

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj (Bouira)



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés
Laboratoire de recherche des matériaux et développement durable

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master par :

AID Maria

AOURDACHE Nour El Imane

Spécialité : Sciences et Génie de l'Environnement

THEME

Utilisation de la technique INAA dans l'analyse de la
pollution des sols par les éléments traces

Remis le : 25/09/2017 :

Devant de jury composé de :

Mme D. HADIOUCHE

Mme A. ZAABAR

Mr H. LOUNICI

Mme Z. BOUHILA-KHODJA

MCB

Professeur

Maitre de Recherche

UAMO, Bouira

UAMO, Bouira

UAMO, Bouira

CRND

Présidente

Examinatrice

Encadreur

Encadreur

Remerciements

En préambule de ce mémoire, nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apportés leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

On présente tous nos remerciements tout d'abord à notre seigneur "Allah" qui nous a aidé à réaliser notre objectif et à compléter ce travail de recherche.

*On voudrait adresser nos sincères remerciements et notre gratitude les plus profondes à **Mr Lounici H.** Professeur à l'Université de Bouira, pour son aide et ses conseils éclairés, on le remercie pour toutes ses remarques indispensables et sa disponibilité.*

*Le travail fut tellement plus simple grâce à notre encadreur **Mme khodja Z.** Maître de recherche au CRND à qui on exprime notre extrême gratitude. « Qui nous symbolise la beauté, la gentillesse et la pureté », avec qui on a eu un réel plaisir à travailler, merci pour sa disponibilité, sa confiance et pour nous avoir fait profiter de sa culture scientifique, on a particulièrement apprécié son dynamisme et sa bonne humeur.*

On remercie tous ceux qui vont lire ce mémoire, à commencer par les membres du jury qui ont accepté sans hésitation d'évaluer et de critiquer ce travail.

C'est avec sympathie qu'on associe à ces remerciements l'ensemble du personnel du CRND qui nous a aidés tant sur le plan administratif et matériel que sur le plan scientifique.

On tient également à remercier le Directeur du Centre de Recherche Nucléaire de DRARIA, Monsieur Bruno Scaillet, qui nous a accueillis au sein de son établissement.

Et Merci à nos familles, nos amis.

« Les hommes se plaisent à penser qu'ils peuvent se débrouiller seuls, mais l'homme, le vrai, sait que rien ne vaut le Soutien et les encouragements d'une bonne équipe. » TIM ALLEN

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère, qui a œuvré pour moi ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices et ses précieux conseils pour toute son assistance dans ma vie.

Mon père, qui est peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit; Merci pour les valeurs nobles de l'éducation et du soutien permanent venu de toi.

A mes frères Sid Ali et Farid, A ma chère sœur Amina et son mari Otman, Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A mes deux anges, mon neveux et ma nièce Rayan et Meryam.

A ma chère grand-mère, a qui je souhaite une bonne santé. A mon cher binôme Maria, Pour son entente et sa sympathie. En particulier à mon bien aimé Samy. A ma chère ryma , Qui m'a aidé et supporté dans les moments difficiles. A mes chères ami(e)s mimi, nesserin, Sarah, chihab, imad , Samir ,imen ,aicha ,lathmas et lilia , Pour leurs indéfectible soutien et leurs patience infinies. A vous mes chères cousines Asma, manel, Fofa nassima mélissa farah et nawel , à ma tante zahô . A tous le groupe SGE. A toute ma famille et à tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Nour el iman

Dédicaces

« S'il est une chose qu'on puisse désirer toujours et obtenir quelquefois,
c'est la tendresse humaine »

Albert Camus

Je dédie ce mémoire

A mes Chères parents ma Mère et mon Père

*Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines m'ont permis de
vivre ce jour, pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs
encouragements.*

A mes Frères Salim, Abderezak, et ma très chère sœur Sara.

*A mon cher marié, l'homme de ma vie, mon âme sœur et la lumière de
mon chemin.*

Ma vie à tes côtés est remplie de belles surprises.

