se trouvent dans l'intervalle de la teneur critique toxique des plantes (**20-50**) mg/kg (tableaux I-5 et I-6).

✓ **Pour le zinc**

Le Zn a montré une répartition variable dans les différentes parties des plantes:

**Dans le poivron,**

- feuilles: (432,75 ±4,05) mg/kg, tiges: (151,16 ±6,34) mg/kg, racines: (140,16 ±3,70) mg/kg et fruits: (93,12 ±2,39) mg/kg en 2007;
- feuilles: (687,72 ±16,36) mg/kg, racines: (517,57 ±10,45) mg/kg, tiges: (259,12 ±8,30) mg/kg et fruits: (117,25 ±2,19) mg/kg en 2008;
- racines:(779,15 ±18,35) mg/kg, feuilles: (731,03 ±17,77) mg/kg, fruits: (498,52 ±11,87) mg/kg et tiges: (301,19 ±12,42) mg/kg en 2009;
- feuilles: (1340,02 ±32,21) mg/kg, racines: (863,94 ±27,73) mg/kg, fruits:(623,22 ±9,85) mg/kg et tiges: (419,81 ±5,94) mg/kg en 2010.

Selon ces valeurs, il se répartit comme suit:

- [Zn]<sub>feuilles</sub> > [Zn]<sub>tiges</sub> > [Zn]<sub>racines</sub> > [Zn]<sub>fruits</sub>, en 2007;
- [Zn]<sub>feuilles</sub> > [Zn]<sub>racines</sub> > [Zn]<sub>tiges</sub> > [Zn]<sub>fruits</sub>, en 2008;
- [Zn]<sub>racines</sub> > [Zn]<sub>feuilles</sub> > [Zn]<sub>fruits</sub> > [Zn]<sub>tiges</sub>, en 2009;
- [Zn]<sub>feuilles</sub> > [Zn]<sub>racines</sub> > [Zn]<sub>fruits</sub> > [Zn]<sub>tiges</sub>, en 2010.

**Dans l'artichaut,** le Zn se concentre dans les feuilles et les tiges avec respectivement des teneurs de (450,11 ±18,23) mg/kg et de (102,21 ±4,57) mg/kg en 2007; de (730,43 ±25,63) mg/kg et de (122,39 ±9,42) mg/kg en 2008; de (940,01 ±26,02) mg/kg et de (204,42 ±9,15) mg/kg en 2009 et de (1194,90 ±28,31) mg/kg et de (349,72 ±8,09) mg/kg en 2010.

**Dans le raisin,** il s'accumule principalement dans les feuilles avec des teneurs de (361,77 ±6,98) mg/kg en 2007; de (409,15 ±18,38) mg/kg en 2008; de (500,47 ±12,34) mg/kg en 2009 et de (572,83 ±37,73) mg/kg en 2010.

Dans les autres parties du raisin la présence du Zn est la suivante:

- [Zn]<sub>racines</sub> > [Zn]<sub>tiges</sub> > [Zn]<sub>fruits</sub>:  
(343,15 ±8,51) mg/kg, (107,75 ±5,90) mg/kg et (71,13 ±7,10) mg/kg en 2007;  
(309,97 ±4,53) mg/kg, (127,58 ±3,67) mg/kg et (72,19 ±1,35) mg/kg en 2008.
- [Zn]<sub>tiges</sub> > [Zn]<sub>racines</sub> > [Zn]<sub>fruits</sub>:  
(206,75 ±4,71) mg/kg, (186,13 ±14,75) mg/kg et (66,32 ±5,94) mg/kg en 2009.
- [Zn]<sub>tige</sub> > [Zn]<sub>fruits</sub> > [Zn]<sub>racines</sub>:  
(225,77 ±5,28) mg/kg, (67,24 ±3,16) mg/kg et (43,85 ±2,54) mg/kg en 2010.

L'ensemble de ces valeurs dépasse la teneur normale du Zn dans les plantes **50 mg/kg**. Par contre, durant les années 2009 et 2010, les valeurs détectées dépassent largement la teneur critique toxiques (**100-400**) mg/kg (tableaux I-5 et I-6). Ces plantes sont donc contaminées par le Zn.

#### ✓ Pour le nickel

**Dans le poivron**, le Ni présente des teneurs évolutives croissantes dans les fruits et les racines avec respectivement (0,82 ±0,16 et 11,76 ±2,30) mg/kg en 2007; (4,19 ±0,82 et 12,21 ±2,39) mg/kg en 2008; (8,27 ±1,62 et 21,32 ±4,18) mg/kg en 2009; (41,55 ±1,14 et 46,70 ±2,15) mg/kg en 2010 et dans les feuilles avec la valeur de (16,73 ±1,28) mg/kg en 2010.

**Dans l'artichaut**, le Ni se localise dans la séquence suivante:

- $[\text{Ni}]_{\text{racines}} > [\text{Ni}]_{\text{tiges}} > [\text{Ni}]_{\text{feuilles}}$ :  
(4,40 ±0,86) mg/kg, (4,13 ±0,81) mg/kg et (3,96 ±0,77) mg/kg en 2007;
- $[\text{Ni}]_{\text{tiges}} > [\text{Ni}]_{\text{feuilles}} > [\text{Ni}]_{\text{racines}}$ :  
(7,12 ±1,39) mg/kg, (4,55 ±0,89) mg/kg et (4,21 ±0,82) mg/kg en 2008;  
(10,09 ±1,97) mg/kg, (7,79 ±1,52) mg/kg et (4,93 ±0,96) mg/kg en 2009;  
(12,34 ±2,42) mg/kg, (10,93 ±2,14) mg/kg et (5,09 ±0,99) mg/kg en 2010.

Par contre **dans le raisin**, le Ni a marqué une présence importante de:

- (8,39 ±1,64) mg/kg en 2007 dans les feuilles;
- (5,50 ±1,07) mg/kg et (6,87 ±1,34) mg/kg dans les feuilles et les racines en 2008;
- (6,34 ±1,24) et (7,93 ±1,55) mg/kg; (7,22 ±1,41) et (9,11 ±1,78) mg/kg et (4,65 ±0,91) et (7,04 ±1,38) mg/kg, respectivement dans les feuilles, les fruits et les tiges des années 2009 et 2010.

En générale, ces teneurs dépassent la teneur normale **1,5 mg/kg** (tableau I-5 et I-6). Mais dans les années 2009 et 2010, les teneurs dans les trois plantes deviennent inquiétantes et oscillent dans l'intervalle des teneurs critiques toxiques (**10-100**) mg/kg (tableaux I-5 et I-6).

#### ✓ Pour le manganèse

**Dans le poivron**, Le Mn s'accumule en 2007 dans l'ordre suivant:

- $[\text{Mn}]_{\text{racines}} > [\text{Mn}]_{\text{feuilles}} > [\text{Mn}]_{\text{tiges}} > [\text{Mn}]_{\text{fruits}}$  avec respectivement les valeurs de (41,15 ±2,87) mg/kg, (17,03 ±1,18) mg/kg, (14,37 ±1,00) mg/kg, (3,72 ±0,26) mg/kg en 2007.

Mais en 2008, 2009 et 2010, il s'accumule comme suit:

- $[Mn]_{\text{racines}} > [Mn]_{\text{tiges}} > [Mn]_{\text{feuilles}} > [Mn]_{\text{fruits}}$  avec respectivement les valeurs de (44,11  $\pm$  3,07) mg/kg, (19,18  $\pm$  1,33) mg/kg, (18,07  $\pm$  1,26) mg/kg et (12,02  $\pm$  0,83) mg/kg en 2008; (49,82  $\pm$  3,47) mg/kg, (24,25  $\pm$  1,69) mg/kg, (22,71  $\pm$  1,58) mg/kg et (18,10  $\pm$  1,26) mg/kg en 2009; (51,53  $\pm$  3,59) mg/kg, (30,13  $\pm$  2,10) mg/kg, (23,22  $\pm$  1,62) mg/kg et (20,77  $\pm$  1,44) mg/kg en 2010.

**Dans l'artichaut et le raisin**, le Mn se concentre dans les feuilles dans l'ordre suivant : (31,45  $\pm$  2,19) mg/kg et (39,40  $\pm$  2,74) mg/kg en 2007; (37,71  $\pm$  2,63) mg/kg et (42,05  $\pm$  2,93) mg/kg en 2008; (40,17  $\pm$  2,80) mg/kg et (45,05  $\pm$  3,14) mg/kg en 2009 et (46,29  $\pm$  3,23) mg/kg et (49,88  $\pm$  3,48) mg/kg en 2010.

Ces valeurs moyennes enregistrées ne dépassent pas le seuil critique toxique pour les plantes (**300-500**) mg/kg et la teneur normale **200** mg/kg (tableaux I-5 et I-6). Donc, le Mn ne présente aucun danger pour ces végétaux.

#### ✓ Pour le cobalt

Le Co se trouve en quantité importante principalement en 2010 dans les feuilles et les racines **du poivron** avec les teneurs (4,03  $\pm$  0,65) mg/kg et (3,97  $\pm$  0,64) mg/kg.

Il se répartit dans les feuilles, les tiges et les racines de **l'artichaut** respectivement par des teneurs suivantes:

- (0,63  $\pm$  0,10) mg/kg, (0,58  $\pm$  0,09) mg/kg et (0,62  $\pm$  0,10) mg/kg en 2007;
- (0,93  $\pm$  0,15) mg/kg, (1,07  $\pm$  0,17) mg/kg et (0,91  $\pm$  0,14) mg/kg en 2008;
- (1,57  $\pm$  0,25) mg/kg, (1,63  $\pm$  0,26) mg/kg et (1,09  $\pm$  0,17) mg/kg en 2009;
- (2,88  $\pm$  0,46) mg/kg, (1,82  $\pm$  0,29) mg/kg et (1,79  $\pm$  0,28) mg/kg en 2010.

**Dans le raisin**, le Co se concentre essentiellement dans les fruits et les racines respectivement avec des teneurs de (2,01  $\pm$  0,35) mg/kg et (1,90  $\pm$  0,30) mg/kg en 2007; de (3,16  $\pm$  0,51) mg/kg et (1,74  $\pm$  0,28) mg/kg en 2008; de (4,48  $\pm$  0,72) mg/kg et de (1,41  $\pm$  0,22) mg/kg en 2009 et de (5,42  $\pm$  0,87) mg/kg et (1,46  $\pm$  0,23) mg/kg en 2010.

Par ailleurs, il a été aussi accumulé dans les feuilles par une teneur de (1,82  $\pm$  0,29) mg/kg en 2010.

L'accumulation du Co dans plupart des parties de nos trois plantes est croissante. Toutefois, les valeurs trouvées sont inférieures à la valeur critique toxique (**15-50**) mg/kg et sont supérieures à la teneur normale des plantes **0,2** mg/kg (tableaux I-5 et I-6). Donc, le Co ne présente aucune toxicité.

✓ **Pour le chrome**

Le Cr s'accumule **dans le poivron** à partir de 2007 où il se concentre majoritairement dans les feuilles et les racines avec respectivement les teneurs de (0,82 ±0,04) mg/kg et (2,80 ±0,15) mg/kg en 2007; de (0,94 ±0,05) mg/kg et (6,07 ±0,33) mg/kg en 2008; de (1,19 ±0,06) mg/kg et (9,51 ±0,519)mg/kg en 2009 et de (2,82 ±0,15) mg/kg et (12,09 ±0,65) mg/kg en 2010.

La séquence d'accumulation est comme suit:

$$[\text{Cr}]_{\text{racines}} > [\text{Cr}]_{\text{feuilles}}$$

Il a été également accumulé en 2010 dans les fruits et les tiges avec respectivement des teneurs de (2,01 ±0,11) mg/kg et de (1,27 ±0,06) mg/kg.

**Dans l'artichaut**, le Cr s'est accumulé dans les feuilles et les racines avec respectivement la séquence annuelle suivante :

- (8,21 ±0,44) mg/kg et (17,05 ±0,93) mg/kg en 2007;
- (9,73 ±0,53) mg/kg et (21,98 ±1,19) mg/kg en 2008;
- (12,67 ±0,69) mg/kg et (26,06 ±1,42) mg/kg en 2009;
- et (17,11 ±0,93) mg/kg et (30,75 ±1,67) mg/kg en 2010.

Il a également enregistré une accumulation en 2010 au niveau des tiges par une valeur de (3,14 ±0,17) mg/kg.

**Dans le raisin**, le Cr s'est accumulé dans les feuilles et les racines avec respectivement l'enchaînement annuel croissant suivant :

- (4,20 ±0,22) mg/kg et (26,09 ±1,42) mg/kg en 2007;
- (7,11 ±0,38) mg/kg et (35,14 ±1,91) mg/kg en 2008;
- (10,09 ±0,55) mg/kg et (39,76 ±2,16) mg/kg en 2009;
- (11,20 ±0,61) mg/kg et (45,08 ±2,45) mg/kg en 2010.

La séquence d'accumulation est comme suit:

$$[\text{Cr}]_{\text{racines}} > [\text{Cr}]_{\text{feuilles}}$$

Il a été remarquée q'une accumulation du Cr s'est faite au niveau des fruits et des tiges en 2010 avec respectivement des valeurs de (4,03 ±0,22) mg/kg et de (7,82 ±0,42) mg/kg.

Les teneurs trouvées dans les racines du poivron présentent une toxicité remarquable à partir de l'année 2007, et elles se quintuplent en 2010 par rapport à la teneur critique de toxicité **3 mg/kg** (tableaux I-5 et I-6).

Dans l'artichaut, toutes les valeurs trouvées dépassent largement cette teneur toxique. Néanmoins dans le raisin, les valeurs trouvées à partir de 2008 sont également supérieures à la teneur critique toxique **3 mg/kg**. Donc, les trois plantes sont contaminées par le Cr.

✓ **Pour l'arsenic**

L'As se concentre préférentiellement dans les racines **du poivron** et **du raisin** avec respectivement des teneurs de  $(2,71 \pm 0,14)$  et  $(31,10 \pm 1,69)$  mg/kg en 2007; de  $(3,04 \pm 0,16)$  et  $(24,45 \pm 1,33)$  mg/kg en 2008; de  $(3,01 \pm 0,16)$  et  $(17,01 \pm 0,92)$  mg/kg en 2009 et de  $(3,19 \pm 0,17)$  et  $(23,17 \pm 1,26)$  mg/kg en 2010. Tandis que **dans l'artichaut**, il se localise dans les feuilles par des masses relatives de  $(0,92 \pm 0,05)$  mg/kg en 2007; de  $(1,26 \pm 0,06)$  mg/kg en 2008; de  $(1,53 \pm 0,08)$  mg/kg en 2009 et de  $(1,82 \pm 0,09)$  mg/kg en 2010.

Toutes ces teneurs sont aux dessous du seuil critique toxique **40 mg/kg** et s'échelonnent dans l'intervalle des teneurs normales des plantes (**3 - 10**) mg/kg.

**III.2.3. Distribution annuelle des éléments métalliques au sein du poivron, d'artichaut et du raisin.**

D'après les résultats des teneurs des éléments majeurs et éléments mineurs donnés dans les tableaux (III-68 à III-77), il ressort que la distribution des ces éléments dans les différents organes durant les années d'étude est classée dans l'ordre suivant:

✓ **Feuilles**

- le poivron:  $[Zn] > [Mn] > [Ni] > [Cu] > [Pb] > [Co] > [Cr] > [Cd] > [As]$ ;  
 $[Ca] > [K] > [Na] > [Mg] > [Fe]$ .
- l'artichaut:  $[Zn] > [Mn] > [Pb] > [Cu] > [Cr] > [Ni] > [Co] > [Cd] > [As]$ ;  
 $[Ca] > [K] > [Na] > [Mg] > [Fe]$  ;
- le raisin:  $[Zn] > [Mn] > [Pb] > [Cu] > [Cr] > [Ni] > [Co] > [Cd] > [As]$ ;  
 $[Ca] > [K] > [Na] > [Mg] > [Fe]$ .

✓ **Fruits**

- le poivron:  $[Zn] > [Ni] > [Mn] > [Cu] > [Cr] > [Cd] > [As] > [Co] > [Pb]$ ;  
 $[Ca] > [Na] > [K] > [Mg] > [Fe]$ .
- le raisin:  $[Zn] > [Mn] > [Pb] > [Cu] > [Cr] > [Ni] > [Co] > [Cd] > [As]$ ;  
 $[K] > [Ca] > [Mg] > [Na] > [Fe]$ .

✓ **Tiges**

- le poivron:  $[Zn] > [Mn] > [Cu] > [Ni] > [Co] > [Cd] > [Pb] > [Cr] > [As]$ ;  
 $[Ca] > [K] > [Na] > [Mg] > [Fe]$ .
- l'artichaut:  $[Zn] > [Ni] > [Mn] > [Cr] > [Cu] > [Co] > [Pb] > [Cd] > [As]$ ;  
 $[Ca] > [Na] > [K] > [Mg] > [Fe]$  ;
- le raisin:  $[Zn] > [Mn] > [Cr] > [Ni] > [Cu] > [Pb] > [As] > [Co] > [Cd]$ ;  
 $[Ca] > [K] > [Na] > [Mg] > [Fe]$ .

✓ **Racines**

- le poivron: [Zn] > [Ni] > [Mn] > [Cu] > [Cr] > [Cd] > [Co] > [As] > [Pb];  
[Mg] > [K] > [Ca] > [Na] > [Fe].
- l'artichaut: [Zn] > [Cr] > [Mn] > [Ni] > [Cu] > [Co] > [As] > [Pb] > [Cd];  
[Na] > [K] > [Ca] > [Mg] > [Fe];
- le raisin: [Zn] > [Cr] > [As] > [Mn] > [Cu] > [Ni] > [Co] > [Pb] > [Cd];  
[Ca] > [K] > [Mg] > [Na] > [Fe].

En conclu que le Zn, le Mn et le Ni sont les mieux accumulés (absorbés) par nos plantes.

**III.2.4. Evaluation de l'accumulation et de la contamination des plantes par les métaux**

Pour pouvoir évaluer le pouvoir d'accumulation de nos plantes et par la suite le degré de contamination, nous allons comparer les valeurs des teneurs moyennes trouvées dans les plantes d'une part par rapport à celles trouvées dans les sols correspondants et d'autre part par rapport aux normes et aux valeurs critique toxiques.

Les résultats obtenus et récapitulés dans les tableaux (III-78 à III-80) ont montré que les teneurs en éléments traces métalliques dans les plantes varient avec les espèces végétales.



**Région I: sol R et le raisin**

*Tableau III-78: Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) des éléments traces métalliques dans le raisin et dans le sol correspondant durant les années d'étude.*

ETM	2006			2007			2008			2009			2010		
	plante	profondeur (cm)		plante	profondeur (cm)		plante	profondeur (cm)		plante	profondeur (cm)		plante	profondeur (cm)	
	Raisin	0-20	20-40	Raisin	0-20	20-40	Raisin	0-20	20-40	Raisin	0-20	20-40	Raisin	0-20	20-40
<b>Pb</b>	144,11	56,02	49,24	12,35	40,31	33,55	16,61	39,14	32,38	20,36	24,31	17,58	28,18	22,25	15,52
<b>Cd</b>	11,03	24,15	22,24	4,82	13,15	11,31	3,42	10,18	8,34	2,95	7,13	6,95	1,58	0,70	0,52
<b>Cu</b>	73,96	29,65	32,95	41,78	18,31	21,61	38,14	15,32	18,62	33,07	7,30	10,60	27,45	3,75	7,05
<b>Zn</b>	678,69	539,01	570,62	883,81	307,21	338,33	918,89	21,15	58,66	959,67	262,33	299,84	909,68	284,5	286,01
<b>Ni</b>	4,04	34,70	38,94	15,03	13,02	17,26	18,58	10,07	23,36	21,42	5,19	16,57	26,32	1,18	12,54
<b>Mn</b>	91,99	677,25	652,51	62,67	503,30	478,56	73,72	244,94	220,2	80,28	227,01	215,72	87,78	83,75	72,46
<b>Co</b>	2,72	2,51	2,26	4,30	3,02	2,26	5,46	4,19	2,26	6,79	4,98	2,26	8,70	5,75	2,26
<b>Cr</b>	8,15	65,05	35,64	33,67	68,04	38,63	48,26	73,32	43,91	58,09	77,91	43,91	68,13	81,12	47,13
<b>As</b>	1,77	50,60	112,49	32,10	42,11	44,32	26,17	37,19	39,40	19,85	33,08	35,30	28,58	30,13	32,34

**Région II: sol K et l'artichaut**

*Tableau III-79: Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) des éléments traces métalliques dans l'artichaut et dans le sol correspondant durant les années d'étude.*

ETM	2006			2007			2008			2009			2010		
	plante	profondeur (cm)		plante	profondeur (cm)		plante	profondeur (cm)		plante	profondeur (cm)		plante	profondeur (cm)	
	Artichaut	0-20	20-40	Artichaut	0-20	20-40	Artichaut	0-20	20-40	Artichaut	0-20	20-40	Artichaut	0-20	20-40
<b>Pb</b>	38,20	15,45	15,16	23,68	15,45	21,84	28,47	17,81	17,57	33,41	19,44	19,19	40,63	21,00	20,75
<b>Cd</b>	4,37	5,27	5,25	3,50	5,30	15,98	2,23	4,18	4,16	1,20	3,02	3,00	1,06	2,05	2,03
<b>Cu</b>	65,31	8,57	8,74	40,12	7,14	89,74	39,21	6,00	6,17	33,68	3,58	3,74	31,09	2,23	2,39
<b>Zn</b>	379,87	171,7	176,47	584,34	433,52	471,88	887,97	731,08	736,83	1181,45	793,45	1226,92	1581,77	823,67	818,25
<b>Ni</b>	9,80	10,82	11,11	12,49	12,52	15,82	15,88	15,31	17,34	22,81	18,63	19,40	28,36	21,25	22,02
<b>Mn</b>	76,73	170,45	166,48	50,38	117,60	590,55	56,52	92,00	88,03	58,77	84,71	79,98	64,87	71,50	66,77
<b>Co</b>	1,80	3,06	3,07	1,83	3,01	2,45	2,91	3,01	3,07	4,29	2,87	3,07	6,49	8,25	3,07
<b>Cr</b>	12,32	15,95	14,68	26,90	18,76	88,14	33,62	22,05	20,77	41,13	26,04	18,82	51,00	33,15	25,93
<b>As</b>	2,60	7,90	9,84	1,53	5,12	11,35	2,20	3,08	3,15	2,41	4,22	4,29	2,95	4,09	4,16

**Région III: sol F et le poivron**

*Tableau III-80: Teneurs totales moyennes (mg/kg/MS) des éléments traces métalliques dans le poivron et dans le sol correspondant durant les années d'étude.*

ETM	2006			2007			2008			2009			2010		
	plante	profondeur (cm)		plante	profondeur (cm)		plante	profondeur (cm)		plante	profondeur (cm)		plante	profondeur (cm)	
	poivron	0-20	20-40	poivron	0-20	20-40	poivron	0-20	20-40	poivron	0-20	20-40	poivron	0-20	20-40
<b>Pb</b>	12,42	7,95	7,06	4,83	6,93	6,04	5,42	7,99	7,10	5,61	9,43	8,54	6,24	13,75	12,85
<b>Cd</b>	2,41	1,97	0,98	5,57	1,90	1,63	6,16	1,89	1,78	8,19	1,72	1,61	11,10	1,90	1,79
<b>Cu</b>	10,51	5,57	1,22	26,58	6,01	6,21	44,97	4,32	4,52	51,41	3,92	4,12	62,07	3,25	3,45
<b>Zn</b>	585,05	119,17	120,04	817,20	503,13	504	1581,66	432,15	433,01	2309,89	623,03	450,43	3246,99	698,34	480,24
<b>Ni</b>	0,38	5,12	5,13	13,62	8,72	8,72	19,65	14,37	14,50	38,33	17,42	17,54	109,11	21,00	20,00
<b>Mn</b>	53,85	74,77	67,20	76,27	72,11	69,93	91,38	79,03	76,85	114,88	80,12	77,94	125,65	82,00	79,40
<b>Co</b>	0,40	2,03	2,16	1,22	2,02	2,20	3,90	2,54	2,26	6,97	3,02	2,54	11,02	3,75	2,80
<b>Cr</b>	0,42	6,12	4,48	4,13	12,06	11,22	8,63	17,87	17,03	12,91	22,16	17,38	18,19	25,13	20,35
<b>As</b>	0,95	3,80	7,69	3,34	3,72	3,86	3,83	4,92	5,06	4,02	5,11	5,25	4,48	5,80	5,94

#### III.2.4.1. Pour le plomb, le cuivre et le zinc

L'évaluation de l'accumulation et de contamination du Pb, du Cu et du Zn est comme suit:

Les valeurs trouvées en Pb dans les trois plantes dépassent la valeur normale, sauf dans les feuilles d'artichaut et de raisin des années 2006, 2008, 2009 et 2010 où les teneurs sont dans le seuil de critique.