*Leurs sacrifices, leurs soutiens moral et matériel, leurs gentillesse sans
égal, leurs profonds attachements m'ont permis de réussir mes études.
Sans leurs aides, leurs conseils et leurs encouragements ce travail
n'aurait vu le jour.*

*Que dieu réunisse nos chemins pour un long commun serein et que ce
travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour
sincère et fidèle.*

A ma très chère amie Imane, mes amis.

A tous ceux qui me sont chers.

MARIA

Sommaire

Page

Liste des figures
Liste des tableaux
Glossaire

Introduction générale

1

Chapitre I : Les sols et leur pollution

3

I.1. Définition

3

I.2. Composition du sol

4

I.2.1. L'air

4

I.2.2. L'eau

4

I.2.3. Les composés minéraux

4

I.2.3. Les composés organiques

4

I.3. Pollution des sols

5

I.3.1. Qu'est-ce qu'un sol pollué ?

5

I.3.2. La pollution du sol par les éléments traces

5

I.3.3. Propriétés de certains éléments traces

6

I.3.4. Origines des éléments traces métalliques dans le sol

9

I.3.4.1. Origine naturelle

9

I.3.4.2. Origine anthropique

10

a. Les contaminations diffuses

10

b. Les contaminations ponctuelles

10

c. Les principales sources anthropiques de pollution des sols

10

I.3.5. Spécificités de la pollution par les métaux

13

I.3.6. Toxicité

15

I.3.7. dépollution des sols

17

I.3.8. Echantillonnage des sols

19

Chapitre II : Techniques d'analyse

21

II.1. Généralités sur les techniques d'analyses

21

II.2. L'Analyse par Activation Neutronique Instrumentale (INAA)

22

II.2.1. Historique

22

II.2.2. Définition

22

II.2.3. Principe

22

II.2.4. But de l'irradiation et différents modes

23

II.2.5. Sources de neutrons

23

II.2.5.1. Les accélérateurs

23

II.2.5.2. Les sources isotopiques

23

| | |
|---|-----------|
| II.2.5.3. Les réacteurs nucléaires | 24 |
| II.2.6. Les réactions nucléaires | 24 |
| II.2.7. La radioactivité | 25 |
| II.2.8. Avantages et inconvénients de la méthode d'INAA | 28 |
| II.2.9. Application de l'INAA | 29 |
| Chapitre III : Matériel et méthodes | 31 |
| III.1. Zone d'Etude | 31 |
| III.1.1 Situation géographique | 31 |
| III.1.2. Présentation du centre de recherche nucléaire de Draria (CRND) | 32 |
| III.2. Matériel | 32 |
| III.2.1. Matériel et produits utilisés | 32 |
| III.2.2. Le réacteur NUR de Draria | 33 |
| III.2.3. La chaîne de spectrométrie gamma | 34 |
| III.3. Méthodes | 36 |
| III.3.1. Mode de prélèvement | 36 |
| III.3.2. Préparation et conditionnement des échantillons | 36 |
| III.3.3. Irradiation | 38 |
| III.3.4. Refroidissement des échantillons | 39 |
| III.3.5. Calibration de la chaîne de mesure | 39 |
| III.3.6. Analyse spectrométriques des échantillons irradiés | 40 |
| III.3.7. Calcul des concentrations en éléments traces | 40 |
| Chapitre IV : Résultats et discussion | 42 |
| IV.1. Concentration des éléments de radio-isotopes à moyenne période | 42 |
| IV.2. Concentration des éléments de radio-isotopes à longue période | 44 |
| IV.3. Comparaison des résultats avec ceux des lichens du même site | 51 |
| Conclusion générale | 54 |
| Références bibliographiques | |
| Annexes | |
| Résumé | |

Liste des figures

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figure I.1 | Sources, transferts, impacts et risques des éléments traces sur l'environnement. | 12 |
| Figure II.1 | Diagramme illustrant le processus de la capture neutronique par un noyau cible suivi d'une émission de rayon gamma. | 25 |
| Figure III.1 | Carte d'Algérie illustrant le site de prélèvement. | 31 |
| Figure III.2 | Zones de prélèvements. | 32 |
| Figure III.3 | Schéma d'une installation de mesure des rayons γ utilisée en analyse par activation neutronique. | 35 |
| Figure III.4 | Chaîne de spectrométrie gamma. | 36 |
| Figure III.5 | Organisation des enveloppes à l'intérieur de la capsule. | 38 |
| Figure IV.1 | Moyenne des concentrations en éléments ($\mu\text{g/g}$) ; (a) Molybdène; (b) Brome; (c) Samarium; (d) Ytterbium ; (e) lanthane ;(f) Arsenic enregistrées dans les trois zones de prélèvement. | 44 |
| Figure IV.2 | Moyenne des concentrations en éléments ($\mu\text{g/g}$) ; (a) Scandium; (b) Cérium ; (c) Terbium; (d) Cadmium ; (e) Chrome ; (f) Néodyme ; (g) Argent ; (h) Zirconium ; (i) Césium ; (j) Antimoine ; (k) strontium ; (l) Zinc ; (m) Tungstène ; (n) Sélénium ; (o) Mercure ; (p) Cobalt ; (q) Fer ; enregistrées dans les trois zones de prélèvement. | 51 |
| Figure IV.3 | Variation des concentrations moyennes en éléments obtenues sur échantillons de sol et de lichen ($\mu\text{g/g}$) au niveau du site de prélèvement. | 53 |
| Figure IV.4 | Corrélation des concentrations moyennes en éléments obtenues sur échantillons de sol et de lichen du site de prélèvement. | 53 |

Liste des tableaux

| | page |
|----------------------|---|
| Tableau I.1 | Nature des composés du sol en fonction de leur granulométrie. 4 |
| Tableau I.2 | Principales sources naturelles et anthropiques en éléments traces. 12 |
| Tableau I.3 | Temps de demi-vie biologique de quelques éléments. 16 |
| Tableau I.4 | Effets de certains métaux lourds sur la santé. 17 |
| Tableau I.5 | Méthodes de dépollution des sols par les métaux lourds. 18 |
| Tableau III.1 | Fiche de pesée des échantillons de sol et des standards. 37 |
| Tableau III.2 | Protocole d'irradiation et de comptage pour l'analyse des éléments. 38 |
| Tableau IV.1 | Moyennes de concentration des éléments ($\mu\text{g/g}$) en de moyenne période de demi-vie, relatives aux trois zones. 42 |
| Tableau IV.2 | Moyennes de concentration des éléments ($\mu\text{g/g}$) en de longue période de demi-vie, relatives aux trois zones. 44 |
| Tableau IV.3 | Concentrations des éléments traces dans les échantillons de sol et de lichens ($\mu\text{g/g}$), du site de prélèvement. 52 |

Glossaire

Aérosol : particule colloïdale solide ou liquide suspendue dans un milieu gazeux.

Anthropique : lié à l'activité humaine

Bio-accumulateur : organisme vivant capable d'absorber et de concentrer une substance depuis son environnement

Contamination : présence anormale d'une substance, de micro-organismes dans un milieu, un objet, ou un être vivant. La notion de contamination est appliquée historiquement et dans l'ordre aux micro-organismes puis aux substances radioactives.

Colloïdes : c'est la suspension d'une ou plusieurs substances, dispersées régulièrement dans une autre substance, formant un système à deux phases séparées. Dans un fluide il forme une dispersion homogène de particules dont les dimensions vont du nanomètre au micromètre.

Demi-vie : durée nécessaire pour diminuer de moitié l'activité d'une substance

Dépôt atmosphérique : transfert sec ou humide de matière depuis l'atmosphère vers une surface continentale océanique

Élément trace : élément chimique dont l'abondance est inférieure à 1 ‰ dans la croûte terrestre

Érosion : Action par laquelle divers éléments constituant les horizons superficiels de la couverture pédologique sont enlevés par le vent, la pluie, les rivières, les glaciers

Épandage : pratique agricole qui consiste à répandre sur un champ des fertilisants, des amendements, des herbicides ou des pesticides.