Les valeurs trouvées en Cu dans les trois plantes sont dans les normes sauf dans les fruits et les racines du poivron et dans les feuilles d'artichaut où les teneurs sont dans le seuil de critique de toxicité durant toutes les années d'étude.

Les valeurs trouvées en Zn dans les trois plantes dépassent la valeur normale, sauf dans les années 2009 et 2010 où les teneurs sont dans le seuil de critique de toxicité.

Nos plantes sont donc contaminées par ces ETM.

Par ailleurs, ces teneurs trouvées dans les plantes sont supérieures à celles trouvées dans les sols. Donc nos plantes accumulent ces ETM.

#### III.2.4.2. Pour le cadmium

Le Cd est le métal le plus préoccupant en regard de la contamination par la chaîne alimentaire.<sup>52</sup> Il s'accumule facilement dans les plantes et les animaux parce qu'il remplace le Zn dans certains enzymes.<sup>38</sup> Également, il est plus mobile dans les sols et plus absorbé par les plantes que d'autres métaux comme le Cu et le Pb.<sup>51,53</sup> En conséquence, la probabilité qu'il soit transféré du sol vers la plante et puis vers l'humain est plus grand. Ce résultat de la littérature est confirmé par le poivron notamment ses racines où les teneurs en Cd sont plus élevées que celles estimées dans le sol correspondant et dépassent la valeur de la teneur critique toxique. Donc, seul le poivron accumule le Cd et il est contaminé par ce métal.

#### III.2.4.3. Pour le nickel, le manganèse et le chrome

Les teneurs trouvées en Ni, en Mn et en Cr sont comme suit:

✓ dans le sol F:

- les teneurs trouvées en Ni et en Mn durant les années 2007-2010 dans les plantes sont supérieures à celles trouvées dans le sol.

✓ dans le sol R:

- les teneurs trouvées en Ni durant les années 2009 et 2010 dans les plantes sont supérieures à celles trouvées dans les sols;
- Les teneurs trouvées en Mn durant l'année 2010 dans les plantes sont supérieures à celles trouvées dans les sols.

✓ dans le sol K:

- les teneurs trouvées en Ni et Cr durant les années 2009 et 2010 dans les plantes sont supérieures à celles trouvées dans les sols.

En générale, les teneurs en Mn sont dans les normales alors que celles du Ni dépassent la teneur normale, sauf dans les années 2009 et 2010 où les teneurs dans les feuilles et les fruits des trois plantes s'échelonnent dans la teneur critique toxique.

Pour le Cr, il a été remarquée q'une accumulation atteignant le seuil de toxicité s'est faite au niveau des fruits et des tiges en 2010 du raisin, au niveau des racines du poivron à partir de l'année 2007 et au niveau de l'artichaut durant toutes les années d'étude. Ainsi, nos plantes accumulent le Mn, le Ni et le Cr et sont également contaminées par ces ETM.

#### III.2.4.4. Pour l'arsenic et le cobalt

Les teneurs trouvées en As et Co dans les plantes sont inférieures à celles trouvées dans les sols correspondants.

#### III.2.5. Dynamique des ETM au besoin des plantes

Les résultats exposés dans les tableaux III-78 à III-80 et récapitulés dans le tableau III-81 montrent que les teneurs totales moyennes des éléments suivants: Pb, Cd, Mn, Co et Cr dans les couches superficielles (0-20cm) des sols sont relativement plus élevées à celles des couches profondes (20-40cm). Ceci, indique que ces éléments ont toujours tendances à s'accumuler dans les horizons de surface et migrent peu en profondeur. Ce comportement a été le même pour les éléments majeurs: Ca, K, Mg, Na et Fe (tableau III-16 à III-20). Tandis que les éléments du Cu, du Zn, du Ni, et d'As ont une tendance de s'accumuler en couches profondes plus riches en matière organique et les couches argileuses. IL ressort de ces résultats que la mobilité des ETM diffère d'un élément à un autre le long d'un profil.

Ces résultats se concordent bien avec ceux de la littérature. <sup>51,56</sup>

**Tableau III-81:** Récapitulatif des résultats d'évolution des ETM en profil des sols étudiés.

	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Co	Cr	As
teneur en surface > teneur en profondeur	■	■				■	■	■	
teneur en surface < teneur en profondeur			■	■	■				■

---

## **Conclusion générale et Perspective**

---

## Conclusion générale et perspective

L'évaluation du risque environnemental lié aux transferts potentiels des éléments traces métalliques comme le Pb, le Cd, le Cu, le Zn, le Ni, le Mn, le Fe, le Cr, le Co et l'As dans les sols agricoles situés près des rejets industriels et leur impact sur les plantes cultivées a été l'objectif principal de notre travail.

Pour cela, nous avons suivi les méthodologies suivantes:

- ✓ extraction totale pour estimer le potentiel active des polluants métalliques.
- ✓ extraction séquentielle pour déterminer la partie qui présume être mobile pour les plantes.
- ✓ détermination quantitative de la fraction mobilisable et supposée disponible pour les plantes.
- ✓ extraction totale dans les différentes parties des plantes alimentaires choisies pour pouvoir comparer et déterminer l'organe le plus accumulateur des ETM.

Les résultats sur la pédologie des sols ont montré que tous les sols ont une texture d'un sable fin avec un pourcentage important dépassant les 80% de particules de taille entre 0,1 et 0,2 mm, en plus une pauvreté remarquable en argile et en limon avec un pH légèrement basique (7,29) à basique (8,89) qui augmente en profondeur. Les taux de carbonate sont compris entre 5,06% et 7,03% avec une humidité moyenne. Une capacité d'échange cationique (CEC) moyenne comprise entre 29,13 et 32,94 cmole<sup>+</sup>/kg, qui s'évolue croissante en profondeur.

Les résultats des teneurs moyennes en éléments majeurs sont toujours supérieurs à ceux des éléments traces métalliques. L'ion calcium est l'élément le plus dominant avec la séquence suivante: Ca>Fe>Mg>K>Na. Ceci est en accord avec les résultats physico-chimiques où nous avons trouvé des sols calcaires avec de fortes teneurs en carbonates.

Les valeurs moyennes en ETM relevées montrent une distribution contrastée aussi bien verticale qu'horizontale, d'un sol à un autre et pour un même sol.

Il est démontré que le sol R étant le plus proche de la décharge se trouve le plus contaminé. Les teneurs moyennes (en mg/kg/MS) estimées en Pb, en Cu, en Ni, en Cr et en Co sont totalement inférieures aux normes limites dans tous les sols.

Cependant les teneurs moyennes en Zn, en Cd, en Mn, et en As détectées dépassent les normes limites particulièrement pour les trois sols agricoles en Zn (**320 mg/Kg/MS**), dans les sols R et K en Cd (**2,9 mg/Kg/MS**) et dans le sol R en Mn et en As (**300 et 40 mg/Kg/MS**).

Pour ce qui est de la distribution verticale des ETM (distribution intra sol), nous avons trouvé les teneurs dans la plupart des cas, plus importantes dans les horizons de surface que celles dans les horizons de profondeur.

Il nous est difficile (faute de données sur le fond géochimique des sols algériens) de différencier avec certitude la quote-part de métaux de nature endogène de celle d'origine anthropique. Néanmoins, les fortes teneurs trouvées en surface seraient probablement un argument en faveur d'apport anthropique. Tandis que pour la distribution inter sol, les teneurs détectées dans le sol R sont effectivement toujours les plus élevées par rapport autres sols.

Il faut se garder de considérer ces faibles teneurs comme une garantie écartant tout risque de contamination ou de pollution. En effet, si ces teneurs totales ne donnent aucun renseignement sur la mobilité des métaux dans les sols ou sur leur biodisponibilité, mais seulement l'expression d'un danger potentiel d'un sol qui peut présenter une menace pour les végétaux ce sont davantage la spéciation selon la méthode de Tessier qui permet une estimation du devenir des polluants métalliques et une approche du risque.

Les résultats de l'extraction séquentielle ont montré une pollution en Zn, en As, en Cd et en Mn dans les trois sols, une pollution en Ni et Cr dans les sols K et F et une pollution en Pb uniquement dans le sol K. Ces résultats nous ont également informés sur les interactions des ETM avec les différentes phases des sols et sur leurs forces de liaison ainsi que sur leur mobilité.

En effet, nous avons trouvé ces ETM liés aux différentes phases des trois sols sous différentes formes physico-chimiques à savoir:

- ✓ le Pb dans le sol K est lié majoritairement à la phase résiduelle, donc le Pb est théoriquement peu mobile.
- ✓ le Zn et le Mn dans le sol F sont principalement liés à la phase résiduelle, donc le Zn et le Mn sont théoriquement peu mobiles.
- ✓ le Zn et Mn sont pratiquement liés à la phase réductible et à la phase carbonate respectivement dans les sols K et R, donc le Zn et le Mn sont potentiellement mobiles
- ✓ l'As est incorporé totalement dans le réseau cristallin, donc l'As est théoriquement immobile.
- ✓ le Ni est associé principalement à la phase carbonate et à la phase oxydable respectivement dans les sols K et F de l'année 2009 - 2010, donc le Ni est mobile.



- ✓ le Cr dans les sols K et F est lié majoritairement à la phase résiduelle, donc le Cr est théoriquement peu mobile.
- ✓ le Cd dans le sol F est lié majoritairement à la phase résiduelle, donc le Cd est théoriquement peu mobile.
- ✓ le Cd est associé principalement à la phase carbonate et à la phase oxydable respectivement dans les sols R et K donc le Cd est mobile.

La fraction mobilisable à court et à long terme représentant la partie active du polluant (non lié au silicate), a été estimée par l'EDTA. Les résultats trouvés montrent que les valeurs obtenues ne dépassent pas celles de la somme des valeurs des quatre fractions issues de l'extraction séquentielle (F1+F2+F3+F4).

Ces valeurs peuvent provoquer des problèmes de bio et phytotoxicité, mais seule l'étude du transfert et de l'accumulation des métaux lourds dans les différents organes des végétaux permet de confirmer ceci. En effet:

- ✓ le Pb est bien accumulé par les feuilles et les racines de l'artichaut;
- ✓ le Zn, en 2009 et 2010 est bien absorbé par tous les organes des trois végétaux;
- ✓ le Ni, en 2009 et 2010 est bien assimilé par les feuilles et les fruits des trois végétaux;
- ✓ le Cd est bien accumulé uniquement en 2010 par les racines du poivron;
- ✓ le Cu est absorbé d'une part par les racines et les fruits du poivron et d'autre part par les feuilles d'artichaut;
- ✓ le Cr est bien accumulé par les racines du poivron, par les feuilles et les racines d'artichaut et par les feuilles, les tiges et les racines du raisin.

D'après ces résultats, on peut dire que le devenir des ETM dans le sol est régi par les propriétés physico-chimiques des sols et que le transfert et l'accumulation des ETM dans les plantes sont gouvernés par le type des végétaux.

Ce travail nous a permis quelques avancées dans la connaissance de l'origine et des caractéristiques de la pollution métallique dans des sols agricoles et dans les végétations cultivés. Il nous a également averti du danger que peut subir l'homme. Il a également mis en évidence des points d'ombre nécessitant de plus amples recherches.

Par ailleurs, il est intéressant de pouvoir confronter les résultats relatifs à ces sites à ceux obtenus sur d'autres sites afin d'envisager une généralisation des tendances observées et également de pouvoir proposer des mesures pratiques pour contrôler ou atténuer les effets de cette pollution.

Il serait aussi intéressant de poursuivre cette étude par une approche de modélisation des phénomènes, ce qui permettra d'estimer les risques de migration des polluants ou les capacités d'accumulation au sein des différentes phases selon des variations de conditions multiples (mélange de réactifs, ...etc) et à plus grande échelle de temps, en limitant les expérimentations au laboratoire. L'emploi de méthodes permettant un suivi de l'évolution de la spéciation, en conjonction avec ces expériences, permettrait d'en mieux étayer les conclusions.

---

## **Références bibliographiques**

---

## Références Bibliographiques

---

- [1]- **Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (MATE)**. Etat de l'environnement et politiques suivies. Alger. Algérie, (2003) p175-236.
- [2]- **Y. Kehila et al.** Approche méthodologique pour la mise en place d'outils de conception, de suivi et de contrôle des installations de traitement et d'élimination des déchets solides urbains dans les Pays en Développement (PED): rôle de la recherche interuniversitaire. Mostaganem. Algérie (2006).
- [3]- **Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (MATE)**. Etat de l'environnement et politiques suivies. Alger. Algérie, (2005) p171-181.
- [4]- **UNEP/MAP/CP RAC**. State of the art of sustainable production in the Mediterranean. MAP Technical Reports Series No. 165 UNEP/MAP, Athens, (2006) p25-38.
- [5]- **B. Lemièrre, J.J. Seguin, Le Guern. C, Guyonnet et D. Baranger**. Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Ministères de l'aménagement et du territoire et de l'environnement, (2001) p34.
- [6]- **Programme d'Aménagement Côtier (PAC) "Zone côtier algéroise"**. Lutte contre la pollution liée aux déchets solides, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (MATE), (2004) p64.
- [7]- **L. Benadda**. Etude de la pollution du bassin versant de l'oued Mouillah (Haute Tafna). Mémoire de magister. Département Hydraulique. Université de Tlemcen, (2004) p67.
- [8]- **E. Emmanuel**. Evaluation des risques sanitaires et écotoxicologiques liés aux effluents hospitaliers, Thèse doctorat en Sciences et techniques du déchet. Institut national des sciences appliquées de Lyon, (2004) p302.
- [9]- **B.Mouhouche**. L'eau et son impact sur la biodiversité. Plan d'action et stratégie National sur la biodiversité, projet ALG/97/G31. Tomes VI, (2002).
- [10]- **A. Abdelaguerfi**. Plan d'action et stratégie Nationale sur la biodiversité. Evaluation des besoins en matière de renforcement des capacités nécessaires à l'évaluation et la réduction des risques menacent les éléments de la biodiversité biologiques en Algérie. TomeV, (2003).
- [11]- **B. Guouas**. La dégradation des sols et la biodiversité en Algérie. Plan d'action et stratégie National sur la biodiversité, projet ALG/97/G31. Tomes VI, (2002).
- [12]- **P. Guassart**. Contribution à l'étude des interactions de la matière organique des sols avec les métaux lourds. Etudes structurale et analytique de molécules modèles. Thèse de doctorat en instrumentation et analyses avancées. Université des sciences et Technologies de Lille. France, (2001) p245.
- [13]- **O. Catherine**. Les déchets "définitions juridiques et conséquences", 2<sup>ème</sup> Edition (1997). AFNOR. France, p45-57.

[14]- **Conseil National Economique et Social (CNES)**. Rapport sur l'environnement en Algérie, (2000).

[15]- **C.I. Faurie, C. Ferra, M. Paul, J. Deraux et j.L. Hemptinne**. Ecologie "Approche scientifique et pratique", 5<sup>ème</sup> Edition: TEC et DOC (2003). Paris, p432-439.

[16]- **F. Ramade**. Dictionnaire encyclopédique des pollutions, Edition: science international. (2000). Paris, p834.

[17]- **M. kehila et al**. Les centres de stockage de déchets (décharges) et l'utilisation des matériaux géosynthétiques comme barrière d'étanchéité pour la protection de l'environnement. Alger, (2001) p45.

[18]- **Ministère de l'Aménagement de Territoire et de l'Environnement (MATE)**. Cadastre nationale des déchets spéciaux "élimination écologique" des déchets spéciaux. Alger (2002).

[19]- **S.A. LDK-ECO**. Soutien à la DG Environnement pour la mise au point de l'Initiative de Dépollution de la Méditerranée « Horizon 2020 », rapport du Bilan des activités en cours et achevées. Commission européenne. Belgique, (2006) p57-70.

[20]- **D. Baize**. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. Références et stratégies d'interprétation. Editions INRA (1997). Paris. France, p408.

[21]- **C. Desachy**. Les déchets, sensibilisation à une gestion écologique. 2<sup>ème</sup> Edition: Tec et Doc AGHIM (2001). Paris, p34.

[22]- **R. Calvet**. Le sol, propriétés et fonctions. Tome 1: Constitution et structure, phénomènesaux interfaces, Edition Dunod (2003). Paris, p87.

[23]- **J. Berthelin et C. Leyval**. Contamination des milieux par les éléments en traces. Les conséquences sur les sols et les eaux superficielles, J. C. R. Agri. Fr. 86 (2000) 25-37.

[24]- **D. Baize**. Examen critique des valeurs limites "sols" de la réglementation française. In Un point sur les éléments traces métalliques dans les sols approches fonctionnelles et spatiales. Editions INRA (2002). Paris, p565.

[25]- **K.W.T. Goulding and L. Blake**. Land use, liming and the mobilization of potentially toxic metals, J. Agri. Ecos. Environ. 67 (1998) 135-144.

[26]- **D. Hesterberg**. Biogeochemical cycles and processes leading to changes in obility of chemicals in soils, J. Agri. Ecos. Environ. 67 (1998)121-133.

[27]- **E. Meers, G. Du Laing, V.G. Unamuno, E. Lesage, F.M.G. Tack. et M.G. Verloo**. Water extractability of trace metals from soils: Some Pitfalls, J. Water. Air. Soil. Pollution. 176 (2006) 21-35.

[28]- **M.K. Andersen, K.Raulund-Rasmussen, H.C.B.Hansen and W. Strobel**. Distribution and fractionation of heavy metals in pairs of arable and afforested soils in Denmark, J. Eur. Soil. Sci. 53 (2002) 491-502.

[29]- **R. Morel**. Les sols cultivés, Lavoisier, Tec et Doc (1989). Paris, p123.

[30]- **J. Aragón, A. Aguilera and F. Peñalba.** Improvements in quantitative analysis of steel composition by laser-induced breakdown spectroscopy at atmospheric pressure using an infrared Nd :YAG laser, *J. Appl. Spectrosc.* 53 (1999)1259-1267.

[31]- **A. Klute.** Methods of Soil analysis. Part I: physical and mineralogical methods. 2<sup>nd</sup> Edition Madison (1986). American Society of Agronomy, p1100.

[32]- **G. Miquel.** Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, (2001) p366.

[33]- **P.H. Bourellier et J. Berthelin.** Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion. *CR. Acc Sci*, 42. Edition Lavoisier (1998). Paris p98.

[34]- **L. Sanità di Toppi and R. Gabrielli.** Response to cadmium in higher plants, *J. Environ. Experimental. Botany.* 41 (1999) 105-130

[35]- **C. Bich.** Contribution à l'étude de l'activation thermique du Kaolin : Evolution de la structure cristallographique et activité pouzzolique, Thèse doctorat en Sciences et techniques du déchet. Institut national des sciences appliquées. Lyon, (2005).

[36]- **M. Legret, L. Divet et C. Juste.** Migration et spéciation des métaux lourds dans un sol soumis à des épandages de boues de station d'épuration à très forte charge en Cd et Ni, *J. Water. Res.* 22 (1988) 953-959.

[37]- **L. Charlet, and M. Schlegel.** La capacité d'échange des sols. Structures et charges à l'interface eau/particule. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France.* 2 (1999) 7-24.

[38]- **M.K Andersen, K. Raulund-Rasmussen, H.C.B. Hansen and W. Strobel.** Distribution and fractionation of heavy metals in pairs of arable and afforested soils in Denmark, *J. Eur. Soil. Sci.* 53 (2002) 491-502.

[39]- **P. Duchaufour.** Introduction à la science du sol : Sol, végétation, environnement. Edition DUNOD (2001). Paris, p331.

[40]- **B.J. Alloway.** The mobilisation of trace elements in soils. Contaminated soils. INRA. Paris. France, (1997) p133-145.

[41]- **F. Thomas, E. Rakotonarivo et J.Y. Bottero.** La charge de surface des solides divisés: origine, mesure et modélisation, *J. Bull. Sci. Géol.* 46 (1993) 217-227.

[42]- **P. Bataillard.** Évolution de la spéciation du plomb et du cadmium dans les sols. Thèse de Doctorat École Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts. Paris, (2002) p150.

[43]- **J.D.Cotter-Howells and S. Caporn.** Lead phosphate formation in soils, *J. Environmental pollution.* 93 (1996) 9-16.

[44]- **S.M. Rousseau.** Retention, transformation and mobility of toxic metals in soils. In: Toxic metals in soil-plant systems, J. S. M. R. editor. (1994) 63-152.

- [45]- **H. Babich and G. Stotzky.** Environmental factors that influence the toxicity of heavy metals and gaseous pollutants to microorganisms, *Crit. Rev. Microbiol.* 8 (1980) 99-145.
- [46]- **S.K. Gupta, M.K. Vollmer and R. Krebs.** The importance of mobile, mobilisable and pseudo-total heavy metal fractions in soil for three-level risk assessment and risk management, *J. Sci. Total Environment.* 178 (1996) 11-20.
- [47]- **L.Y Li and R.S Li.** The role of clay minerals and effect of H<sup>+</sup> ions on removal of heavy metal (Pb<sup>2+</sup>) from contaminated soil. *Can. J. Geotech/Rev.* 37 (2000) 296-307.
- [48]- **I. Lamy.** Réactivité des matières organiques des sols vis-à-vis des métaux. Journées nationales de l'étude des sols, (2002).
- [49]- **C. Fernandez-Cornudet,** Devenir du Zn, Pb et Cd issus de retombées atmosphériques dans les sols, à différentes échelles d'étude : Influence de l'usage des sols sur la distribution et la mobilité des métaux. Thèse de Doctorat. Institut National d'Agronomie. Paris-Grignon, (2006) p232.
- [50]- **J.R. Sanders, S.P McGrath and T.M. Adams.** Zinc, copper and nickel concentrations in ryegrass grown on sewage sludge-contaminated soils of different pH, *J. Sci. Food Agr.* 37 (1986) 961-968.
- [51]- **E.K. Giller, E.Witter and P.S. Mcgrath.** Toxicity of heavy metals to micro organisms and microbial processes in agricultural soils, *J. Soil. Biol. Biochem.* 30 (1998)1389-1414.
- [52]- **V. Chaignon.** Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées. Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse: Ecole doctorale, Sciences de l'Environnement: Système Terre. Université d'Aix-Marseille. France, (2001).
- [53]- **S. Deneux-Mustin, S. Roussel-Debet, C. Mustin, P. Henner, C. Munier-Lamy, C. Colle, J.Berthelin, J.Garnier-Laplace et C. Leyval.** Mobilité et transfert racinaire des éléments en traces: influence des micro-organismes du sol, *TEC et DOC* (2003). Paris, p34-54.
- [54]- **A.J.M. Baker and P.L Walker.** Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. In J. Shaw (Ed.). *Heavy Metal Tolerance in plants: Evolutionary aspects*, CRC Press. Boca Raton. Florida, (1990) p155-178.
- [55]- **F. Ekalund, S. Olsson and A. Johansen.** Changes in the succession and diversity of protozoan and microbial populations in soil spiked with a range of copper concentrations, *J. Soil. Biol. Biochem.*35 (2003) 1507-1516.
- [56]- **D.C. Adriano.** Trace elements in terrestrial environments. Biochemistry bio- availability and risks of metals, 2<sup>nd</sup> Edition (2001). New York: Springer-Verlag..
- [57]- **I. Pais et J. Benton Jones.** The handbook of Trace Elements. Boca Raton, FL, St. Lucie Press, (2000) p223.
- [58]- **J.M. Pacyna.** Estimation of atmospheric emissions of trace elements from anthropogenic sources in Europe, *J. Atmos. Environ.* 18 (1984) 41-50.

- [59]- **R.M. McKenzie**. The adsorption of Lead and other heavy metals on oxides of Manganese and Iron. Aust. J. Soil. Res. 18 (1980) 61-73.
- [60]- **G.M. Hettiarachchi and G.M. Pierzynski**. In situ stabilization of soil lead using phosphorus and manganese oxide: influence of plant growth. J. Environ. Qual. 31 (2002) 564-572.
- [61]- **M.J. Eick, J.D. Peak, P.V. Brady and J.D. Pesek**. Kinetics of lead adsorption/desorption on goethite: residence time effect, J. Soil. Sci. 164 (1999) 28-39.
- [62]- **S.H. Badawy, M.I.D. Helal, A.M. Chaudri, K. Lawlor and S.P. McGrath**. Soil solid-phase controls lead activity in soil solution, J. Environ. Qual. 31 (2002) 162-167.
- [63]- **J.P. Dubois, N. Benitez, T. Liebig, M. Baudraz et F. Okopnik**. Le cadmium dans les sols du haut jura suisse. In Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales. D. Baize, M. Tercé coord. INRA Editions (2002). Paris, p46.
- [64]- **E.J. Underwood and N.F. Suttle**. Copper. In The mineral nutrition of livestock. 3<sup>rd</sup> Edition. CABI Publishing (1999). Wallingford. Royaume-Uni, p283-342.
- [65]- **W. Smith and H. Javad**. Foundations of Materials Science and Engineering. Edition McGraw-Hill Professional (2003). ISBN : 0-07-292194-3, p223.
- [66]- **A. Manceau, M.C. Boisset, J.L. Sarret, J.L. Hazemann, M. Mench, P. Cambier and R. Prost**. Direct determination in contaminated soils by EXAFS spectroscopy, J. Environ. Sci. Technol. 30 (1996) 1540-1552.
- [67]- **M. Razeghi**. Fundamentals of Solid State Engineering. Edition Birkhäuser (2006). ISBN 0-387-28152-5, p154-156.
- [68]- **H. Christian**. Le scandium, un métal high-tech du futur, économie et technologie. La Tribune. 20 Décembre (2001).
- [69]- **H. Christian**. Les enjeux des nouveaux matériaux métalliques. Revue Ecomine (Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie) (2005).
- [70]- **Consortium de recherche pour les métaux de haute technologie (BRGM)**. Les enjeux des Éléments du Groupe du Platine dans la filière catalyse. juin (2003).
- [71]- **Consortium de recherche pour les métaux de haute technologie (BRGM)**. Les enjeux du rhénium dans la filière superalliages. juin (2003).
- [72]- **Consortium de recherche pour les métaux de haute technologie (BRGM)**. Les enjeux de l'indium dans la filière NTIC. (2003).
- [73]- **G. Michel-Claude, W. Christian, R. Jean-Claude, B. Jacques et M. Jean-Louis**. Sols et environnement. Sciences Sup, Edition Dunod. Paris. (2005).
- [74]- **D. Baize**. Petit lexique de pédologie. Editions INRA (2004). Paris.



- [75]- **AFNOR**. Qualité des sols. Recueil de Normes Françaises. 3<sup>ème</sup> Edition (1996). ISBN : 2-12-21313-4 .Paris.
- [76]- **U.C. Gupta and S.C. Gupta**. Trace element toxicity relationships to crop production and livestock and human health: implications for management, *J. Commun. Soil. Sci. Plant. Anal.* 29 (1998) 1491–522.
- [77]- **S.E. Allen, H.M Grimshaw and A.P. Rowland**. Chemical analysis. In Moore PD, Chapman SB, editors. *Methods in plant ecology*. Oxford, London, J. Blackwell Scientific Publication. (1986) 285-344.
- [78]- **B.J. Alloway and A.P. Jackson**. The behaviour of heavy metals in sewage sludge-amended soils, *J. Sci. Total Environ.* 100 (1991) 151-76.
- [79]- **S. Dudka and D.C.A. Adriano**. Environmental impacts of metal ore mining and processing: a review, *J. Environ Qual.* 26 (1997) 590-602.
- [80]- **L. Hernandez, A. Probst, J.L. Probst and E. Ulrich**. Heavy metal distribution in some French forest soils, evidence from atmospheric contamination. *J. Sci. Total Environ.* 312 (2003)195-219.
- [81]- **A. Kabata-Pendias and A.B. Mukherjee**. Trace elements from soil to human. NewYork: Springer-Verlag, (2007).
- [82]- **M.B. McBride**. Trace metals and sulfur in soils and forage of a chronic wasting disease locus, *J. Environ Chem.* 4 (2007) 134–139.
- [83]- **W.L. Lindsay and W.A. Norvell**. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper, *J. Soil. Sci. Soc. Am.* 42 (1978) 421-428.
- [84]- **P.D Iard**. Etude de la biosorption du plomb et du cuivre par des boues de stations d'épuration. Mise en œuvre d'un procédé de biosorption à contre-courant, Thèse de doctorat de l'INSA. Lyon. France, (1996).
- [85]- **A. Kabata-Pendias et K. Pendias**. Trace elements in soils and plants. 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press. Boca Raton, USA.
- [86]- **A. Kabata-Pendias et K. Pendias**. Trace elements in soils and plants. Third Edition (2001). CRC Press. Boca Raton, USA.
- [87]- **A. Klute**. Methods of Soil analysis. Part I: physical and mineralogical methods. 2<sup>nd</sup> Edition (1986). American Society of Agronomy Madison, p1188.
- [88]- **A. Tessier, P.G.C. Campbell and M. Bisson**. Sequentially extraction procedure for the speciation of particulate traces metals, *J. Analytical. Chem.* 51 (1979) 844-851.
- [89]- **E. Meers, G. Du Laing, V.G. Unamuno, E. Lesage, F.M.G. Tack. and M.G. Verloo**. Water extractability of trace metals from soils: Some Pitfalls, *J. Water. Air. Soil Pollution.* 176 (2006) 21-35.

- [90]- **N.T.L. Huong, M. Ohtsubo, L. Li, T. Higashi & M. Kanayama.** Heavy Metal Contamination of Soil and Vegetables in Wastewater Irrigated Agricultural Soil in a Suburban Area of Hanoi. Vietnam, *J. Commun. Soil. Sci. Plant. Anal.* 41 (2010) 390-407.
- [91]- **O. Nriagu.** Aglobal assessment of natural sources of atmospheric trace metals, *J. Nature.* 338 (1989) 47-49.
- [92]- **U.C. Gupta and S-C. Gupta.** Trace element toxicity relationships to crop production and livestock and human health: implications for management, *J. Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 29 (1998) 1491-522.
- [93]- **S. K. Naik and D. K. Das.** Evaluation of Various Zinc Extractants in Lowland Rice Soil under the Influence of Zinc Sulfate and Chelated Zinc, *J. Commun. Soil. Sci. Plant. Anal.* 41 (2010) 122-134
- [94]- **A.C. Garrabrants, T.T. Kosson. and D.S. Kosson.** Development and Application of Fundamental Leaching Property Protocols for Evaluating Inorganic Release from Wastes and Soils. Final Report, Rutgers, The State University of New Jersey, December (1997).
- [95]- **H. Babich and G. Stotzky.** Environmental factors that influence the toxicity of heavy metals and gaseous pollutants to microorganisms, *J. Microbiol.* 8 (1980) 99-145.
- [96]- **K. Shah, and J.M. Nongkynrih.** Metal hyperaccumulation and bioremediation, *J. Bio. Plantarum.* 51 (2007) 618-634.
- [97]- **A.Kabata-Pendias and H. Pendias.** Trace elements in soils and plants. CRC Press. London, (2010).
- [98]- **A.C. Garrabrants, T.T. Kosson. et D.S. Kosson.** Development and Application of Fundamental Leaching Property Protocols for Evaluating Inorganic Release from Wastes and Soils. Final Report, Rutgers, The State University of New Jersey. December (1997).
- [99]- **L.A. Oste, J. Dolfing, W.C. Ma et T.M. Lexmond.** Cadmium uptake by earthworms as related to the availability in the soil and the intestine, *J. Environ. Tox. Chem.* 20 (2001) 1785-1791.
- [100]- **S.K. Naik and D.K. Das.** Evaluation of Various Zinc Extractants in Lowland Rice Soil under the Influence of Zinc Sulfate and Chelated Zinc, *J. Commun. Soil. Sci. Plant. Anal.* 41(2010) 122-134.
- [101]- **S. Sharma, P. Sharma and A.K. Bhattacharyya.** Accumulation of Heavy Metals in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings Grown in Soils Amended with Electroplating Industrial Sludge, *J. Commun. Soil. Sci. Plant. Anal.* 41 (2010) 2505-2516.

---

## **ANNEXES**

---

**Annexe 01: Résultats de la sédimentation des sols agricoles étudiés.****I- Profondeur 0-20cm**

" : Seconde, ' : minute et h : heure

Fig. III-11 2006	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>sol F</b>	20''	15	0,9106	0,9047	106	47
	30''	15	0,9097	0,9047	87	40
	1'	15	0,9097	0,9047	62	40
	2'	15	0,9097	0,9047	42	40
	5'	15	0,9088	0,9047	26	33
	10'	15	0,9088	0,9047	19	33
	30'	15	0,9083	0,9047	11	29
	1h	15	0,9079	0,9047	8	25
	2h	15	0,9079	0,9047	5	25
	5h	15	0,9070	0,9047	4	18
24h	15	0,9020	0,9047	2	15	

Fig. III-11 2006	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol R</b>	20''	16	0,9155	0,9096	107	47
	30''	16	0,9146	0,9096	88	40
	1'	16	0,9146	0,9096	62	40
	2'	16	0,9146	0,9096	42	40
	5'	16	0,9137	0,9096	26	33
	10'	16	0,9137	0,9096	19	33
	30'	16	0,9132	0,9096	11	29
	1h	16	0,9128	0,9096	8	26
	2h	16	0,9128	0,9096	5	26
	5h	16	0,9119	0,9096	4	18
24h	16	0,9068	0,9096	2	15	

Fig. III-11 2006	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol K</b>	20''	15	0,9163	0,9104	107	47
	30''	15	0,9154	0,9104	88	40
	1'	15	0,9154	0,9104	62	40
	2'	15	0,9154	0,9104	42	40
	5'	15	0,9145	0,9104	26	33
	10'	15	0,9145	0,9104	19	33
	30'	15	0,9140	0,9104	11	29
	1h	15	0,9136	0,9104	8	26
	2h	15	0,9136	0,9104	5	26
	5h	15	0,9127	0,9104	4	18
24h	15	0,9077	0,9104	2	15	

Fig. III-12 2007	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol F</b>	20''	17	1,0305	1,0238	120	53
	30''	17	1,0295	1,0238	99	45
	1'	17	1,0295	1,0238	70	45
	2'	17	1,0295	1,0238	47	45
	5'	17	1,0285	1,0238	30	37
	10'	17	1,0285	1,0238	22	37
	30'	17	1,0279	1,0238	12	33
	1h	17	1,0274	1,0238	9	29
	2h	17	1,0274	1,0238	6	29
	5h	17	1,0264	1,0238	4	21
24h	17	1,0208	1,0238	2	16	

Fig. III-12 2007	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol R</b>	20''	15	0,9114	0,9055	106	47
	30''	15	0,9105	0,9055	87	40
	1'	15	0,9105	0,9055	62	40
	2'	15	0,9105	0,9055	42	40
	5'	15	0,9096	0,9055	26	33
	10'	15	0,9096	0,9055	19	33
	30'	15	0,9092	0,9055	11	29
	1h	15	0,9087	0,9055	8	25
	2h	15	0,9087	0,9055	5	25
	5h	15	0,9078	0,9055	4	18
	24h	15	0,9028	0,9055	2	15

Fig. III-12 2007	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol K</b>	20''	17	1,0419	1,0352	121	54
	30''	17	1,0409	1,0352	100	46
	1'	17	1,0409	1,0352	71	46
	2'	17	1,0409	1,0352	48	46
	5'	17	1,0398	1,0352	30	37
	10'	17	1,0398	1,0352	22	37
	30'	17	1,0393	1,0352	12	33
	1h	17	1,0388	1,0352	9	29
	2h	17	1,0388	1,0352	6	29
	5h	17	1,0378	1,0352	4	21
	24h	17	1,0321	1,0352	2	17

Fig. III-13 2008	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol F</b>	20''	16	0,9995	0,9930	116	52
	30''	16	0,9985	0,9930	96	44
	1'	16	0,9985	0,9930	68	44
	2'	16	0,9985	0,9930	46	44
	5'	16	0,9975	0,9930	29	36
	10'	16	0,9975	0,9930	21	36
	30'	16	0,9970	0,9930	12	32
	1h	16	0,9965	0,9930	9	28
	2h	16	0,9965	0,9930	6	28
	5h	16	0,9955	0,9930	4	20
	24h	16	0,9901	0,9930	2	16

Fig. III-13 2008	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol R</b>	20''	16	0,9775	0,9712	114	51
	30''	16	0,9765	0,9712	93	43
	1'	16	0,9765	0,9712	66	43
	2'	16	0,9765	0,9712	45	43
	5'	16	0,9755	0,9712	28	35
	10'	16	0,9755	0,9712	20	35
	30'	16	0,9751	0,9712	12	31
	1h	16	0,9746	0,9712	9	27
	2h	16	0,9746	0,9712	6	27
	5h	16	0,9736	0,9712	4	19
	24h	16	0,9682	0,9712	2	16

Fig. III-13 2008	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol K</b>	20''	17	1,0077	1,0011	117	52
	30''	17	1,0067	1,0011	96	44
	1'	17	1,0067	1,0011	68	44
	2'	17	1,0067	1,0011	46	44
	5'	17	1,0057	1,0011	29	36
	10'	17	1,0057	1,0011	21	36
	30'	17	1,0052	1,0011	12	32
	1h	17	1,0047	1,0011	9	28
	2h	17	1,0047	1,0011	6	28
	5h	17	1,0037	1,0011	4	20
	24h	17	0,9981	1,0011	2	16

Fig. III-14 2009	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol F</b>	20''	17	1,0040	0,9975	117	52
	30''	17	1,0030	0,9975	96	44
	1'	17	1,0030	0,9975	68	44
	2'	17	1,0030	0,9975	46	44
	5'	17	1,0020	0,9975	29	36
	10'	17	1,0020	0,9975	21	36
	30'	17	1,0015	0,9975	12	32
	1h	17	1,0010	0,9975	9	28
	2h	17	1,0010	0,9975	6	28
	5h	17	1,0000	0,9975	4	20
	24h	17	0,9945	0,9975	2	16

Fig. III-14 2009	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol K</b>	20''	14	1,0050	0,9985	121,3	52
	30''	14	1,0050	0,9985	92	52
	1'	14	1,0050	0,9985	65	52
	2'	14	1,0050	0,9985	44	52
	5'	14	1,0045	0,9985	28	48
	10'	14	1,0040	0,9985	20	44
	30'	14	1,0040	0,9985	11	32
	1h	14	1,0025	0,9985	8	32
	2h	14	1,0025	0,9985	6	32
	5h	14	1,0020	0,9985	4	28
	24h	14	1,0010	0,9985	2	20

Fig. III-14 2009	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol R</b>	20''	14	1,0085	0,9988	121,5	52
	30''	14	1,0080	0,9988	92	52
	1'	14	1,0065	0,9988	65	52
	2'	14	1,0060	0,9988	44	52
	5'	14	1,0040	0,9988	28	48
	10'	14	1,0040	0,9988	20	44
	30'	14	1,0020	0,9988	11	32
	1h	14	1,0020	0,9988	8	32
	2h	14	1,0020	0,9988	6	32
	5h	14	1,0020	0,9988	4	28
	24h	14	1,0020	0,9988	2	20

Fig. III-15 2010	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol F</b>	20''	16	0,9873	0,9809	115	51
	30''	16	0,9863	0,9809	94	43
	1'	16	0,9863	0,9809	67	43
	2'	16	0,9863	0,9809	45	43
	5'	16	0,9853	0,9809	29	35
	10'	16	0,9853	0,9809	21	35
	30'	16	0,9848	0,9809	12	31
	1h	16	0,9843	0,9809	9	28
	2h	16	0,9843	0,9809	6	28
	5h	16	0,9833	0,9809	4	20
24h	16	0,9779	0,9809	2	16	

Fig. III-15 2010	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol R</b>	20''	17	1,0170	1,0105	119	53
	30''	17	1,0160	1,0105	97	45
	1'	17	1,0160	1,0105	69	45
	2'	17	1,0160	1,0105	47	45
	5'	17	1,0150	1,0105	29	36
	10'	17	1,0150	1,0105	21	36
	30'	17	1,0145	1,0105	12	32
	1h	17	1,0140	1,0105	9	28
	2h	17	1,0140	1,0105	6	28
	5h	17	1,0130	1,0105	4	20
24h	17	1,0074	1,0105	2	16	