Isotope : chacun des éléments d'un même numéro atomique différant par leur nombre de neutrons, donc par leur masse

Lessivage : entraînement par l'eau à travers les horizons de sols des substances fixées sur des particules fines.

Lichen : organisme photosynthétique issu de la symbiose entre une algue et un champignon.

Limite de détection (méthode) : plus basse concentration d'un élément ou d'une substance décelable pour une méthode et une matrice données.

Lithosphère : (littéralement, la « boule de pierre ») est l'enveloppe terrestre rigide de la surface de la Terre. Elle comprend la croûte terrestre et une partie du manteau supérieur. Elle est divisée en un certain nombre de plaques tectoniques, également appelées plaques lithosphériques.

Métal : élément chimique facilement déformable à conductivité thermique et électrique forte présentant une tendance à former des cations

Métal lourd /élément chimique métallique de densité supérieure à $5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Métalloïde : élément chimique aux propriétés physicochimiques intermédiaires entre métal et non métal.

Oligoélément : élément chimique présent en faible quantité chez les êtres vivants indispensable au métabolisme.

Pédologie : pédo : « sol », logie : « étude », est une science ayant pour but d'étudier la pédogenèse, c'est-à-dire la formation et l'évolution des sols, notamment au travers de plusieurs taxonomies des sols. Elle examine les constituants de la terre (minéraux, matières organiques), leur agencement (granulométrie, porosité...) leurs propriétés chimiques (ph...).

Roche-mère : (en pédologie) est la couche minérale superficielle de la croûte terrestre, dont l'altération va participer à la constitution des sols

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).

Morphologiques : Etude de la forme et la structure externes des êtres vivants dans les différentes sciences biologiques.

Transition : Changement d'état d'un système quantique (atome ou molécule).

Terres rares : Les terres rares sont un groupe de métaux aux propriétés voisines comprenant le scandium $_{21}\text{Sc}$, l'yttrium $_{39}\text{Y}$, et les quinze lanthanides.

Introduction générale

De nos jours, l'environnement est une notion à la mode qui est utilisée sous différents aspects et qui reste par conséquent assez floue. Souvent, l'environnement se rapporte à ce qui vit c'est-à-dire aux hommes, aux animaux, aux plantes et aux micro-organismes. Ces espèces vivantes dépendent les unes des autres de leur milieu, qui se compose d'innombrables "éléments" influents, qu'on appelle les facteurs écologiques, la somme de tous les facteurs environnementaux constitue l'environnement, la nature.

L'homme est une partie de l'écosystème de la Terre. Il influence son environnement et réciproquement, il utilise l'environnement et le transforme à travers ses activités pour créer son espace vital et assurer ses besoins.

De ce fait, les enjeux de la pollution des différents compartiments de l'environnement sont arrivés au plus haut niveau, les chercheurs et la société civile en font une de leurs principales préoccupations. En milieu urbain, le trafic routier constitue l'une des principales sources émettrices de particules fines, cette pollution se caractérise par des émissions primaires qui sont soit, d'origine naturelle ou anthropique. La distribution des éléments traces dans l'environnement a été rapportée par de nombreux auteurs. Cependant, il n'y a peu d'information récente sur la pollution par les éléments traces dans les zones urbaines et suburbaines à Alger. Dans cette présente étude, nous avons cherché à nous renseigner sur l'identité des substances polluantes dans le sol, et leurs sources d'émission en utilisant la technique d'Analyse par Activation Neutronique instrumentale (INAA). Devant cette situation et afin d'évaluer la qualité du sol au niveau du site situé au Centre de Recherche Nucléaire de Draria à Sebbala, région qui dépend de la Daïra de Draria, wilaya d'Alger ; nous nous sommes intéressés, dans cette modeste contribution à l'étude qualitative et quantitative de la pollution du sol en Eléments Traces Métalliques (ETM).

Dans le chapitre I nous introduisons la notion d'éléments traces, leurs origines, leurs spécificités ainsi que leur toxicité.

Dans le chapitre II nous allons voir les différentes techniques d'analyse et nous approfondirons sur celle par activation neutronique.

Puis dans le chapitre III nous présenterons la zone d'étude, le matériel et le protocole suivi.

Enfin dans le chapitre IV nous présenterons nos résultats sous formes de graphiques et les discuterons, nous ferons aussi une étude comparative des résultats obtenus par rapports aux lichens du même site avant de conclure.

Chapitre I : Les sols et leur pollution

I.1. Définition

Le mot sol désigne des choses assez différentes selon le point de vue sous lequel on se place. Il peut s'agir, dans son acception la plus commune, de ce que nous avons sous les pieds, au sens le plus large. Pour le spécialiste en pédologie, le sol est une entité parfaitement définie et complètement caractérisée aux plans morphologique, hydrique, minéralogique et biologique. Le géologue, lui, définira le sol comme étant tout ce qui recouvre la roche-mère, objet principal de ses investigations. Enfin, il existe aussi une approche fonctionnelle qui décrit le sol à partir des interactions entre ses différents constituants, qu'ils soient inertes (eau, air, minéraux...) ou qu'il s'agisse d'êtres vivants, végétaux ou animaux.

Chacune de ces définitions fournit des éléments pertinents. En guise de synthèse, dans ce paragraphe le sol désignera la couche de matériau plus ou moins meuble, issue de l'altération de la roche-mère au cours du temps, constituant la partie supérieure de la croûte terrestre, matériau hétérogène composé d'éléments vivants et non vivants en interactions complexes. Un sol a une épaisseur de l'ordre de quelques décimètres à quelques mètres, négligeable devant celle de la lithosphère (≈ 100 km).

Plus précisément, le sol est décrit comme une superposition et une juxtaposition d'horizons. Un horizon est une « couche » de sol, c'est-à-dire un volume considéré comme homogène dont les dimensions horizontales sont de l'ordre d'une dizaine de mètres jusqu'au kilomètre, et dont la dimension verticale est de l'ordre du centimètre jusqu'au mètre (Girard et al, 2005). Les horizons sont généralement visibles à l'œil nu sur des coupes transversales de sol, leurs caractéristiques physico-chimiques, morphologiques et biologiques peuvent varier fortement entre deux horizons voisins.

I.2.Composition du sol

À titre indicatif, étant donné l'extrême diversité des terrains, un sol contient en moyenne 25 % d'air, 25 % d'eau, 45 % de composés minéraux et 5 % de composés organiques (Bliefert et Perraud, 2001).

I.2.1. L'air provient de l'atmosphère et augmente la capacité d'oxydation du sol, ce qui favorise notamment l'insolubilisation des éléments traces (Baize, 1997) et qui limite donc leur biodisponibilité.

I.2.2. L'eau est le constituant majeur de la solution du sol, vecteur d'éléments dissous, de complexes, de particules, et de colloïdes qui alimente les plantes et les êtres vivants du sol. Les différents types de sols ont une teneur en eau variable, elle est plus importante pour les sols argileux que pour les sols sableux par exemple — qui influence tous les paramètres physico-chimiques et biologiques du sol.

I.2.3. Les composés minéraux sont de nature très diverse ; on peut les classer en fonction de leur granulométrie, c'est-à-dire de la taille des particules (Tableau I.1).

Tableau I.1: Nature des composés du sol en fonction de leur granulométrie (Bliefert et Perraud, 2001)

| Composés | Granulométrie |
|----------|---------------------|
| Argile | 0,2-2 μm |
| Limon | 2-600 μm |
| Sable | 0,6-2 mm |
| Gravier | 2-60 mm |

Parmi eux, les argiles sont des aluminosilicates disposés en couches (phyllo-silicates) qui jouent un rôle clef vis-à-vis des plantes de par leur capacité à stocker les éléments nutritifs entre leurs couches. Ces éléments sont principalement les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^{+} , et sont ainsi phytodisponibles.