Fig. III-15 2010	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol K</b>	20''	19	1,1443	1,0001	133	59
	30''	19	1,1431	1,0001	109	50
	1'	19	1,1431	1,0001	78	50
	2'	19	1,1431	1,0001	52	50
	5'	19	1,1420	1,0001	33	41
	10'	19	1,1420	1,0001	24	41
	30'	19	1,1414	1,0001	14	36
	1h	19	1,1409	1,0001	10	32
	2h	19	1,1409	1,0001	7	32
	5h	19	1,1397	1,0001	5	23
24h	19	1,1335	1,0001	2	18	

## II- Profondeur 20-40cm

Fig. III-16 2006	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol F</b>	20''	16	0,9608	0,9546	112	50
	30''	16	0,9598	0,9546	92	42
	1'	16	0,9598	0,9546	65	42
	2'	16	0,9598	0,9546	44	42
	5'	16	0,9589	0,9546	28	34
	10'	16	0,9589	0,9546	20	34
	30'	16	0,9584	0,9546	11	31
	1h	16	0,9579	0,9546	9	27
	2h	16	0,9579	0,9546	6	27
	5h	16	0,9569	0,9546	4	19
24h	16	0,9517	0,9546	2	15	

Fig. III-16 2006	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol R</b>	20''	14	0,8360	0,8306	97	43
	30''	14	0,8352	0,8306	80	37
	1'	14	0,8352	0,8306	57	37
	2'	14	0,8352	0,8306	38	37
	5'	14	0,8343	0,8306	24	30
	10'	14	0,8343	0,8306	17	30
	30'	14	0,8339	0,8306	10	27
	1h	14	0,8335	0,8306	7	23
	2h	14	0,8335	0,8306	5	23
	5h	14	0,8327	0,8306	3	17
24h	14	0,8281	0,8306	2	13	

Fig. III-16 2006	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol K</b>	20''	15	0,8935	0,8877	104	46
	30''	15	0,8926	0,8877	85	39
	1'	15	0,8926	0,8877	61	39
	2'	15	0,8926	0,8877	41	39
	5'	15	0,8917	0,8877	26	32
	10'	15	0,8917	0,8877	19	32
	30'	15	0,8913	0,8877	11	28
	1h	15	0,8908	0,8877	8	25
	2h	15	0,8908	0,8877	5	25
	5h	15	0,8899	0,8877	4	18
24h	15	0,8850	0,8877	2	14	

Fig. III-17 2007	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol F</b>	20''	17	1,0048	0,9983	117	52
	30''	17	1,0038	0,9983	96	44
	1'	17	1,0038	0,9983	68	44
	2'	17	1,0038	0,9983	46	44
	5'	17	1,0028	0,9983	29	36
	10'	17	1,0028	0,9983	21	36
	30'	17	1,0023	0,9983	12	32
	1h	17	1,0018	0,9983	9	28
	2h	17	1,0018	0,9983	6	28
	5h	17	1,0008	0,9983	4	20
24h	17	0,9953	0,9983	2	16	

Fig. III-17 2007	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol R</b>	20''	15	0,8886	0,8828	104	46
	30''	15	0,8877	0,8828	85	39
	1'	15	0,8877	0,8828	60	39
	2'	15	0,8877	0,8828	41	39
	5'	15	0,8868	0,8828	26	32
	10'	15	0,8868	0,8828	19	32
	30'	15	0,8864	0,8828	11	28
	1h	15	0,8859	0,8828	8	25
	2h	15	0,8859	0,8828	5	25
	5h	15	0,8851	0,8828	4	18
24h	15	0,8802	0,8828	2	14	



Fig. III-17 2007	Temps	Température (°)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol K</b>	20''	17	1,0158	1,0092	118	53
	30''	17	1,0148	1,0092	97	45
	1'	17	1,0148	1,0092	69	45
	2'	17	1,0148	1,0092	47	45
	5'	17	1,0138	1,0092	29	36
	10'	17	1,0138	1,0092	21	36
	30'	17	1,0133	1,0092	12	32
	1h	17	1,0128	1,0092	9	28
	2h	17	1,0128	1,0092	6	28
	5h	17	1,0118	1,0092	4	20
24h	17	1,0062	1,0092	2	16	

Fig. III-18 2008	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol F</b>	20''	16	0,9746	0,9683	114	50
	30''	16	0,9737	0,9683	93	43
	1'	16	0,9737	0,9683	66	43
	2'	16	0,9737	0,9683	45	43
	5'	16	0,9727	0,9683	28	35
	10'	16	0,9727	0,9683	20	35
	30'	16	0,9722	0,9683	12	31
	1h	16	0,9717	0,9683	9	27
	2h	16	0,9717	0,9683	6	27
	5h	16	0,9708	0,9683	4	19
24h	16	0,9654	0,9683	2	16	

Fig. III-18 2008	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol R</b>	20''	16	0,9530	0,9869	111	49
	30''	16	0,9521	0,9869	91	42
	1'	16	0,9521	0,9869	65	42
	2'	16	0,9521	0,9869	44	42
	5'	16	0,9511	0,9869	28	34
	10'	16	0,9511	0,9869	20	34
	30'	16	0,9507	0,9869	11	30
	1h	16	0,9502	0,9869	9	27
	2h	16	0,9502	0,9869	6	27
	5h	16	0,9492	0,9869	4	19
24h	16	0,9440	0,9869	2	15	

Fig. III-18 2008	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol K</b>	20''	16	0,9824	0,9760	114	51
	30''	16	0,9814	0,9760	94	43
	1'	16	0,9814	0,9760	67	43
	2'	16	0,9814	0,9760	45	43
	5'	16	0,9804	0,9760	28	35
	10'	16	0,9804	0,9760	21	35
	30'	16	0,9799	0,9760	12	31
	1h	16	0,9795	0,9760	9	27
	2h	16	0,9795	0,9760	6	27
	5h	16	0,9785	0,9760	4	20
24h	16	0,9731	0,9760	2	16	

Fig. III-19 2009	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol F</b>	20''	16	0,9787	0,9724	114	51
	30''	16	0,9777	0,9724	94	43
	1'	16	0,9777	0,9724	66	43
	2'	16	0,9777	0,9724	45	43
	5'	16	0,9768	0,9724	28	35
	10'	16	0,9768	0,9724	20	35
	30'	16	0,9763	0,9724	12	31
	1h	16	0,9758	0,9724	9	27
	2h	16	0,9758	0,9724	6	27
	5h	16	0,9748	0,9724	4	19
	24h	16	0,9695	0,9724	2	16

Fig. III-19 2009	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol R</b>	20''	17	1,0085	1,0020	118	52
	30''	17	1,0075	1,0020	96	44
	1'	17	1,0075	1,0020	68	44
	2'	17	1,0075	1,0020	46	44
	5'	17	1,0065	1,0020	29	36
	10'	17	1,0065	1,0020	21	36
	30'	17	1,0060	1,0020	12	32
	1h	17	1,0055	1,0020	9	28
	2h	17	1,0055	1,0020	6	28
	5h	17	1,0045	1,0020	4	20
	24h	17	0,9989	1,0020	2	16

Fig. III-19 2009	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol K</b>	20''	17	1,0342	1,0275	121	54
	30''	17	1,0331	1,0275	99	45
	1'	17	1,0331	1,0275	70	45
	2'	17	1,0331	1,0275	47	45
	5'	17	1,0321	1,0275	30	37
	10'	17	1,0321	1,0275	22	37
	30'	17	1,0316	1,0275	12	33
	1h	17	1,0311	1,0275	9	29
	2h	17	1,0311	1,0275	6	29
	5h	17	1,0301	1,0275	4	21
	24h	17	1,0244	1,0275	2	16

Fig. III-20 2010	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol F</b>	20''	16	0,9624	0,9562	112	50
	30''	16	0,9614	0,9562	92	42
	1'	16	0,9614	0,9562	65	42
	2'	16	0,9614	0,9562	44	42
	5'	16	0,9605	0,9562	28	35
	10'	16	0,9605	0,9562	20	35
	30'	16	0,9600	0,9562	12	31
	1h	16	0,9595	0,9562	9	27
	2h	16	0,9595	0,9562	6	27
	5h	16	0,9586	0,9562	4	19
	24h	16	0,9533	0,9562	2	15

Fig. III-20 2010	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol R</b>	20''	16	0,9918	0,9853	116	51
	30''	16	0,9908	0,9853	95	43
	1'	16	0,9908	0,9853	67	43
	2'	16	0,9908	0,9853	45	43
	5'	16	0,9898	0,9853	29	36
	10'	16	0,9898	0,9853	21	36
	30'	16	0,9893	0,9853	12	32
	1h	16	0,9888	0,9853	9	28
	2h	16	0,9888	0,9853	6	28
	5h	16	0,9878	0,9853	4	20
24h	16	0,9824	0,9853	2	16	

Fig. III-20 2010	Temps	Température (°C)	Densité de Liquide A	Densité de Liquide B	Diamètre calculé (µm)	% des grains
<b>Sol K</b>	20''	18	1,0057	0,9985	130	58
	30''	18	1,0046	0,9985	107	49
	1'	18	1,0046	0,9985	76	49
	2'	18	1,0046	0,9985	51	49
	5'	18	1,0035	0,9985	32	40
	10'	18	1,0035	0,9985	23	40
	30'	18	1,0030	0,9985	13	36
	1h	18	1,0024	0,9985	10	31
	2h	18	1,0024	0,9985	7	31
	5h	18	1,0013	0,9985	4	22
24h	18	1,0005	0,9985	2	18	

**Calcul du pourcentage (%) des grains sédimentés** [partie expérimentale, pages: 46-47]

$$\% = \frac{V'}{m} \times \frac{\gamma_s}{\gamma_s - R_c \cdot \gamma_w} \times \gamma_w \times [R_c - R_t]$$

- V': volume de la suspension (1L) en m<sup>3</sup> ;
- m: masse de prise d'essai (en N), exemple: m = 20 g = 20 10<sup>-3</sup> kg = 0,2 N
- γ<sub>s</sub>: poids spécifique de la particule (γ<sub>s</sub>= 26,5 kN/m<sup>3</sup>),
- γ<sub>w</sub> : poids spécifique de l'eau (γ<sub>w</sub>= 10 kN/m<sup>3</sup>),
- R<sub>c</sub> = la lecture du densimètre à t, (densité du liquide A)
- R<sub>t</sub> = la lecture du densimètre dans l'éprouvette témoin (densité du liquide B)
- H<sub>c</sub> = la hauteur déplacement du densimètre de la solution:
  - H<sub>c</sub> = 0 pour les trois première lectures;
  - H<sub>c</sub> = 1,4 cm pour les lectures >3.
- η: viscosité du liquide de décantation.

Le tableau ci-dessous donne la viscosité utilisée lors du calcul du pourcentage des grains:

Température (C°)	Viscosité [10 <sup>-3</sup> Pa.s]
14	1,169
15	1,139
16	1,109
17	1,081
18	1,053
19	1,027

**Annexe 02: Moyenne  $\pm$  écart-type des teneurs des éléments majeurs (EM) (g/kg/MS) obtenues par l'extraction séquentielle dans les sols étudiés.**

*On notera que :*

**F1:** phase échangeable, **F2:** phase acido- soluble/ carbonate, **F3:** phase réductible, **F4:** phase oxydable et **F5:** phase résiduelle.

**I- Profondeur 0-20cm**

<b>Tableau III- 36, 2006</b>					
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
<b>Concentration en g/kg par rapport à la MS</b>					
<b>Sol F</b>					
F1	1,055 $\pm$ 0,057	3,233 $\pm$ 0,139	1,300 $\pm$ 0,051	4,333 $\pm$ 0,144	0,005 $\pm$ 0,0003
F2	39,521 $\pm$ 2,150	0,117 $\pm$ 0,005	0,620 $\pm$ 0,024	8,322 $\pm$ 0,277	0,008 $\pm$ 0,0004
F3	66,220 $\pm$ 3,602	0,234 $\pm$ 0,010	1,310 $\pm$ 0,052	1,962 $\pm$ 0,065	0,680 $\pm$ 0,037
F4	1,014 $\pm$ 0,055	0,007 $\pm$ 0,0003	0,270 $\pm$ 0,011	0,152 $\pm$ 0,005	0,010 $\pm$ 0,001
F5	95,070 $\pm$ 5,172	69,399 $\pm$ 2,991	2,530 $\pm$ 0,100	80,461 $\pm$ 2,679	12,110 $\pm$ 0,653
<b>Sol K</b>					
F1	1,675 $\pm$ 0,091	3,523 $\pm$ 0,152	1,301 $\pm$ 0,051	5,536 $\pm$ 0,184	0,005 $\pm$ 0,0003
F2	185,211 $\pm$ 10,075	1,174 $\pm$ 0,051	3,539 $\pm$ 0,140	42,327 $\pm$ 1,409	0,012 $\pm$ 0,0006
F3	242,634 $\pm$ 13,199	2,210 $\pm$ 0,095	6,220 $\pm$ 0,246	8,067 $\pm$ 0,269	4,210 $\pm$ 0,227
F4	5,199 $\pm$ 0,283	0,564 $\pm$ 0,024	1,281 $\pm$ 0,051	2,649 $\pm$ 0,088	0,231 $\pm$ 0,012
F5	142,981 $\pm$ 7,778	107,660 $\pm$ 4,64	10,129 $\pm$ 0,400	90,265 $\pm$ 3,006	18,840 $\pm$ 1,015
<b>Sol R</b>					
F1	1,316 $\pm$ 0,072	3,520 $\pm$ 0,152	1,288 $\pm$ 0,051	5,266 $\pm$ 0,175	0,018 $\pm$ 0,001
F2	377,594 $\pm$ 20,541	1,909 $\pm$ 0,082	7,450 $\pm$ 0,294	83,913 $\pm$ 2,794	0,070 $\pm$ 0,004
F3	22,951 $\pm$ 1,249	0,219 $\pm$ 0,009	1,251 $\pm$ 0,049	1,889 $\pm$ 0,063	0,680 $\pm$ 0,037
F4	91,332 $\pm$ 4,968	8,711 $\pm$ 0,375	49,571 $\pm$ 1,958	75,178 $\pm$ 2,503	0,030 $\pm$ 0,002
F5	33,216 $\pm$ 1,807	17,410 $\pm$ 0,750	1,760 $\pm$ 0,070	15,344 $\pm$ 0,511	2,510 $\pm$ 0,135

<b>Tableau V-37, 2007</b>					
	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>
<b>Concentration en g/kg par rapport à la MS</b>					
<b>Sol F</b>					
F1	1,034 $\pm$ 0,056	2,920 $\pm$ 0,126	1,400 $\pm$ 0,055	3,391 $\pm$ 0,113	0,005 $\pm$ 0,001
F2	39,498 $\pm$ 2,149	0,112 $\pm$ 0,005	0,670 $\pm$ 0,026	6,529 $\pm$ 0,217	0,007 $\pm$ 0,002
F3	66,148 $\pm$ 3,598	0,211 $\pm$ 0,009	1,410 $\pm$ 0,056	1,539 $\pm$ 0,051	0,660 $\pm$ 0,036
F4	1,013 $\pm$ 0,055	0,013 $\pm$ 0,005	0,290 $\pm$ 0,012	0,120 $\pm$ 0,004	0,010 $\pm$ 0,001
F5	94,966 $\pm$ 5,166	62,661 $\pm$ 2,701	2,720 $\pm$ 0,107	63,122 $\pm$ 2,102	11,749 $\pm$ 0,633
<b>Sol K</b>					
F1	1,578 $\pm$ 0,086	3,102 $\pm$ 0,134	1,400 $\pm$ 0,055	4,549 $\pm$ 0,151	0,004 $\pm$ 0,001
F2	174,432 $\pm$ 9,489	1,034 $\pm$ 0,045	0,670 $\pm$ 0,026	34,779 $\pm$ 1,158	0,009 $\pm$ 0,001
F3	228,514 $\pm$ 12,431	1,946 $\pm$ 0,084	1,410 $\pm$ 0,056	6,616 $\pm$ 0,220	3,401 $\pm$ 0,183
F4	4,951 $\pm$ 0,269	0,497 $\pm$ 0,021	0,290 $\pm$ 0,011	2,165 $\pm$ 0,072	0,009 $\pm$ 0,001
F5	134,660 $\pm$ 7,326	94,782 $\pm$ 4,085	2,720 $\pm$ 0,107	74,169 $\pm$ 2,470	15,209 $\pm$ 0,820
<b>Sol R</b>					
F1	1,112 $\pm$ 0,060	5,698 $\pm$ 0,246	0,789 $\pm$ 0,031	4,514 $\pm$ 0,150	0,007 $\pm$ 0,002
F2	319,012 $\pm$ 17,354	3,088 $\pm$ 0,133	4,559 $\pm$ 0,180	71,910 $\pm$ 2,395	0,027 $\pm$ 0,002
F3	19,391 $\pm$ 1,055	0,350 $\pm$ 0,015	0,759 $\pm$ 0,030	1,619 $\pm$ 0,054	0,260 $\pm$ 0,014
F4	77,162 $\pm$ 4,198	14,118 $\pm$ 0,608	30,359 $\pm$ 1,199	64,439 $\pm$ 2,146	0,010 $\pm$ 0,001
F5	28,063 $\pm$ 1,527	28,211 $\pm$ 1,216	1,081 $\pm$ 0,043	13,152 $\pm$ 0,438	0,960 $\pm$ 0,052

<b>Tableau III-38, 2008</b>					
<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>	
<b>Concentration en g/kg par rapport à la MS</b>					
<b>Sol F</b>					
F1	1,029 ± 0,056	2,831 ± 0,122	2,120 ± 0,084	2,502 ± 0,083	0,005 ± 0,001
F2	38,561 ± 2,098	0,109 ± 0,005	1,010 ± 0,040	4,817 ± 0,160	0,008 ± 0,003
F3	64,611 ± 3,515	0,199 ± 0,009	2,140 ± 0,085	1,141 ± 0,038	0,710 ± 0,038
F4	0,990 ± 0,054	0,013 ± 0,006	0,440 ± 0,017	0,088 ± 0,003	0,011 ± 0,001
F5	92,759 ± 5,046	60,899 ± 2,625	4,140 ± 0,164	46,571 ± 1,551	12,459 ± 0,672
<b>Sol K</b>					
F1	1,522 ± 0,083	1,548 ± 0,067	3,080 ± 0,122	4,077 ± 0,136	0,003 ± 0,001
F2	168,312 ± 9,156	0,508 ± 0,022	8,432 ± 0,333	31,170 ± 1,038	0,008 ± 0,003
F3	220,496 ± 11,995	0,970 ± 0,042	14,800 ± 0,585	5,929 ± 0,197	2,999 ± 0,162
F4	4,777 ± 0,260	0,249 ± 0,011	3,042 ± 0,121	1,951 ± 0,065	0,010 ± 0,008
F5	129,935 ± 7,068	47,490 ± 2,047	24,120 ± 0,953	66,472 ± 2,214	13,440 ± 0,724
<b>Sol R</b>					
F1	0,850 ± 0,046	2,450 ± 0,106	0,640 ± 0,025	3,085 ± 0,103	0,006 ± 0,003
F2	237,874 ± 12,940	1,331 ± 0,057	3,718 ± 0,147	48,983 ± 1,631	0,022 ± 0,011
F3	14,442 ± 0,786	0,150 ± 0,006	0,619 ± 0,024	1,102 ± 0,037	0,220 ± 0,012
F4	575,485 ± 31,306	6,060 ± 0,261	24,770 ± 0,978	43,884 ± 1,461	0,010 ± 0,005
F5	20,899 ± 1,137	12,121 ± 0,522	0,879 ± 0,035	8,957 ± 0,298	0,790 ± 0,043

<b>Tableau III- 39, 2009</b>					
<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>	
<b>Concentration en g/kg par rapport à la MS</b>					
<b>Sol F</b>					
F1	1,006 ± 0,055	2,638 ± 0,114	4,190 ± 0,166	1,568 ± 0,052	0,006 ± 0,003
F2	37,672 ± 2,049	0,101 ± 0,004	2,000 ± 0,079	3,009 ± 0,100	0,008 ± 0,002
F3	63,122 ± 3,434	0,191 ± 0,008	4,231 ± 0,167	0,710 ± 0,024	0,740 ± 0,040
F4	0,967 ± 0,053	0,012 ± 0,006	0,870 ± 0,034	0,052 ± 0,002	0,010 ± 0,005
F5	90,623 ± 4,930	56,747 ± 2,446	8,179 ± 0,323	29,131 ± 0,970	13,141 ± 0,708
<b>Sol K</b>					
F1	1,367 ± 0,074	0,850 ± 0,037	4,409 ± 0,174	2,799 ± 0,093	0,003 ± 0,001
F2	151,163 ± 8,223	0,280 ± 0,012	12,050 ± 0,476	21,388 ± 0,712	0,007 ± 0,003
F3	198,030 ± 10,773	0,529 ± 0,023	21,143 ± 0,835	4,070 ± 0,136	2,720 ± 0,147
F4	4,291 ± 0,233	0,141 ± 0,076	4,348 ± 0,172	1,339 ± 0,046	0,010 ± 0,054
F5	116,696 ± 6,348	25,881 ± 1,115	34,461 ± 1,361	45,627 ± 1,519	12,190 ± 0,657
<b>Sol R</b>					
F1	0,563 ± 0,031	1,020 ± 0,044	0,320 ± 0,013	1,381 ± 0,046	0,004 ± 0,002
F2	157,562 ± 8,571	0,550 ± 0,024	1,820 ± 0,072	22,001 ± 0,733	0,018 ± 0,009
F3	9,566 ± 0,520	0,060 ± 0,003	0,300 ± 0,012	0,500 ± 0,017	0,170 ± 0,008
F4	381,187 ± 20,737	2,530 ± 0,113	12,131 ± 0,481	19,711 ± 0,656	0,010 ± 0,004
F5	13,843 ± 0,753	5,050 ± 0,218	0,431 ± 0,017	4,018 ± 0,134	0,630 ± 0,034

<b>Tableau III-40, 2010</b>					
<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>	
<b>Concentration en g/kg par rapport à la MS</b>					
<b>Sol F</b>					
F1	1,012 ± 0,065	2,450 ± 0,016	6,269 ± 0,210	1,151 ± 0,026	0,006 ± 0,001
F2	38,672 ± 7,144	0,089 ± 0,005	3,000 ± 0,573	2,221 ± 0,201	0,009 ± 0,002
F3	64,797 ± 9,359	0,172 ± 0,010	6,321 ± 1,006	0,521 ± 0,038	0,780 ± 0,098
F4	0,993 ± 0,203	0,011 ± 0,003	1,311 ± 0,207	0,041 ± 0,013	0,010 ± 0,001
F5	93,026 ± 5,515	52,718 ± 0,492	12,229 ± 1,640	21,479 ± 0,429	13,821 ± 0,436
<b>Sol K</b>					
F1	1,188 ± 0,055	0,370 ± 0,106	5,312 ± 0,248	0,791 ± 0,038	0,002 ± 0,001
F2	131,318 ± 2,104	0,120 ± 0,004	14,518 ± 0,119	6,039 ± 0,074	0,005 ± 0,002
F3	172,032 ± 3,525	0,231 ± 0,007	25,473 ± 0,250	1,150 ± 0,017	1,810 ± 0,042
F4	3,727 ± 0,054	0,060 ± 0,010	5,238 ± 0,052	0,380 ± 0,001	0,010 ± 0,001
F5	101,376 ± 5,061	11,420 ± 2,272	41,519 ± 0,483	12,890 ± 0,715	8,080 ± 0,745
<b>Sol R</b>					
F1	0,311 ± 0,017	0,360 ± 0,016	0,140 ± 0,006	0,469 ± 0,016	0,003 ± 0,001
F2	87,156 ± 4,741	0,190 ± 0,008	0,820 ± 0,032	7,400 ± 0,246	0,011 ± 0,001
F3	5,292 ± 0,288	0,020 ± 0,001	0,140 ± 0,006	0,170 ± 0,006	0,110 ± 0,006
F4	210,854 ± 11,470	0,880 ± 0,038	5,440 ± 0,215	6,631 ± 0,221	0,00001 ± 0,000003
F5	7,657 ± 0,417	1,760 ± 0,076	0,190 ± 0,008	1,350 ± 0,045	0,410 ± 0,022

**II- Profondeur 20-40cm**

<b>Tableau III-41, 2006</b>					
<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>	
<b>Concentration en g/kg par rapport à la MS</b>					
<b>Sol F</b>					
F1	1,011 ± 0,055	3,159 ± 0,136	1,270 ± 0,050	4,232 ± 0,141	0,003 ± 0,001
F2	38,629 ± 2,101	0,121 ± 0,005	0,610 ± 0,024	8,130 ± 0,271	0,005 ± 0,002
F3	64,692 ± 3,519	0,221 ± 0,010	1,280 ± 0,051	1,916 ± 0,064	0,659 ± 0,036
F4	0,991 ± 0,054	0,007 ± 0,001	0,260 ± 0,010	0,140 ± 0,005	0,010 ± 0,001
F5	92,877 ± 5,053	67,802 ± 2,922	2,470 ± 0,098	78,602 ± 2,617	10,750 ± 0,579
<b>Sol K</b>					
F1	1,637 ± 0,089	3,441 ± 0,148	1,271 ± 0,050	5,408 ± 0,180	0,002 ± 0,001
F2	180,947 ± 9,844	1,136 ± 0,049	3,459 ± 0,137	41,346 ± 1,377	0,009 ± 0,003
F3	237,048 ± 12,895	2,159 ± 0,093	6,069 ± 0,240	7,865 ± 0,262	4,191 ± 0,226
F4	5,136 ± 0,279	0,551 ± 0,024	1,249 ± 0,049	2,573 ± 0,086	0,011 ± 0,001
F5	139,689 ± 7,599	105,173 ± 4,533	9,899 ± 0,391	88,173 ± 2,936	17,490 ± 0,943
<b>Sol R</b>					
F1	0,298 ± 0,016	6,242 ± 0,269	0,048 ± 0,002	2,911 ± 0,097	0,126 ± 0,007
F2	89,123 ± 4,848	3,375 ± 0,145	0,278 ± 0,011	46,209 ± 1,539	0,530 ± 0,029
F3	5,416 ± 0,295	0,383 ± 0,017	0,046 ± 0,002	1,040 ± 0,035	5,227 ± 0,282
F4	21,554 ± 1,173	15,454 ± 0,666	1,852 ± 0,073	41,408 ± 1,379	0,158 ± 0,009
F5	7,839 ± 0,426	30,891 ± 1,331	0,066 ± 0,003	8,452 ± 0,281	9,187 ± 0,495

<b>Tableau III-42, 2007</b>					
<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>	
<b>Concentration en g/kg par rapport à la MS</b>					
<b>Sol F</b>					
F1	1,028 ±0,056	2,841 ±0,122	1,360 ±0,054	3,306 ±0,110	0,004 ±0,001
F2	38,502 ±2,095	0,109 ±0,005	0,650 ±0,026	6,358 ±0,212	0,006 ±0,002
F3	64,513 ±3,510	0,199 ±0,009	1,370 ±0,054	1,500 ±0,050	0,640±0,034
F4	0,988 ±0,054	0,013±0,001	0,280 ±0,011	0,109 ±0,004	0,010 ±0,001
F5	92,619 ±5,038	61,108±2,634	2,660 ±0,105	61,549 ±2,050	10,400± 0,561
<b>Sol K</b>					
F1	1,020 ±0,055	2,856 ±0,123	1,360 ±0,054	3,311 ±0,110	0,004 ± 0,001
F2	0,050±0,003	1,529 ±0,066	3,030 ±0,120	2,120 ±0,071	0,002± 0,001
F3	0,360 ±0,020	170,152 ±7,334	1,000 ±0,040	5,810± 0,193	0,007 ± 0,001
F4	0,290 ±0,016	222,927 ±9,608	1,900±0,075	10,191 ± 0,339	3,380 ± 0,182
F5	0,010 ±0,001	4,827±0,208	0,480 ±0,019	2,099 ± 0,070	0,010 ± 0,001
<b>Sol R</b>					
F1	1,014 ±0,055	2,839 ±0,122	1,361 ±0,054	3,316 ±0,110	0,004 ±0,001
F2	1,055 ±0,057	5,529±0,238	0,769 ±0,030	4,392 ±0,146	0,006 ±0,002
F3	309,803 ±16,853	3,000 ±0,129	4,430 ±0,175	69,839 ±2,326	0,024 ±0,001
F4	18,823 ±1,024	0,341 ±0,015	0,739 ±0,029	1,573 ±0,052	0,240 ±0,013
F5	74,925 ±4,076	13,709 ±0,591	29,491 ±1,165	62,584 ±2,084	0,010 ± 0,001

<b>Tableau III-43, 2008</b>					
<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>	
<b>Concentration en g/kg par rapport à la MS</b>					
<b>Sol F</b>					
F1	1,016 ± 0,055	2,840 ± 0,122	1,360 ± 0,054	3,310 ± 0,110	0,004 ± 0,001
F2	0,985 ± 0,054	2,770 ± 0,119	2,070 ± 0,082	2,440 ±0,081	0,004 ± 0,002
F3	37,661 ± 2,049	0,100 ± 0,004	0,990 ± 0,039	4,700 ± 0,157	0,005 ± 0,002
F4	63,083 ± 3,432	0,190 ± 0,008	2,090 ± 0,083	1,110 ± 0,037	0,680 ± 0,037
F5	0,975 ± 0,053	0,010 ± 0,004	0,430 ± 0,017	0,080 ± 0,003	0,010 ± 0,001
<b>Sol K</b>					
F1	1,039 ± 0,057	2,840 ± 0,122	1,359 ± 0,054	3,312 ± 0,110	0,004 ±0,001
F2	1,462 ± 0,080	1,510 ± 0,065	2,989 ± 0,118	3,958 ± 0,132	0,002 ± 0,001
F3	163,404 ± 8,889	0,500 ± 0,022	8,191 ± 0,324	30,262 ±1,008	0,006 ± 0,003
F4	214,102 ±11,647	0,950 ± 0,041	14,369 ± 0,568	5,760 ± 0,192	2,980 ± 0,161
F5	4,616 ± 0,251	0,240 ± 0,010	2,950 ± 0,117	1,889 ± 0,063	0,010 ± 0,001
<b>Sol R</b>					
F1	1,053 ± 0,057	2,840 ± 0,122	1,359 ± 0,054	3,312 ± 0,110	0,004 ± 0,001
F2	0,810 ± 0,044	2,390 ± 0,103	0,629 ± 0,025	2,999 ± 0,100	0,004 ± 0,001
F3	232,121 ± 12,627	1,300 ± 0,056	3,630 ± 0,143	47,795 ± 1,592	0,020 ± 0,001
F4	14,088 ± 0,766	0,150 ± 0,006	0,611 ± 0,024	1,078 ± 0,036	0,190 ± 0,010
F5	561,559 ± 30,549	5,919 ± 0,255	24,171 ± 0,955	42,816 ±1,426	0,010 ± 0,001

<b>Tableau III-44, 2009</b>					
<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>	
<b>Concentration en g/kg par rapport à la MS</b>					
<b>Sol F</b>					
F1	1,023 ± 0,056	2,840 ± 0,122	1,361 ± 0,054	3,310 ± 0,110	0,004 ± 0,001
F2	0,963 ± 0,052	2,550 ± 0,110	4,050 ± 0,160	1,510 ± 0,050	0,004 ± 0,002
F3	36,406 ± 1,980	0,090 ± 0,004	1,941 ± 0,077	2,910 ± 0,097	0,006 ± 0,002
F4	61,005 ± 3,319	0,180 ± 0,008	4,090 ± 0,162	0,690 ± 0,023	0,720 ± 0,039
F5	0,933 ± 0,051	0,010 ± 0,002	0,850 ± 0,034	0,050 ± 0,002	0,010 ± 0,001
<b>Sol K</b>					
F1	1,018 ± 0,055	2,840 ± 0,122	1,359 ± 0,054	3,310 ± 0,110	0,004 ± 0,001
F2	0,381 ± 0,021	1,033 ± 0,045	1,251 ± 0,049	0,719 ± 0,024	0,001 ± 0,00004
F3	42,606 ± 2,318	0,344 ± 0,015	3,417 ± 0,135	5,497 ± 0,183	0,001 ± 0,00003
F4	55,828 ± 3,037	0,640 ± 0,028	5,996 ± 0,237	1,048 ± 0,035	0,741 ± 0,040
F5	1,204 ± 0,065	0,160 ± 0,007	1,234 ± 0,049	0,344 ± 0,011	0,0001 ± 0,00005
<b>Sol R</b>					
F1	1,028 ± 0,055	2,840 ± 0,122	1,360 ± 0,054	3,312 ± 0,110	0,004 ± 0,001
F2	0,541 ± 0,029	1,000 ± 0,043	0,309 ± 0,012	1,358 ± 0,045	0,003 ± 0,001
F3	155,059 ± 8,435	0,540 ± 0,023	1,790 ± 0,071	21,640 ± 0,721	0,015 ± 0,001
F4	9,414 ± 0,512	0,060 ± 0,003	0,300 ± 0,012	0,490 ± 0,016	0,130 ± 0,007
F5	375,042 ± 20,402	2,480 ± 0,107	11,940 ± 0,472	19,391 ± 0,646	2 E-04 ± 1 E-06

<b>Tableau III-45, 2010</b>					
<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Fe</b>	
<b>Concentration en g/kg par rapport à la MS</b>					
<b>Sol F</b>					
F1	0,983 ± 0,053	2,381 ± 0,103	6,091 ± 0,241	1,119 ± 0,037	0,006 ± 0,002
F2	37,565 ± 2,044	0,092 ± 0,004	2,911 ± 0,115	2,159 ± 0,072	0,006 ± 0,003
F3	62,943 ± 3,424	0,172 ± 0,007	6,139 ± 0,242	0,509 ± 0,017	0,739 ± 0,040
F4	0,964 ± 0,052	0,011 ± 0,003	1,270 ± 0,050	0,040 ± 0,001	0,010 ± 0,001
F5	90,365 ± 4,916	51,220 ± 2,208	11,879 ± 0,469	20,869 ± 0,695	13,461 ± 0,726
<b>Sol K</b>					
F1	1,154 ± 0,063	0,360 ± 0,016	5,161 ± 0,204	0,770 ± 0,026	0,001 ± 0,0001
F2	127,586 ± 6,941	0,120 ± 0,005	14,106 ± 0,557	5,871 ± 0,196	0,003 ± 0,0002
F3	167,143 ± 9,093	0,230 ± 0,010	24,751 ± 0,978	1,119 ± 0,037	1,759 ± 0,095
F4	3,621 ± 0,197	0,061 ± 0,003	5,090 ± 0,201	0,370 ± 0,012	0,001 ± 0,0002
F5	98,495 ± 5,358	11,100 ± 0,478	40,342 ± 1,594	12,520 ± 0,417	7,730 ± 0,417
<b>Sol R</b>					
F1	0,302 ± 0,016	0,350 ± 0,015	0,140 ± 0,006	0,449 ± 0,015	0,002 ± 0,001
F2	84,616 ± 4,603	0,190 ± 0,008	0,790 ± 0,031	7,190 ± 0,239	0,009 ± 0,001
F3	5,137 ± 0,279	0,020 ± 0,001	0,130 ± 0,005	0,160 ± 0,005	0,070 ± 0,004
F4	204,710 ± 11,136	0,850 ± 0,037	5,280 ± 0,209	6,439 ± 0,214	0,00001 ± 0,000003
F5	7,434 ± 0,404	1,710 ± 0,074	0,190 ± 0,008	1,309 ± 0,044	0,064 ± 0,013



**Annexe 03: Moyenne  $\pm$  écart-type des concentrations des éléments mineurs (ETM) (mg/kg/MS) obtenues par l'extraction séquentielle dans les sols étudiés.**

**I- Profondeur 0-20cm**

<b>Tableau III-46, 2006</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Concentration en mg/kg par rapport à la MS</b>									
<b>Sol F</b>									
<b>F1</b>	0,036 $\pm$ 0,016	1,01 $\pm$ 0,305	0,182 $\pm$ 0,012	3,570 $\pm$ 0,854	0,079 $\pm$ 0,015	0,494 $\pm$ 0,035	0,600 $\pm$ 0,097	0,508 $\pm$ 0,028	0,042 $\pm$ 0,003
<b>F2</b>	0,500 $\pm$ 0,154	0,031 $\pm$ 0,008	1,282 $\pm$ 0,091	30,274 $\pm$ 7,282	1,169 $\pm$ 0,230	34,259 $\pm$ 2,389	0,020 $\pm$ 0,004	0,051 $\pm$ 0,003	0,291 $\pm$ 0,017
<b>F3</b>	4,104 $\pm$ 1,235	0,031 $\pm$ 0,010	2,613 $\pm$ 0,186	45,373 $\pm$ 10,919	3,289 $\pm$ 0,645	67,953 $\pm$ 4,743	0,010 $\pm$ 0,001	2,033 $\pm$ 0,111	0,873 $\pm$ 0,048
<b>F4</b>	0,892 $\pm$ 0,268	0,770 $\pm$ 0,232	0,490 $\pm$ 0,035	0,967 $\pm$ 0,233	0,039 $\pm$ 0,008	0,777 $\pm$ 0,054	0,810 $\pm$ 0,131	0,849 $\pm$ 0,046	0,499 $\pm$ 0,026
<b>F5</b>	351,303 $\pm$ 10,773	10,370 $\pm$ 3,131	50,441 $\pm$ 3,593	663,639 $\pm$ 55,657	25,790 $\pm$ 5,056	602,887 $\pm$ 42,061	0,870 $\pm$ 0,140	43,198 $\pm$ 2,356	414,163 $\pm$ 22,544
<b>Sol K</b>									
<b>F1</b>	0,067 $\pm$ 0,017	0,997 $\pm$ 0,299	0,053 $\pm$ 0,004	1,752 $\pm$ 0,427	0,134 $\pm$ 0,025	1,526 $\pm$ 0,105	0,630 $\pm$ 0,102	0,667 $\pm$ 0,037	0,017 $\pm$ 0,004
<b>F2</b>	2,020 $\pm$ 0,798	1,576 $\pm$ 0,472	1,876 $\pm$ 0,948	216,882 $\pm$ 52,141	7,305 $\pm$ 1,433	199,510 $\pm$ 13,916	0,280 $\pm$ 0,046	0,539 $\pm$ 0,030	0,519 $\pm$ 0,031
<b>F3</b>	69,429 $\pm$ 4,190	2,894 $\pm$ 0,202	11,855 $\pm$ 3,006	768,020 $\pm$ 84,653	47,084 $\pm$ 9,231	524,487 $\pm$ 36,592	0,080 $\pm$ 0,013	7,733 $\pm$ 0,422	0,519 $\pm$ 0,025
<b>F4</b>	9,300 $\pm$ 1,206	150,564 $\pm$ 14,218	13,309 $\pm$ 3,365	330,753 $\pm$ 29,521	47,553 $\pm$ 9,324	12,565 $\pm$ 0,873	0,840 $\pm$ 0,135	5,844 $\pm$ 0,318	11,757 $\pm$ 0,638
<b>F5</b>	141,189 $\pm$ 9,252	4,743 $\pm$ 0,762	78,287 $\pm$ 3,835	434,639 $\pm$ 64,500	31,724 $\pm$ 6,222	159,482 $\pm$ 11,128	0,610 $\pm$ 0,098	65,598 $\pm$ 3,578	1716,136 $\pm$ 93,412
<b>Sol R</b>									
<b>F1</b>	0,049 $\pm$ 0,015	2,00 $\pm$ 0,604	0,930 $\pm$ 0,066	1,770 $\pm$ 0,427	0,399 $\pm$ 0,078	0,790 $\pm$ 0,056	0,500 $\pm$ 0,081	0,420 $\pm$ 0,023	0,939 $\pm$ 0,050
<b>F2</b>	0,409 $\pm$ 0,124	3,200 $\pm$ 0,965	5,211 $\pm$ 0,371	381,223 $\pm$ 91,667	19,431 $\pm$ 3,811	487,942 $\pm$ 34,042	0,030 $\pm$ 0,004	0,620 $\pm$ 0,034	6,606 $\pm$ 0,359
<b>F3</b>	5,790 $\pm$ 1,743	3,000 $\pm$ 0,906	2,510 $\pm$ 0,179	57,580 $\pm$ 13,848	4,941 $\pm$ 0,969	47,333 $\pm$ 3,304	0,560 $\pm$ 0,091	2,969 $\pm$ 0,162	0,661 $\pm$ 0,037
<b>F4</b>	0,440 $\pm$ 0,132	0,080 $\pm$ 0,024	0,719 $\pm$ 0,051	367,734 $\pm$ 28,424	0,641 $\pm$ 0,125	3,216 $\pm$ 0,225	0,800 $\pm$ 0,129	0,560 $\pm$ 0,030	0,800 $\pm$ 0,043
<b>F5</b>	22,291 $\pm$ 6,712	0,460 $\pm$ 0,139	8,611 $\pm$ 1,457	34,733 $\pm$ 8,347	3,740 $\pm$ 0,733	24,823 $\pm$ 1,734	0,840 $\pm$ 0,136	9,610 $\pm$ 0,524	338,656 $\pm$ 18,434

<b>Tableau III-47, 2007</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Concentration en mg/kg par rapport à la MS</b>									
<b>Sol F</b>									
<b>F1</b>	0,049 ± 0,014	0,971 ± 0,294	0,190 ± 0,013	15,073 ± 3,604	0,129 ± 0,025	0,477 ± 0,034	0,600 ± 0,096	1,010 ± 0,055	0,041 ± 0,003
<b>F2</b>	0,440 ± 0,134	0,020 ± 0,010	1,369 ± 0,098	127,809 ± 30,744	1,999 ± 0,391	33,038 ± 2,304	0,020 ± 0,004	0,101 ± 0,005	0,285 ± 0,016
<b>F3</b>	3,571 ± 1,076	0,031 ± 0,007	2,809 ± 0,200	191,870 ± 46,099	5,590 ± 1,096	65,530 ± 4,574	0,010 ± 0,001	4,004 ± 0,218	0,855 ± 0,047
<b>F4</b>	0,781 ± 0,233	0,740 ± 0,224	0,522 ± 0,037	4,082 ± 0,986	0,072 ± 0,013	0,749 ± 0,052	0,800 ± 0,130	1,671 ± 0,091	0,489 ± 0,026
<b>F5</b>	22,472 ± 6,769	9,990 ± 3,018	54,380 ± 3,874	2801,749 ± 150,656	43,870 ± 8,602	581,396 ± 40,562	0,860 ± 0,139	85,062 ± 4,639	405,470 ± 22,071
<b>Sol K</b>									
<b>F1</b>	0,067 ± 0,017	1,002 ± 0,300	0,044 ± 0,003	4,423 ± 1,078	0,155 ± 0,028	1,039 ± 0,072	0,620 ± 0,100	0,794 ± 0,043	0,011 ± 0,003
<b>F2</b>	2,020 ± 0,606	1,583 ± 0,478	1,571 ± 0,112	547,595 ± 80,650	8,448 ± 1,657	137,633 ± 9,601	0,280 ± 0,045	0,643 ± 0,035	0,336 ± 0,020
<b>F3</b>	69,429 ± 20,900	2,908 ± 0,880	9,871 ± 0,703	1938,140 ± 201,225	54,446 ± 10,674	361,868 ± 25,246	0,080 ± 0,013	9,097 ± 0,496	0,336 ± 0,016
<b>F4</b>	9,300 ± 2,798	151,282 ± 15,688	11,082 ± 0,790	835,104 ± 70,779	54,987 ± 10,782	0,611 ± 0,042	0,820 ± 0,133	6,875 ± 0,374	7,619 ± 0,413
<b>F5</b>	141,189 ± 42,506	4,765 ± 1,441	65,182 ± 4,644	1097,401 ± 163,848	36,684 ± 7,195	110,070 ± 7,677	0,600 ± 0,097	77,161 ± 4,209	1112,218 ± 60,540
<b>Sol R</b>									
<b>F1</b>	0,040 ± 0,011	1,090 ± 0,329	0,570 ± 0,041	1,009 ± 0,243	0,150 ± 0,029	0,587 ± 0,042	0,600 ± 0,097	0,440 ± 0,024	0,781 ± 0,042
<b>F2</b>	0,3 ± 0,089	1,740 ± 0,525	3,221 ± 0,229	217,287 ± 52,247	7,290 ± 1,429	362,627 ± 25,298	0,030 ± 0,005	0,650 ± 0,035	5,497 ± 0,299
<b>F3</b>	4,170 ± 1,254	1,630 ± 0,493	1,550 ± 0,110	32,819 ± 7,893	1,850 ± 0,364	35,177 ± 2,455	0,680 ± 0,110	3,099 ± 0,169	0,550 ± 0,030
<b>F4</b>	0,311 ± 0,095	0,040 ± 0,013	0,440 ± 0,031	209,598 ± 50,398	0,240 ± 0,047	2,390 ± 0,167	0,960 ± 0,155	0,580 ± 0,032	0,665 ± 0,036
<b>F5</b>	16,039 ± 4,829	0,250 ± 0,076	5,310 ± 0,379	19,797 ± 4,757	1,400 ± 0,275	18,490 ± 1,289	1,010 ± 0,163	10,061 ± 0,548	281,797 ± 15,340

<b>Tableau III-48, 2008</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Concentration en mg/kg par rapport à la MS</b>									
<b>Sol F</b>									
<b>F1</b>	0,050 ± 0,016	0,969 ± 0,292	0,141 ± 0,010	12,599 ± 3,095	0,213 ± 0,041	0,523 ± 0,037	0,750 ± 0,121	1,483 ± 0,081	0,054 ± 0,004
<b>F2</b>	0,511 ± 0,154	0,020 ± 0,007	0,989 ± 0,070	109,952 ± 26,406	3,287 ± 0,645	36,209 ± 2,525	0,030 ± 0,005	0,150 ± 0,008	0,377 ± 0,022
<b>F3</b>	4,120 ± 1,241	0,030 ± 0,010	2,021 ± 0,144	164,928 ± 39,595	9,222 ± 1,808	71,821 ± 5,013	0,010 ± 0,001	5,934 ± 0,324	1,132 ± 0,062
<b>F4</b>	0,901 ± 0,269	0,741 ± 0,222	0,379 ± 0,027	3,436 ± 0,847	0,111 ± 0,022	0,821 ± 0,057	1,010 ± 0,163	2,477 ± 0,135	0,647 ± 0,034
<b>F5</b>	25,941 ± 7,810	9,920 ± 2,994	39,100 ± 2,785	5435,746 ± 70,055	72,318 ± 14,180	637,206 ± 44,455	1,080 ± 0,175	126,047 ± 6,875	536,706 ± 29,215
<b>Sol K</b>									
<b>F1</b>	0,051 ± 0,019	0,777 ± 0,237	0,037 ± 0,002	7,459 ± 1,817	0,189 ± 0,035	0,813 ± 0,057	0,620 ± 0,100	0,933 ± 0,051	0,007 ± 0,002
<b>F2</b>	2,329 ± 0,699	1,248 ± 0,377	1,321 ± 0,094	923,458 ± 122,012	10,334 ± 2,027	107,673 ± 7,511	0,280 ± 0,045	0,755 ± 0,041	0,202 ± 0,012
<b>F3</b>	80,039 ± 24,094	2,306 ± 0,694	8,301 ± 0,591	3270,144 ± 286,235	66,582 ± 13,057	283,095 ± 19,750	0,080 ± 0,013	10,688 ± 0,583	0,182 ± 0,010
<b>F4</b>	10,721 ± 3,226	119,291 ± 36,024	9,320 ± 0,664	1408,130 ± 338,590	67,263 ± 13,189	0,478 ± 0,033	0,820 ± 0,133	8,066 ± 0,440	4,593 ± 0,249
<b>F5</b>	162,765 ± 49,002	3,758 ± 1,136	54,811 ± 3,905	1850,645 ± 444,949	44,892 ± 8,802	86,109 ± 6,006	0,600 ± 0,097	90,658 ± 4,945	669,936 ± 36,466
<b>Sol R</b>									
<b>F1</b>	0,041 ± 0,011	0,840 ± 0,255	0,480 ± 0,034	0,069 ± 0,017	0,120 ± 0,023	0,286 ± 0,020	0,830 ± 0,135	0,470 ± 0,026	0,690 ± 0,037
<b>F2</b>	0,290 ± 0,087	1,350 ± 0,407	2,690 ± 0,192	14,959 ± 3,597	5,640 ± 1,106	176,462 ± 12,312	0,040 ± 0,007	0,700 ± 0,038	4,855 ± 0,264
<b>F3</b>	4,050 ± 1,218	1,270 ± 0,382	1,300 ± 0,092	2,259 ± 0,543	1,440 ± 0,281	17,140 ± 1,195	0,940 ± 0,152	3,340 ± 0,182	0,486 ± 0,027
<b>F4</b>	0,301 ± 0,092	0,030 ± 0,010	0,370 ± 0,026	14,429 ± 3,470	0,190 ± 0,036	1,163 ± 0,081	1,330 ± 0,215	0,630 ± 0,034	0,588 ± 0,032
<b>F5</b>	15,570 ± 4,689	0,190 ± 0,059	4,450 ± 0,317	1,360 ± 0,327	1,080 ± 0,213	8,999 ± 0,627	1,400 ± 0,226	10,839 ± 0,591	248,922 ± 13,550

<b>Tableau III-49, 2009</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Concentration en mg/kg par rapport à la MS</b>									
<b>Sol F</b>									
<b>F1</b>	0,060 ± 0,019	0,880 ± 0,265	0,120 ± 0,009	33,401 ± 7,959	0,248 ± 0,050	0,530 ± 0,037	0,890 ± 0,144	1,856 ± 0,101	0,056 ± 0,004
<b>F2</b>	0,601 ± 0,182	0,020 ± 0,007	0,901 ± 0,064	282,671 ± 27,896	3,993 ± 0,782	36,709 ± 2,560	0,040 ± 0,006	0,186 ± 0,010	0,391 ± 0,023
<b>F3</b>	4,871 ± 1,465	0,030 ± 0,009	1,841 ± 0,131	423,697 ± 81,807	11,174 ± 2,190	72,813 ± 5,082	0,010 ± 0,001	7,358 ± 0,401	1,174 ± 0,065
<b>F4</b>	1,060 ± 0,318	0,670 ± 0,202	0,340 ± 0,024	9,053 ± 2,177	0,144 ± 0,027	0,833 ± 0,057	1,200 ± 0,194	3,088 ± 0,168	0,671 ± 0,036
<b>F5</b>	30,609 ± 9,217	9,000 ± 2,718	35,468 ± 2,527	5437,550 ± 70,457	87,631 ± 17,182	646,006 ± 45,070	1,290 ± 0,208	156,289 ± 8,525	556,642 ± 30,301
<b>Sol K</b>									
<b>F1</b>	0,084 ± 0,021	0,570 ± 0,171	0,022 ± 0,001	1,257 ± 0,035	0,230 ± 0,042	0,748 ± 0,052	0,590 ± 0,095	1,089 ± 0,060	0,009 ± 0,002
<b>F2</b>	2,541 ± 0,763	0,901 ± 0,272	0,791 ± 0,056	154,656 ± 17,841	12,569 ± 2,465	99,142 ± 6,916	0,270 ± 0,043	0,892 ± 0,048	0,272 ± 0,016
<b>F3</b>	87,359 ± 16,297	1,655 ± 0,501	4,939 ± 0,352	551,656 ± 23,297	81,011 ± 15,882	260,666 ± 18,185	0,080 ± 0,012	12,625 ± 0,689	0,277 ± 0,013
<b>F4</b>	11,702 ± 3,521	86,121 ± 16,007	5,550 ± 0,395	237,382 ± 23,568	81,817 ± 16,043	0,440 ± 0,030	0,790 ± 0,127	9,528 ± 0,520	6,274 ± 0,340
<b>F5</b>	177,650 ± 23,484	2,722 ± 0,820	32,639 ± 2,325	311,941 ± 23,225	54,606 ± 10,706	79,287 ± 5,530	0,570 ± 0,092	107,105 ± 5,842	915,832 ± 49,851
<b>Sol R</b>									
<b>F1</b>	0,020 ± 0,007	0,590 ± 0,178	0,229 ± 0,016	0,862 ± 0,208	0,060 ± 0,012	0,265 ± 0,019	0,990 ± 0,160	0,501 ± 0,027	0,614 ± 0,033
<b>F2</b>	0,180 ± 0,054	0,940 ± 0,285	1,274 ± 0,091	185,538 ± 44,614	2,903 ± 0,570	163,561 ± 11,411	0,050 ± 0,008	0,740 ± 0,040	4,319 ± 0,235
<b>F3</b>	2,512 ± 0,756	0,890 ± 0,268	0,617 ± 0,044	28,023 ± 6,740	0,738 ± 0,145	15,866 ± 1,107	1,120 ± 0,181	3,551 ± 0,194	0,432 ± 0,024
<b>F4</b>	0,190 ± 0,057	0,020 ± 0,007	0,179 ± 0,013	178,973 ± 43,035	0,100 ± 0,019	1,078 ± 0,075	1,580 ± 0,255	0,671 ± 0,036	0,523 ± 0,028
<b>F5</b>	9,678 ± 2,912	0,140 ± 0,041	2,111 ± 0,151	16,904 ± 4,062	0,559 ± 0,110	8,340 ± 0,581	1,670 ± 0,269	11,514 ± 0,628	221,423 ± 12,053

<b>Tableau III-50, 2010</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Concentration en mg/kg par rapport à la MS</b>									
<b>Sol F</b>									
<b>F1</b>	0,092 ± 0,027	0,970 ± 0,294	0,099 ± 0,007	108,008 ± 5,992	0,311 ± 0,060	0,542 ± 0,038	1,110 ± 0,179	2,086 ± 0,114	0,063 ± 0,005
<b>F2</b>	0,879 ± 0,266	0,020 ± 0,007	0,740 ± 0,053	922,083 ± 21,734	4,814 ± 0,943	37,569 ± 2,620	0,040 ± 0,007	0,211 ± 0,011	0,444 ± 0,026
<b>F3</b>	7,088 ± 2,136	0,030 ± 0,010	1,519 ± 0,108	1382,678 ± 33,480	13,473 ± 2,641	74,518 ± 5,201	0,010 ± 0,002	8,345 ± 0,455	1,333 ± 0,073
<b>F4</b>	1,540 ± 0,463	0,740 ± 0,223	0,279 ± 0,020	29,457 ± 7,109	0,162 ± 0,032	0,852 ± 0,059	1,490 ± 0,241	3,483 ± 0,190	0,762 ± 0,040
<b>F5</b>	44,631 ± 3,438	9,971 ± 3,012	29,409 ± 2,095	2020,659 ± 45,861	105,653 ± 9,716	661,138 ± 46,125	1,600 ± 0,259	177,275 ± 9,669	632,184 ± 34,413
<b>Sol K</b>									
<b>F1</b>	0,091 ± 0,023	0,388 ± 0,116	0,011 ± 0,001	2,538 ± 0,234	0,263 ± 0,048	0,632 ± 0,044	1,700 ± 0,275	1,387 ± 0,076	00
<b>F2</b>	2,746 ± 0,824	0,613 ± 0,185	0,490 ± 0,035	314,192 ± 15,929	14,341 ± 2,813	83,680 ± 5,838	0,770 ± 0,124	1,136 ± 0,061	0,269 ± 0,016
<b>F3</b>	94,375 ± 8,408	1,131 ± 0,340	3,081 ± 0,219	1112,615 ± 62,399	92,430 ± 8,121	220,013 ± 15,350	0,220 ± 0,036	16,071 ± 0,877	0,269 ± 0,013
<b>F4</b>	12,642 ± 3,803	58,519 ± 7,671	3,461 ± 0,246	479,156 ± 23,140	93,349 ± 9,304	0,372 ± 0,025	2,260 ± 0,365	12,129 ± 0,662	6,088 ± 0,330
<b>F5</b>	191,888 ± 57,776	1,850 ± 0,557	20,320 ± 1,447	629,653 ± 31,604	62,303 ± 9,215	66,922 ± 4,668	1,640 ± 0,265	136,338 ± 7,437	888,685 ± 48,373
<b>Sol R</b>									
<b>F1</b>	0,020 ± 0,006	0,060 ± 0,018	0,120 ± 0,008	8,371 ± 2,018	0,010 ± 0,003	0,098 ± 0,007	1,150 ± 0,185	0,520 ± 0,029	0,551 ± 0,030
<b>F2</b>	0,160 ± 0,049	0,090 ± 0,028	0,660 ± 0,047	1802,492 ± 43,419	0,660 ± 0,129	60,337 ± 4,210	0,060 ± 0,009	0,771 ± 0,042	3,928 ± 0,214
<b>F3</b>	2,300 ± 0,692	0,087 ± 0,026	0,320 ± 0,023	272,247 ± 25,476	0,170 ± 0,033	5,861 ± 0,409	1,290 ± 0,209	3,700 ± 0,202	0,399 ± 0,022
<b>F4</b>	0,170 ± 0,052	00	0,090 ± 0,006	1738,73 ± 48,086	0,020 ± 0,004	0,398 ± 0,028	1,820 ± 0,295	0,700 ± 0,038	0,474 ± 0,026
<b>F5</b>	8,850 ± 1,665	0,010 ± 0,004	1,090 ± 0,078	164,225 ± 19,465	0,130 ± 0,025	3,070 ± 0,214	1,920 ± 0,310	11,682 ± 0,654	201,632 ± 10,975

## II- Profondeur 20-40cm

<b>Tableau III-51, 2006</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Concentration en mg/kg par rapport à la MS</b>									
<b>Sol F</b>									
<b>F1</b>	0,039 ± 0,013	0,510 ± 0,154	0,380 ± 0,027	4,735 ± 1,149	0,101 ± 0,019	0,254 ± 0,019	0,624 ± 0,101	0,340 ± 0,019	0,168 ± 0,007
<b>F2</b>	0,490 ± 0,147	0,010 ± 0,003	1,480 ± 0,105	32,472 ± 7,866	1,540 ± 0,303	29,897 ± 2,086	0,029 ± 0,005	0,010 ± 0,002	0,757 ± 0,040
<b>F3</b>	3,061 ± 0,922	0,030 ± 0,008	2,810 ± 0,200	47,354 ± 11,321	3,339 ± 0,654	57,763 ± 4,029	0,025 ± 0,004	0,200 ± 0,011	1,850 ± 0,099
<b>F4</b>	0,791 ± 0,238	0,270 ± 0,081	0,690 ± 0,049	1,311 ± 0,315	0,160 ± 0,031	0,508 ± 0,037	0,863 ± 0,139	0,120 ± 0,007	1,034 ± 0,056
<b>F5</b>	23,469 ± 7,065	5,243 ± 1,583	6,640 ± 0,473	6678,910 ± 65,996	27,560 ± 5,405	546,338 ± 38,115	0,912 ± 0,147	2,970 ± 0,162	837,419 ± 45,581
<b>Sol K</b>									
<b>F1</b>	0,044 ± 0,012	1,500 ± 0,148	0,247 ± 0,018	3,005 ± 0,723	0,151 ± 0,028	1,298 ± 0,089	0,621 ± 0,101	0,503 ± 0,027	0,215 ± 0,008
<b>F2</b>	1,988 ± 0,600	1,553 ± 0,471	2,084 ± 0,148	219,309 ± 22,726	7,678 ± 1,505	195,103 ± 13,613	0,029 ± 0,005	0,503 ± 0,027	1,077 ± 0,054
<b>F3</b>	68,372 ± 7,587	2,896 ± 0,875	12,050 ± 0,858	769,551 ± 85,055	47,128 ± 9,241	514,275 ± 35,878	0,025 ± 0,004	5,904 ± 0,322	1,508 ± 0,077
<b>F4</b>	9,196 ± 1,768	150,526 ± 10,457	13,514 ± 0,963	331,119 ± 29,602	47,667 ± 4,348	0,606 ± 0,044	0,859 ± 0,139	5,711 ± 0,311	12,278 ± 0,668
<b>F5</b>	138,840 ± 11,802	4,627 ± 0,397	79,494 ± 5,663	477,503 ± 44,839	34,725 ± 6,811	153,919 ± 10,740	0,912 ± 0,147	61,366 ± 3,347	2139,257 ± 60,448
<b>Sol R</b>									
<b>F1</b>	0,041 ± 0,012	1,500 ± 0,453	1,131 ± 0,080	3,032 ± 0,723	0,419 ± 0,082	0,544 ± 0,040	0,624 ± 0,101	0,250 ± 0,014	1,005 ± 0,054
<b>F2</b>	0,390 ± 0,118	3,180 ± 0,961	5,411 ± 0,385	383,614 ± 92,251	19,799 ± 3,883	483,596 ± 33,739	0,029 ± 0,005	0,585 ± 0,031	7,033 ± 0,383
<b>F3</b>	4,750 ± 1,430	3,000 ± 0,905	2,709 ± 0,193	59,299 ± 4,250	4,992 ± 0,979	37,124 ± 2,590	0,025 ± 0,004	1,130 ± 0,062	1,623 ± 0,088
<b>F4</b>	0,339 ± 0,101	0,030 ± 0,009	0,919 ± 0,065	368,098 ± 88,506	0,759 ± 0,148	2,990 ± 0,208	0,863 ± 0,139	0,430 ± 0,023	1,314 ± 0,073
<b>F5</b>	19,951 ± 6,007	0,340 ± 0,102	9,810 ± 0,699	77,668 ± 18,686	6,742 ± 1,321	19,296 ± 1,346	0,912 ± 0,147	5,380 ± 0,294	761,885 ± 41,471

<b>Tableau III-52, 2007</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Concentration en mg/kg par rapport à la MS</b>									
<b>Sol F</b>									
<b>F1</b>	0,040 ±0,012	0,470 ±0,143	0,392 ±0,028	16,066 ±3,899	0,150 ±0,029	0,264 ±0,018	0,642 ±0,101	0,837 ±0,046	0,127 ±0,007
<b>F2</b>	0,419 ±0,127	0,010 ±0,003	1,569 ±0,112	130,417 ±31,328	2,370 ±0,464	28,669 ±2,001	0,021 ±0,005	0,060 ±0,003	0,718 ±0,040
<b>F3</b>	2,531 ±0,763	0,030 ±0,009	3,008 ±0,215	193,420 ±46,501	5,641 ±1,106	55,291 ±3,860	0,030 ±0,004	2,170 ±0,118	1,816 ±0,098
<b>F4</b>	0,681 ±0,203	0,690 ±0,209	0,723 ±0,052	4,410 ±1,067	0,191 ±0,037	0,528 ±0,035	0,860 ±0,139	1,538 ±0,084	1,014 ±0,056
<b>F5</b>	20,141 ±6,064	8,870 ±2,679	55,578 ±3,959	2805,848 ±74,671	28,332 ±5,555	575,828 ±40,174	0,910 ±0,147	80,826 ±4,409	418,673 ±22,791
<b>Sol K</b>									
<b>F1</b>	0,044 ±0,012	0,496 ±0,149	0,242 ±0,017	5,813 ±1,373	0,174 ±0,032	0,827 ±0,056	0,620 ±0,101	0,617 ±0,034	0,114 ±0,006
<b>F2</b>	1,988 ±0,600	1,567 ±0,473	1,768 ±0,126	550,042 ± 32,234	8,816 ±1,729	133,289 ±9,298	0,030 ±0,005	0,599 ±0,032	0,795 ±0,043
<b>F3</b>	68,372 ±20,587	2,909 ±0,879	10,069 ±0,717	1940,800 ±466,627	54,496 ±10,684	351,619 ±24,532	0,030 ±0,004	7,264 ±0,396	1,249 ±0,068
<b>F4</b>	9,196 ±2,768	151,228 ±15,673	11,280 ±0,804	835,349 ±200,861	55,113 ±10,805	0,354 ±0,025	0,860 ±0,139	6,743 ±0,367	8,117 ±0,443
<b>F5</b>	138,840 ±41,802	3,645 ±1,102	66,381 ±4,729	1140,332 ±74,187	39,697 ±7,783	104,470 ±7,289	0,910 ±0,147	72,926 ±3,978	1125,385 ±61,259
<b>Sol R</b>									
<b>F1</b>	0,040 ±0,012	0,590 ±0,178	0,770 ±0,055	2,223 ±0,539	0,170 ±0,033	0,359 ±0,025	0,620 ±0,101	0,270 ±0,015	0,853 ±0,045
<b>F2</b>	0,279 ±0,083	1,730 ±0,521	3,420 ±0,243	219,716 ±52,831	7,659 ±1,502	358,285 ±24,995	0,030 ±0,005	0,600 ±0,033	5,907 ±0,322
<b>F3</b>	3,130 ±0,941	1,630 ±0,493	1,750 ±0,125	34,503 ±8,294	1,900 ±0,373	24,957 ±1,741	0,030 ±0,004	1,270 ±0,069	1,492 ±0,082
<b>F4</b>	0,210 ±0,064	0,020 ±0,005	0,640 ±0,046	209,926 ±30,480	0,359 ±0,070	2,153 ±0,150	0,860 ±0,139	0,450 ±0,025	1,218 ±0,066
<b>F5</b>	13,701 ±4,125	0,130 ±0,039	6,510 ±0,464	62,814 ±15,097	4,401 ±0,863	12,917 ±0,901	0,910 ±0,147	5,820 ±0,318	295,020 ±16,059

<b>Tableau III-53, 2008</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Concentration en mg/kg par rapport à la MS</b>									
<b>Sol F</b>									
<b>F1</b>	0,039 ±0,012	0,470 ±0,141	0,3369 ±0,024	14,337 ±3,391	0,231 ±0,045	0,290 ±0,021	0,620 ±0,101	1,323 ±0,072	0,166 ±0,008
<b>F2</b>	0,490 ±0,148	0,010 ±0,003	1,192 ±0,085	112,402 ±26,991	3,656 ±0,718	31,871 ±2,222	0,030 ±0,005	0,104 ±0,006	0,831 ±0,045
<b>F3</b>	3,081 ±0,928	0,030 ±0,009	2,218 ±0,158	166,309 ±39,997	9,272 ±1,817	61,636 ±4,299	0,030 ±0,004	4,098 ±0,223	2,106 ±0,114
<b>F4</b>	0,801 ±0,239	0,710 ±0,215	0,580 ±0,041	4,014 ±0,928	0,231 ±0,045	0,581 ±0,040	0,860 ±0,139	2,347 ±0,128	1,164 ±0,064
<b>F5</b>	23,601 ±7,105	9,790 ±2,957	40,301 ±2,871	5438,292 ±70,644	75,341 ±14,773	631,675 ±44,067	0,910 ±0,147	121,805 ±6,644	549,903 ±29,934
<b>Sol K</b>									
<b>F1</b>	0,050 ±0,012	0,279 ±0,086	0,243 ±0,017	9,021 ±2,113	0,193 ±0,039	0,595 ±0,040	0,620 ±0,101	0,764 ±0,041	0,069 ±0,005
<b>F2</b>	2,296 ±0,693	1,229 ±0,372	1,524 ±0,108	925,453 ± 22,596	10,703 ±2,099	103,308 ±7,208	0,030 ±0,005	0,712 ±0,039	0,621 ±0,035
<b>F3</b>	78,989 ±23,781	2,293 ±0,693	8,497 ±0,605	3271,790 ±66,636	66,664 ±13,067	272,865 ±19,036	0,030 ±0,004	8,847 ±0,483	1,104 ±0,061
<b>F4</b>	10,599 ±3,196	119,263 ±16,017	9,520 ±0,678	1418,628 ±41,077	67,375 ±13,213	0,229 ±0,016	0,860 ±0,139	7,936 ±0,433	5,107 ±0,279
<b>F5</b>	160,425 ±48,298	3,636 ±1,099	56,024 ±3,991	1893,759 ±55,288	47,567 ±9,327	80,524 ±5,618	0,910 ±0,147	86,440 ±4,715	683,170 ±37,185
<b>Sol R</b>									
<b>F1</b>	0,040 ±0,012	0,341 ±0,104	0,679 ±0,048	1,303 ±0,313	0,140 ±0,027	0,055 ±0,004	0,620 ±0,101	0,300 ±0,017	0,758 ±0,041
<b>F2</b>	0,270 ±0,080	1,335 ±0,402	2,889 ±0,206	17,387 ±4,181	6,004 ±1,179	172,112 ±12,009	0,030 ±0,005	0,651 ±0,036	5,279 ±0,287
<b>F3</b>	3,008 ±0,905	1,264 ±0,381	1,499 ±0,107	3,927 ±0,945	1,489 ±0,291	6,897 ±0,481	0,030 ±0,004	1,511 ±0,082	1,435 ±0,078
<b>F4</b>	0,209 ±0,062	0,010 ±0,002	0,570 ±0,041	24,77 ±5,956	0,310 ±0,060	0,935 ±0,065	0,860 ±0,139	0,498 ±0,027	1,137 ±0,062
<b>F5</b>	13,222 ±3,984	0,070 ±0,021	5,645 ±0,402	44,361 ±10,667	2,448 ±0,481	3,430 ±0,239	0,910 ±0,147	6,607 ±0,360	262,121 ±14,269



<b>Tableau III-54, 2009</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Concentration en mg/kg par rapport à la MS</b>									
<b>Sol F</b>									
<b>F1</b>	0,040 ±0,012	0,380 ±0,114	0,321 ±0,023	34,080 ±8,255	0,272 ±0,054	0,295 ±0,021	0,620 ±0,101	1,681 ±0,091	0,172 ±0,008
<b>F2</b>	0,579 ±0,176	0,010 ±0,002	1,098 ±0,078	284,461 ±68,480	4,357 ±0,854	32,323 ±2,257	0,030 ±0,005	0,146 ±0,008	0,861 ±0,046
<b>F3</b>	3,829 ±1,152	0,030 ±0,008	2,042 ±0,145	425,952 ±102,208	11,219 ±2,200	62,585 ±4,368	0,030 ±0,004	5,519 ±0,301	2,125 ±0,116
<b>F4</b>	0,960 ±0,288	0,640 ±0,194	0,541 ±0,039	19,474 ±4,663	0,257 ±0,050	0,589 ±0,041	0,860 ±0,139	2,951 ±0,161	1,206 ±0,065
<b>F5</b>	28,271 ±8,512	8,880 ±2,681	36,668 ±2,612	6191,368 ±88,759	57,358 ±11,247	640,425 ±44,682	0,910 ±0,147	122,044 ±6,657	569,884 ±31,020
<b>Sol K</b>									
<b>F1</b>	0,028 ±0,012	0,073 ±0,020	0,221 ±0,016	1,391 ±3,331	0,240 ±0,046	0,540 ±0,036	0,623 ±0,101	0,920 ±0,050	0,940 ±0,006
<b>F2</b>	2,509 ±0,757	0,886 ±0,268	0,988 ±0,070	156,017 ±37,142	12,948 ±2,538	94,807 ±6,613	0,030 ±0,005	0,844 ±0,046	0,750 ±0,040
<b>F3</b>	86,310 ±25,984	1,662 ±0,500	5,141 ±0,366	551,749 ±31,370	81,042 ±15,892	250,423 ±17,471	0,030 ±0,004	10,791 ±0,589	1,219 ±0,065
<b>F4</b>	11,582 ±3,491	86,087 ±26,000	5,752 ±0,410	238,577 ±56,805	81,929 ±16,066	0,208 ±0,013	0,863 ±0,139	9,397 ±0,513	6,846 ±0,370
<b>F5</b>	175,294 ±52,779	2,593 ±0,783	33,839 ±2,411	316,40 ±15,356	63,611 ±12,471	69,703 ±4,863	0,914 ±0,147	72,869 ±3,975	929,044 ±50,570
<b>Sol R</b>									
<b>F1</b>	0,040 ±0,012	0,545 ±0,165	0,428 ±0,030	2,010 ±0,504	0,079 ±0,016	0,252 ±0,017	0,624 ±0,101	0,333 ±0,018	0,679 ±0,036
<b>F2</b>	0,158 ±0,048	0,929 ±0,281	1,482 ±0,106	187,964 ±45,198	3,277 ±0,643	159,217 ±11,107	0,029 ±0,005	0,697 ±0,038	4,753 ±0,258
<b>F3</b>	1,472 ±0,443	0,883 ±0,267	0,817 ±0,058	29,686 ±7,141	0,789 ±0,155	13,639 ±0,951	0,025 ±0,004	1,718 ±0,094	1,382 ±0,075
<b>F4</b>	0,090 ±0,027	0,022 ±0,007	0,376 ±0,027	189,324 ±45,522	0,214 ±0,042	0,845 ±0,059	0,863 ±0,139	0,537 ±0,029	1,067 ±0,058
<b>F5</b>	7,333 ±2,208	0,133 ±0,040	3,319 ±0,236	59,888 ±14,402	9,559 ±1,874	5,768 ±0,403	0,912 ±0,147	6,282 ±0,343	234,650 ±12,772

<b>Tableau III-55, 2010</b>									
	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>As</b>
<b>Concentration en mg/kg par rapport à la MS</b>									
<b>Sol F</b>									
<b>F1</b>	0,041 ±0,012	0,470 ±0,143	0,300 ±0,022	109,324 ±26,287	0,331 ±0,064	0,300 ±0,022	0,620 ±0,101	1,922 ±0,105	0,130 ±0,009
<b>F2</b>	0,862 ±0,259	0,010 ±0,003	0,940 ±0,067	924,706 ±222,318	5,177 ±1,015	33,226 ±2,317	0,030 ±0,005	0,171 ±0,009	0,910 ±0,049
<b>F3</b>	6,051 ±1,822	0,030 ±0,009	1,720 ±0,123	1384,572 ±33,881	13,519 ±2,651	64,352 ±4,487	0,030 ±0,004	6,510 ±0,355	2,275 ±0,125
<b>F4</b>	1,439 ±0,433	0,720 ±0,216	0,480 ±0,034	39,906 ±9,596	0,284 ±0,056	0,600 ±0,042	0,860 ±0,139	3,364 ±0,183	1,300 ±0,070
<b>F5</b>	42,292 ±12,733	9,850 ±2,974	30,611 ±2,180	2063,745 ±46,198	42,030 ±8,241	651,542 ±45,458	0,910 ±0,147	143,034 ±7,802	645,435 ±35,132
<b>Sol K</b>									
<b>F1</b>	0,030 ±0,012	0,118 ±0,035	0,211 ±0,006	3,472 ±2,015	0,272 ±0,053	0,416 ±0,052	0,620 ±0,028	1,215 ±0,101	0,091 ±0,067
<b>F2</b>	2,713 ±0,818	0,602 ±0,180	0,690 ±0,049	429,081 ±10,651	14,700 ±2,885	79,320 ±5,534	0,030 ±0,005	1,084 ±0,059	0,728 ±0,039
<b>F3</b>	93,327 ±28,095	1,117 ±0,339	3,280 ±0,233	1519,142 ±35,280	92,473 ±18,131	209,784 ±14,636	0,030 ±0,004	14,241 ±0,777	1,184 ±0,065
<b>F4</b>	12,523 ±3,773	58,488 ±17,664	3,661 ±0,260	655,425 ±33,662	93,480 ±18,327	0,104 ±0,009	0,860 ±0,139	11,994 ±0,654	6,647 ±0,360
<b>F5</b>	189,547 ±57,071	1,719 ±0,520	21,521 ±1,533	864,064 ±42,638	71,294 ±13,980	57,356 ±4,001	0,910 ±0,147	102,116 ±5,569	901,870 ±49,092
<b>Sol R</b>									
<b>F1</b>	0,040 ±0,012	0,010 ±0,004	0,320 ±0,023	9,707 ±2,314	0,030 ±0,007	0,078 ±0,005	0,620 ±0,101	0,350 ±0,010	0,616 ±0,034
<b>F2</b>	0,140 ±0,043	0,080 ±0,024	0,860 ±0,061	1804,754 ±43,400	1,030 ±0,202	55,990 ±3,907	0,030 ±0,005	0,730 ±0,040	4,358 ±0,237
<b>F3</b>	1,260 ±0,379	0,080 ±0,025	0,520 ±0,037	273,828 ±6,587	0,220 ±0,043	3,622 ±0,253	0,030 ±0,004	1,870 ±0,102	1,344 ±0,073
<b>F4</b>	0,070 ±0,022	00	0,290 ±0,021	1748,937 ±42,057	0,142 ±0,028	0,163 ±0,011	0,860 ±0,139	0,570 ±0,031	1,023 ±0,056
<b>F5</b>	6,510 ±1,961	0,01 ±0,003	2,290 ±0,163	207,090 ±10,980	9,130 ±1,790	0,507 ±0,036	0,910 ±0,147	6,760 ±0,369	214,842 ±11,694

**Annexe 04 : Liste de quelques normes utilisées dans la Thèse.**

Référence	Date	Indice de classement	Titre du document	Remarques
<b>NF ISO 11464</b>	12/1994	X31-412	Prétraitement des échantillons pour analyses physico-chimiques	---
<b>NF ISO 11465</b>	08/1994	X31-102	Détermination de la teneur pondérale en matière sèche et en eau – Méthode gravimétrique	---
<b>NF ISO 10693</b>	06/1995	X31-105	Détermination de la teneur en carbonates – Méthode volumétrique	---
<b>NF ISO 10390</b>	05/2005	X31-117	Détermination du pH	Nouvelle version
<b>NF ISO 11466</b>	06/1995	X31-415	Extraction des éléments traces solubles dans l'eau régale	---
<b>NF X 31-130</b>	12/1999	X31-130	Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles	Projet de normalisation de la CEC cobaltihexammine en cours à l'ISO
<b>NF X 31-120</b>	05/2003	X31-120	Détermination du cuivre, du fer, du manganèse et du zinc – Extraction par l'acétate d'ammonium en présence d'EDTA	Voir le protocole
<b>XP P 94-047</b>	12/1998	---	Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau. Méthode par calcination	---
<b>NF ISO 14870</b>	03/2002	X31-427	Extraction des éléments en traces par une solution tamponnée de DTPA	---
<b>NF X31-107</b>	09/2003	X31-107	Détermination de la distribution granulométrique des particules de sol – Méthode à la pipette	---
<b>NF P 18-592</b>	1990	---	Mesure de la quantité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux	---

## Effects of Heavy Metals Pollution in Soil and Plant in the Industrial Area, West ALGERIA

**Kebir Tahar\* and Bouhadjera Keltoum**

*Inorganique Chemistry and Environmental laboratory (ICEL), Department of Chemistry, Faculty of Sciences,  
University of Tlemcen, 13000 Tlemcen, Algeria. \*E-mail: kebir\_tahar@yahoo.fr*

(Received August 7, 2011; Accepted October 22, 2011)

**ABSTRACT.** Alzinc is a ursine situated in the Ghazaouet town western part of the republic of Algeria. The purpose of this study was to determine the degree of contamination which soil and plants are burdened with some heavy metals: Pb, Zn, Ni, Cu, Cd, Mn, Cr, Fe and As, then the accumulation of heavy metals in the soil and plant adjacent of area the alzinc ursine was detected and the interdependence of pollution among all three regions of the environment determined. This paper analyzes the heavy metal contents within a 2-years period in the soil and plants at the beginning of the vegetation period. The presence of Pb, Zn, Ni, Cu, Cd, Mn, Cr, Fe and As, in the samples were analyzed using Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES). Measurements of heavy metal contents were performed at three locations in soil and vegetative parts of three-plant types (plant alimentary) period during summer. The plant samples from the immediate environment of the dumpsite were highly contaminated with Zn, Cd and Mn. Three plants species: grape, artichoke and pepper, particularly, grape met some of the conditions to be classified as accumulators for **Zn, Cu, Cd and Fe**, consequently, she revealed a health risk for human and livestock due to the spread of the metal pollution from waste dumpsites to agricultural areas.

**Key words:** Pollution, Heavy metals, Contaminant, Industrial effluent and Agricultural soil

### INTRODUCTION

The term 'heavy metal' is often used to cover a diverse range of elements, which constitute an important class of pollutants. With the industrial development, the production and emission of heavy metals have increased. Some metals, e.g. Mn, Cu, Zn, Mo and Ni, are essential or beneficial micronutrients for microorganisms, plants, and animals, but at high concentrations all these metals have strong toxic effects and pose an environmental threat.<sup>1</sup>

Heavy metal pollution can be defined as an undesirable change in the physical, chemical or biological characteristics of land, water and air, that may or will harmfully affect animals and plants.<sup>2</sup> Heavy metals have received the attention of researchers all over the world, mainly due to their harmful effects on plants, especially those on vegetative and generative parts of the plants.<sup>3</sup>

The presence of heavy metals in different foods constitutes serious health hazards, depending on their relative levels. For example, cadmium and mercury injure the kidney and cause symptoms of chronic toxicity, including impaired kidney function, poor reproductive capacity, hypertension, tumors and hepatic dysfunction.<sup>4,5</sup> Lead causes renal failure and liver damage.<sup>4</sup> Some other metals (e.g. chromium, zinc and copper) cause nephritis, anuria

and extensive lesions in the kidney.<sup>4</sup> Therefore, the problem of food contamination (including fish) by toxic metals is receiving global attention.

Soil adjacent to the industrial area contains the highest concentration of heavy metals. Among heavy metals, lead and cadmium are not essential elements for plants and are generally of low availability in soils,<sup>7,6</sup> investigated the cadmium and lead uptake grown in three different textured soils and found Cd and Pb concentration in plant parts were highly correlated with Cd and Pb application, respectively. Similarly, the essentiality of chromium for plants has not been demonstrated,<sup>8</sup> whereas the importance of nickel has been documented by a few scientists.<sup>9,10</sup> Zinc and iron are essential nutrients for plants.<sup>7</sup> The heavy metals of most concern are cadmium and zinc, as these show great mobility in the soil environment.<sup>11</sup>

There are no studies about the pollution of alzinc ursine second in Africa continental after South Africa of production the zinc metal, so far. Therefore, this study assesses the pollution effects of heavy metals on agricultural soils and plant alimentary at Ghazaouet. Heavy metal, Pb, Zn, Ni, Cu, Cd, Mn, Cr, Fe and As were examined in different plants species alimentary. The objectives of the present study were (i) to characterise the fate and dispersal of Pb, Zn, Ni, Cu, Cd, Mn, Cr, Fe and As in soils around a former

mining area, (ii) to measure Pb, Zn, Ni, Cu, Cd, Mn, Cr, Fe and As levels in the three plant alimentary (artichoke, grape and pepper) and (iii) determination the rate risk of health man et animals. In summary, we address an initial strategy to waste dumpsite risk in this site that also takes into account the presence of significant concentrations of heavy metals.

## MATERIALS AND METHODS

### Sampling Location

The field study site was located in an agricultural area, where the most common vegetable grown at all the study sites are grape, pepper and artichoke, situated in Ghazaouet (longitude W 01°52'21, latitude N 35°06'00), exactly 1 km from the discharge site and 2,5 km from industrial site of essence (Fig. 1). Soils and plants were sampled in the surrounding of the dumpsite around 200000 m<sup>2</sup>. Sampling was collected out between June 2007 and July 2008. Shoots of several plant species were collected, as well as representative soil samples from the soil directly adjacent to the sampled plants (0-20 cm, topsoil layer), obtaining a total of 3 soil samples and 3 plants samples. Three regions

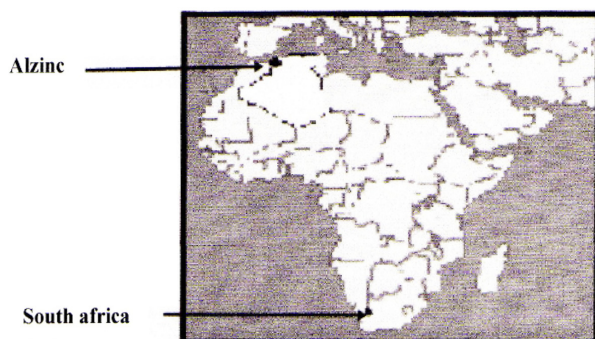


Fig. 1. location of alzinc ursine, Ghazaouet. Algeria.

were identified:

*Region I*: located at N 35°05'39, 44" where the grape grown; *Region II*: located at N 35°05'25, 04" where the artichoke grown and *Region III*: located at 35°05'21, 67" where the pepper grown.

### Plant and soil samples pre-treatment

For better preparation against contamination during sampling, soil were collected with plastic spatulas and stored in polypropylene boxes. After collection, pebbles and twigs were removed. All soil samples were taken by mixing six sub-samples from three sites of each plot at 0-20 cm depth. Each soil sample was air-dried and sieved to <2 mm for physico-chemical properties including pH, potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sodium (Na), CaCO<sub>3</sub>, organic matter, total organic, heavy metals. Total K, Ca, Na and Mg concentrations were determined using flame emission after digestion of the composite samples with boiling 2 M HNO<sub>3</sub> for 2 h.

The methods of analysis used are presents in Table 1, vegetable and soil samples were taken randomly across the field during summer June 2008, near from potential contamination Sources (industrial plants, busy roads, residential areas, etc.). Plant samples collected from the field were washed under running tap water to remove adhered soils.

The metal analyses of samples (Cu, Fe, Zn, Mn, Cr, Pb, Cd, Ni and As) were carried out by using an Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry standard reference (HISS-1, MESS-3 and PACS-2). The concentrations of heavy metals are expressed as mg/kg dry weight. The absorption wavelengths were 193.696 nm for As: 205.560 nm for Cr: 324.754 nm for Cu: 259.940 nm for Fe: 257.610 nm for Mn: 216.555 nm for Ni: 220.353 nm for Pb: 213,857 nm for Zn and 214.439 nm for Cd, respectively.

Table 1. Methods of analysis the soil and the plant

Measure	Principe	Method
Residual moisture content	Weighing the test portion before and after heating at 105 °C*	NF ISO 11465
Organic carbon	Dry combustion or sulfo-chromic acid oxidation (when CaCO <sub>3</sub> N50 g kg <sup>-1</sup> )*	NF ISO 10694 NF ISO 14235
Total carbonate	Measurement of the volume of CO <sub>2</sub> released after reaction with HCl*	NF ISO 10693
pH	pH of a water suspension*,**	NF ISO 10390
Total Cd, As, Mo, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb and Zn	Determined by ICP-AES after Digestion of the samples with aqua regia (nitric-chloric acid (1:3 V/V))	NF ISO 11466
Electrical conductivity	water suspension with the ration 1: 5*	NF ISO 11265
Organic matter	Calcinations at 550 °C at 5 h in the four*	NF ISO 10694
CEC	Percolation of a 1.0 mol l-1 ammonium acetate solution, pH=7*	NF X31-130

(\*) and (\*\*) indicate soil and plant.

## Analysis methods

### Plant analysis

The roots and sheets of the different plants were analyzed separately for heavy metal content. 1 g of <2 mm fraction plant samples was weighed into porcelain crucibles and was ignited in a muffle furnace for 6 h at a temperature between 450-500 °C. Grey white ash was obtained at the completion of the ashing. The ash samples were allowed to cool and then 10 ml of 2 M nitric acid (HNO<sub>3</sub>) was added to each sample. The solution was evaporated to near dryness on a hot plate and the cooled residues were re-dissolved in 10 mL 2 M nitric acid (HNO<sub>3</sub>). The solutions were then filtered into 25 mL volumetric flasks. Both the crucible and the filter paper were washed into the flasks, made up with deionized water and then stored in polyethylene tubes for instrumental analysis. Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES) standard reference (HISS-1, MESS-3 and PACS-2) was used to analyse soil, plant digests for ten heavy metals (Table 2) and the blanks were measured in parallel.

### Soil analysis

The <2 mm fraction soil samples were used to determine the maximal environmentally available heavy metals. This was done using aqua regia,<sup>12</sup> samples were digested with a chlorhydric (37%) and nitric (70%) acids mixture in a ratio of 3:1 (v/v), at room temperature for 16 h and, after, at 130 °C for 2 h, under reflux conditions. Each suspension was then filtered, diluted to 100 ml with 0.5 M nitric acid and stored at 4 °C until analysis.

## RESULTS AND DISCUSSION

The nature of soil is characterized by several basic phys-

ical, chemical and biological properties. The interrelationship between these properties determines the capabilities and limitations of the soil for plant growth. Thus the soil acts as a reservoir for plant nutrients. Not all the nutrients are present in plant available form. Some are components of rock minerals or organic compounds that must be simplified before they can be utilized by the plant. If all the nutrients are present in adequate amounts, the plant should exhibit good growth and vigor.<sup>11,13</sup> However soils are affected by the geology of substrate, trampling by activity of ursine and addition of pollutants from automobiles.

In the present study, it was found The pH of the soils ranged between moderately acidic 5.10 and slightly alkaline 8.66. The levels of Na, K, Ca and Mg were much lower in the wastes dumpsite alzinc when compared with their high levels in adjacent soils (Region I, II and III). The amount of organic matter and total nitrogen is median, Soil reaction or pH is a simple and direct measure of the overall chemical condition of soils.<sup>14</sup> It has been found that soil pH is correlated with the solubility of nutrient compounds and hence their availability to the plant. Similarly it commonly recognized that at pH 6.5, nutrient availability to plants is at highest and toxicity at the lowest. The pH of soil in the study area ranges from 7.39-8.66 with mean value of 8.1. This pH value also favors the widest range of soil organisms and their activities.<sup>15</sup>

Organic matter is needed for the chemical well being of the plant and soil fertility status because it is the source of nearly all the nitrogen and most of the phosphorus in some soils.<sup>13</sup> In the present study organic matter showed 2.78-5.92%, but addition of organic matter can markedly increase soil productivity by providing essential plant nutrients and by improving the physical properties of the soil. This

**Table 2.** Chemical composition of soils study

Parameter	Study site			
	Region I	Region II	Region III	Dumpsite
pH	8.48	7.39	8.66	5.10
Electrical conductivity (ms. Cm <sup>-1</sup> )	0.414	0.623	0.544	0.234
Organic matter (%)	2.78	5.92	2.94	1.23
CaCO <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	4.80	5.68	5.25	4.05
Organic-C (g kg <sup>-1</sup> )	1.70	3.64	1.63	1.05
Total-N (g kg <sup>-1</sup> )	0.89	1.12	0.67	0.23
CEC ( cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> )	29.13	32.94	30.15	22.34
Sodium (Na) (g kg <sup>-1</sup> )	2.94	1.19	0.53	0.12
Potassium (K) (g kg <sup>-1</sup> )	8.38	2.37	1.18	1.03
Calcium (Ca) (g kg <sup>-1</sup> )	150.11	55.11	47.61	6.43
Magnesium (Mg) (g kg <sup>-1</sup> )	17.43	2.45	1.43	0.73

Region I: 40 mW; Region II: 100 mW and Region III: 200 mWS of dumpsite of alzinc ursine (W: west and WS: South-West)

moderate amount of organic matter in present study is supported by the fact that pH will be higher where organic matter is well decomposed and incorporated into the surface mineral horizon.<sup>13</sup> The amount of organic matter maintained in any soil is largely dependent on the amount of nitrogen present. The ratio between the nitrogen and organic matter is, thus, also rather constant<sup>14</sup> states that organic matter contents in soil cannot be increased without simultaneously increasing its nitrogen contents and vice versa.

The other macronutrients essential for plant growth, potassium, calcium and magnesium were present in adequate amount, Among them, calcium was present in slightly higher amount i.e. value of 47.61-150.11 g/kg (Table 2), but The levels of Na, K, Ca and Mg were much lower in the dumpsite of alzinc when compared with their high levels in adjacent soils (Region I, II and III).

Heavy metals are chemical elements common to all types of soils, and their abundance ranks between percentage (iron only) and parts per million. The very low general level of their content in soil and plants, as well as the biological role of most of these chemical element, has led them being grouped under the generic name of 'micro elements', when the soil has very high content of such chemical elements, the term 'heavy metal pollution' is used. Hence heavy metals are synonyms to pollution and toxicity.<sup>11,16</sup> The determination of heavy metals in soils was carried out for the measurement of the total element content and to assess the base line knowledge of soil components with respect to which changes in soil composition produced by vehicular pollution and agricultural inputs in the surrounding fields.

Soil contamination by heavy metals is increasing nowadays,<sup>17</sup> in the present study, the heavy metals (Pb, Zn, Ni, Cu, Cd, Mn, Cr, Fe and As) concentration with the exception of iron, decreased with the increase in distance from the road, i.e. from the border zone to the verge zone.

### Distribution of heavy metals in soils

The highest levels of Zn, Cd, Mn and Fe were found in the composite soil from adjacent of the waste dumpsite the alzinc industrial area indicating the waste as the source of soil pollution and contamination (Table 3). All the soil samples collected of the waste dumpsite had lower levels of Pb than the normal cleanup level of Pb 400 mg/kg in soils (Table 4). The levels of Zn were inside the range found in contaminated soils 20-300 mg/kg. The levels of Ni found in the soil samples were within the normal range of 1-110 mg/kg reported for uncontaminated soils.

The copper, chromium and arsenic concentrations were, however, lower than the values reported for typical uncontaminated soil 50-150 mg/kg, 150 mg/kg, 40 mg/kg (Table 4). The high metal concentrations of the soil could have negative effects on microbial activities,<sup>20</sup> provoking a low organic matter mineralization during the plant growth.

The apparent diminishing of heavy metals concentration away from the waste dumpsite of alzinc almost certainly confirms the waste as the potential source of soil contamination and their concentrations in plants. Samples of plant collected from the immediate environment of

**Table 4.** Doorstep toxic of heavy metals in soil and plant<sup>18,19</sup>

	Threshold values (mg/kg dry weight)	
	[Metal] in plant	[Metal] in soil
Lead (Pb)	50	100-400
Zinc (Zn)	100-400	20-300
Nickel (Ni)	1-5	1-100
Copper (Cu)	20	50-100
Cadmium (Cd)	0.01-1	1-3
Manganese (Mn)	60	60
Chromium (Cr)	0.5-2	150
Arsenic (As)	3-10	40
Iron (Fe)	500-1500	1000

[Metal]: concentration of metal

**Table 3.** Concentration of heavy metals in soils and plants collected from waste dumpsite of alzinc ursine

Experimental results	Region I		Region II		Region III	
	Soil	Grape	Soil	Artichoke	Soil	Pepper
lead (mg kg <sup>-1</sup> )	39.14	16.61	17.81	28.47	7.99	5.42
Zinc (mgkg <sup>-1</sup> )	21.15	918.89	731.08	887.97	432.15	1581.66
Nickel (mg kg <sup>-1</sup> )	10.07	18.58	15.31	15.88	14.37	19.65
Copper (mgkg <sup>-1</sup> )	15.32	38.14	6.00	39.22	4.32	44.97
Cadium (mg kg <sup>-1</sup> )	10.18	3.42	4.18	2.24	1.89	6.15
Manganese (mg kg <sup>-1</sup> )	244.94	73.72	92.00	56.52	79.03	81.36
Chronium (mg kg <sup>-1</sup> )	73.32	48.26	22.05	33.62	17.87	8.64
Iron (mg kg <sup>-1</sup> )	9390	400	5410	1690	4030	220
Arsenic (mg kg <sup>-1</sup> )	37.19	26.17	3.08	2.20	4.92	3.83

the waste were grossly contaminated with Zn, Mn and Cd. The high levels of these metals present the site as potentially hazardous and highly inimical to food chain and biological life in the environment. This makes remediation of the site a matter of urgency for safe biological life and for a clean environment.

### Heavy metals accumulation in plants

The results obtained showed that heavy metal concentrations in the plants varied with plant species, levels of heavy metals in the soils and heavy metal contaminants.

The Various studies have shown heavy contamination of agricultural soils and vegetation with lead concentration declining steeply with distance from the road,<sup>21</sup> as was seen in the present study. The rate of lead deposition to the ground is very much dependent upon the presence and nature of vegetation. The rate of deposition of lead on grass is about four times greater than on bare soil.<sup>22</sup> In the present study the lead concentration in three plant alimentary recorded was quite low than national environmental quality standard range i.e. 50 mg/kg. However, when values were expressed on a fresh weight basis, the limit established by the European Union for leaf vegetables in foodstuff 0.3 mg/kg.<sup>23</sup>

Zinc is essential element for plant growth, as it serves an important role in plant structure and function,<sup>11</sup> it is a natural constituent of soils in terrestrial ecosystem. It usually occurs in low concentrations and does not pose a toxicity problem for plants,<sup>24</sup> but increased concentrations of zinc in soil can lead to toxic effects in plants.<sup>25</sup> Potentially toxic quantities of zinc in soil result largely from anthropogenic (soil located near dumpsite) sources. In Table 3, the value of zinc in study plant, grape, artichoke and pepper was 918.89, 887.97 and 1581.66 mg/kg. These values of zinc were quite high as compared to national environmental quality standard range i.e. 100-400 mg/kg.<sup>11</sup>

Nickel plays an essential role in metabolic processes of higher plants,<sup>11</sup> the value of nickel in study plant: grape, artichoke and pepper was 18.58, 15.88 and 19.65 mg/kg, respectively. These values of nickel were quite high as compared to national environmental quality standard range i.e. 1-5 mg/kg.<sup>11</sup> Copper concentrations in plants species were higher than the toxic values 20 mg/kg.<sup>26</sup>

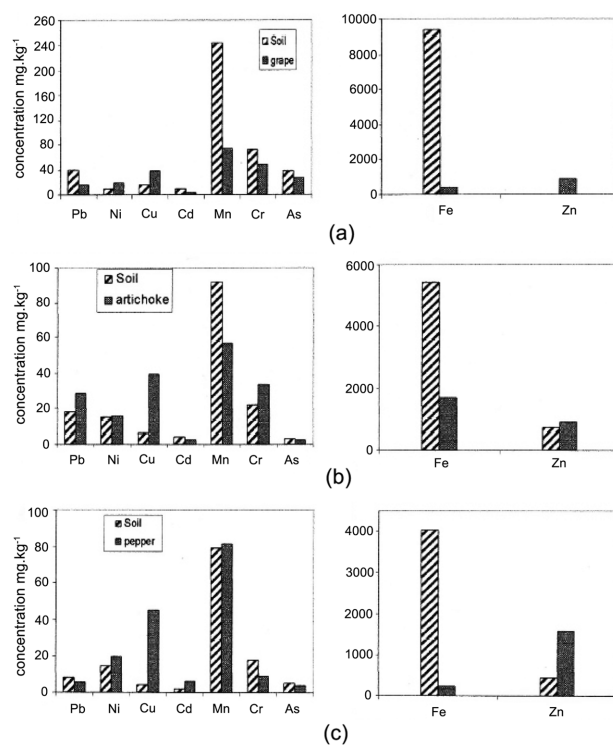
Cadmium is yet not known to have any biological function on the contrary, is said to be highly toxic to plants and animals.<sup>11</sup> Compared with the other metals cadmium is more mobile in soil in relation to both leaching and availability to plants.<sup>11,23</sup> The value of grape, artichoke and pepper was 3.42, 2.24 and 6.15 mg/kg, respectively, where

Cd content is high. These values indicate quite coherence with national environmental quality standard range i.e. 0.1-1 mg/kg.<sup>27</sup> It has also been found that cadmium pollution without co-contamination by zinc is rare.<sup>25</sup> Similarly (Berthelsen *et al.*)<sup>28</sup> found that spatial pattern of cadmium level in vegetation was analogous to that of zinc.

Mn concentrations greater than 60 mg/kg in grape and pepper can be considered high in plants, but is low in artichoke (Table 3).<sup>26</sup> The concentrations of Mn in both plant species were in excess of the threshold micronutrient concentration in animal feeds >70 mg/kg.<sup>26,29</sup>

Although the essentiality of chromium for plants has not been documented however, few studies have shown the importance of nickel in soil for plants, but nickel is more likely to be toxic than the relatively large concentration of chromium.<sup>30</sup> the value of chromium 48.26, 33.62 and 8.64 mg/kg in grape, artichoke and pepper, respectively. The present study indicates a fairly-high level in the study area. Among the heavy metals, chromium is commonly identified soil contaminant. It is ubiquitous environmental pollutant and is phototoxic at very low concentrations, but still this value can cause toxicity to the soil and plants because the toxic range was 0.5-2 mg/kg.<sup>11,26</sup>

Arsenate mobility in soils is governs by the presence



**Fig. 2.** Heavy metal concentration in (a) Region I (soil and grape); (b) Region II (soil and artichoke); (c) Region III (soil and pepper).



of iron and manganese hydroxides, organic matter, pH, and phosphate. Arsenic in plants artichoke and pepper is usually below the toxicity threshold for aboveground tissues of 3-10 mg/kg dry weight, but is very high at grape 26.17 mg/kg.<sup>18,25</sup>

## CONCLUSION

This site presents three potential hazards that need to be remediated by soil amendments and site phytostabilisation. In this context, the area should be carefully monitored in order to detect changes in the long-term risk due to the presence of elevated concentrations of trace elements in soils. Toxicological tests and risk assessment will also be carried out with highly polluted soils from this site to evaluate the actual environmental risk of trace elements and their transfer to the food chain. The grape plant alimentary behaved as a metal indicator for Mn, Cu, Cr and Cd, indicating that it can be used for testing changes in metal availability in soils. The concentrations of metals in both plant species exceeded the limits established for humans and grazing an animal, which implies a health risk linked with the spread of the pollution from mining sites to agricultural areas.

**Acknowledgements.** In this work, I grateful the laboratory of analyse of metal trace of al zinc ursine, Ghazaouet, and their cooperation for all information reported about this study.

## REFERENCES

1. Nodelkoska, T. V.; Doran, P. M. *Environ. Pollut.* **2000**, *107*, 315.
2. Odum, E. P. *Fundamentals of Ecology*, 3th ed.; Saunders: Philadelphia, 1971; p 574.
3. Ekatarina, A.; Jeliaskova, L. E. University of Massachusetts, Amherst, MA, U.S.A, An internet review. 2001.
4. Luckey, T. D.; Venugopal, B. Plenum Press: New York, 1977.
5. İsmail, K.; Selda, T. Ö.; Murat, B. *Fresenius Environmental Bulletin* **2006**, *15*(1), 26.
6. Kibria, M. G.; Osman, K. T.; Ahmed, M. J. *Soil and Environment* **2007**, *26*(2), 106.
7. Fredeen, A. L.; Pugh, R. E.; Dick, D. G. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2002**, *52*(3), 273.
8. Guthrie, B. E. *Elsevier, Amsterdam.* **1982**, *117*, 148.
9. Dixon, N. E.; Gazzola, C.; Blakely, R. L.; Zerner, B. *J. Am. Chem. Soc.* **1975**, *97*, 4131.
10. Brown, P. H.; Welch, R. M.; Cary, E. E. *Plant Physiol.* **1987**, *85*, 801.
11. Ahmad, S. S.; Erum, S. *Soil and Environment* **2010**, *29*(2), 110.
12. Pueyo, M.; Sastre, J.; Hernández, E.; Vidal, M.; López-Sánchez, J. F.; Rauret, G. *J. Environ. Qual.* **2003**, *32*, 2054.
13. Craul, P. J. John Wiley & Sons: New York, 1992.
14. Brady, N. C. *The Nature and Properties of Soils*, 11th ed.; McMillan: New York, 1996; p 621.
15. Alexander, M. Plenum Press: New York, 1980; p 363.
16. Hodson, M. E. *Environ. Pollut.* **2004**, *129*, 341.
17. Lin, C.; Lin, H. *J. Hazard. Mater.* **2005**, *122*(1-2), 7.
18. Eduardo, M. J.; Rebeca, M.; Elvira, E.; Jesús, P. *J. Soils and Sediments* **2010**, *10*, 301.
19. Alvarenga, P.; Palma, P.; Gonçalves, A. P.; Fernandes, R. M.; Cunha-Queda, A. C.; Duarte, E.; Vallini, G. *J. Environment International* **2006**, *EI-01553*, 9.
20. Dai, J.; Becquer, T.; Rouiller, J. H.; Reversat, G.; Reversat, F. B.; Lavelle, P. *Applied Soil Ecology* **2004**, *25*, 99.
21. Little, P. E. *Environmental and Medical Services Division*, A. E. R. E., Didcot, Oxford Shire, U.K., 1995.
22. Little, P.; Wiffenn, R. D. *Atmos. Environ.* **1978**, *12*, 1331.
23. Commission of the European Communities, 2001. *Commission Regulation (EC) No. 466/2001*, 8 March 2001. setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs, Official J. Eur. Commun. L77 of 16/3/2001.
24. Paschke, M. W.; Redente, E. F.; Levy, D. B. *Environmental Toxicity and Chemistry* **2000**, *19*, 2751.
25. Chaney, R. L.; Oliver, D. P. In *Contaminants and the Soil Environment in the Australia-Pacific Region*; R. Naidu et al., Eds.; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 1996; p 259.
26. Clemente, R.; Paredes, C.; Bernal, M. P. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **2007**, *118*, 319.
27. Blake, L.; Goulding, K. W. T. *Plant and Soil* **2002**, *240*, 235.
28. Berthelsen, B. O.; Steinnes, W.; Jingsen, L. *J. Environ. Qual.* **1995**, *24*, 1018.
29. Georgievskii, V. I.; Annenkov, B. N.; Samokhin, V. T. *Mineral Nutrition of Animals*; Butterworths: London, 1982.
30. Brooks, R. R. *Serpentine and Its Vegetation*; Croom Helm: London, 1987.

## **Résumé:**

Le présent travail, consiste à évaluer le degré de contamination et de pollution métallique tel que : le Pb, le Zn, le Ni, le Cu, le Cd, le Mn, le Cr, le Fe, le Co et l'As pendant une période de cinq années (2006 à 2010) dans des sols agricoles situés près d'une décharge industrielle d'ALZINC - Tlemcen dans deux profondeurs (0-20) et (20-40)cm et de déterminer leur impact sur les plantes alimentaires cultivées. La présence de ces métaux dans les échantillons ont été analysés après leur mise en solution en utilisant la spectrométrie d'émission atomique par plasma à couplage inductif [ICP-AES]. Les résultats trouvés montrent que les échantillons des sols ont des valeurs en Zn, en As, en Cd et en Mn supérieures aux valeurs recommandées, alors que les plantes ont des teneurs élevées en Zn, en Cr, en Ni, en Cd, en Cu et en Pb. L'étude du transfert et d'accumulation des ETM dans les différents organes des végétaux a montré que le devenir des ETM est gouverné par les propriétés physico-chimiques des sols et du type de la plante.

**Mots-clés:** Métaux lourds, pollution, mobilité des métaux, sols agricoles, accumulation, extraction totale et sol.

---

## **Abstract:**

The present work is to evaluate the degree of metal contamination and pollution such as: Pb, Zn, Ni, Cu, Cd, Mn, Cr, Fe, Co and As for a period of five years (2006 to 2010) in agricultural soils located near a landfill industrial ALZINC - Tlemcen in two depths (0-20) and (20-40)cm and determine their impact on plants grown alimentaires . The presence of these metals in the samples were analyzed after being put into solution using atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma [ICP-AES]. The results show that the soil samples have values of Zn, As, Cd and Mn greater than the recommended values, so that plants contain high levels of Zn, Cr, Ni, Cd, Cu Pb and study the transfer and accumulation of trace metals in various organs of the plant showed that the fate of the trace metals is governed by the physico-chemical properties of soil and the type of plant.

**Key-words:** Heavy metals, pollution, metal mobility, agricultural soils, accumulation, total extraction and soil.

---

## **الملخص:**

يعد تلوث التربة من أخطر المشاكل جراء التحولات المحتملة في الملوثات في الأونة الأخيرة في البلدان الصناعية القديمة. الهدف من هذه الدراسة هو تقديم تقرير عن التحقيق في درجة التلوث في التربة الواقعة على مقربة من مكب صناعي للمنطقة الصناعية "ALZINC" الواقعة بولاية تلمسان وتأثيرها على النباتات المزروعة، اتجاه بعض المعادن مثل: Zn, Ni, Cu, Cd, Mn, Cr, Fe, Co و As خلال الفترة الممتدة من 2006 إلى 2010. تم تحليل المعادن عن طريق [ICP-AES] كما أجريت القياسات للمعادن في ثلاث مناطق مختلفة وعلى عمقين مختلفين (0-20) و (20 - 40) سم. أظهرت النتائج أن التربة تحتوي على قيم من Zn, Cd, As و Mn أعلى من القيم الموصى بها، وكذلك في النباتات مستويات عالية من Zn, Cr, Ni, Cd, Cu و Pb. كما أظهرت دراسة نقل و تخزين المعادن في مختلف أجهزة النبات أنهما متعلقان بلخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة ونوع النبات.

**كلمات-المفتاح:** المعادن الثقيلة، التلوث، التنقل المعادن، التربة الزراعية، تراكم، مجموع استخراج و التربة.