I.2.4. Les composés organiques sont les substances humiques provenant de la décomposition de débris d'animaux et de végétaux. C'est la source d'azote naturelle la plus importante pour les plantes. Les composés organiques sont biodégradés ou minéralisés au fil du temps par les micro-organismes ; leur temps de résidence dans le sol est de l'ordre de 15 ans.

Enfin, le sol contient de très nombreux micro-organismes et animaux de toutes tailles qui interagissent fortement avec les autres constituants du sol: bactéries (200000 milliards par m³), champignons, unicellulaires, vers, algues, mites, araignées, escargots...

I.3. Pollution des sols

I.3.1. Qu'est-ce qu'un sol pollué ?

Un sol pollué est un sol qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pour les personnes ou l'environnement. Ces situations sont souvent dues à d'anciennes pratiques sommaires d'élimination des déchets, mais aussi des fuites ou épandages de produits chimiques accidentels ou pas. Il existe également autour de certains sites des contaminations dues à des retombées de rejets atmosphériques accumulés au cours des années voire des décennies. La pollution des sols présente un caractère concentré, à savoir des teneurs souvent élevées et sur une surface réduite. Elle se différencie des pollutions diffuses, comme celle dues à certaines pratiques agricoles ou aux retombées de la pollution automobile près des grands axes routiers (Le Corfec, 2011).

I.3.2. La pollution du sol par les éléments traces

Les éléments traces (abrev. = ET) sont les 80 éléments chimiques, constituants de la croûte terrestre, dont la concentration est pour chacun d'entre eux inférieure à 0,1 %. Ils ne représentent à eux tous que 0,6 % du total, alors que les 12 éléments majeurs (O ; Si ; Al ; Fe ; Ca ; Na ; K ; Mg ; Ti ; H ; P ; Mn) représentent 99,4 % (Baize, 1997).

Dans les écosystèmes terrestres, les ETM (métaux et métalloïdes) peuvent être classés en 3 catégories en fonction de leurs effets et de leurs réactions avec les composantes organiques et minérales du sol :

- i. Les éléments « essentiels » qui possèdent un rôle primordial pour le développement des végétaux et pour une bonne reproduction des organismes vivants. Ce sont des éléments comme le Zn, Cu, B... etc
- ii. Les éléments « non essentiels » qui sont toxiques à certaines concentrations et peuvent induire des déficiences en éléments essentiels, au travers de la compétition pour les sites actifs des molécules importantes dans la physiologie des organismes. Ce sont les Cd, Hg, Sn ... etc

iii. Les éléments « indifférents » qui ont un effet ni bénéfique ni indésirable.

La majorité des éléments traces métalliques présents dans les sols appartient à la famille chimique des métaux et métalloïdes et sont considérés comme toxiques pour l'homme et l'environnement, mais seulement une partie d'entre eux présente un intérêt écologique, biologique ou économique (Qasim, 2015).

En général, dans l'industrie, on considère comme métal lourd tout métal de densité supérieure à 5 g/cm^3 , de numéro atomique élevé et présentant un danger pour l'environnement et/ou pour l'homme (Anfossi et al, 1997). Le terme "métaux lourds" est aussi souvent appliqué indistinctement à des éléments ne répondant pas à l'ensemble de ces critères, en dépit de leur définition (Qasim, 2015).

Dans les sciences environnementales, les métaux lourds associés aux notions de pollution et de toxicité sont généralement : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), l'étain (Sn), et le zinc (Zn) (Baize, 1997).

Les ETM sont présents dans les sols sous différents états, dans les phases solide et liquide. La quantité existante dans la solution du sol représente normalement un infime pourcentage de la concentration totale. Les métaux se concentrent donc dans la phase solide du sol où ils se répartissent dans les différentes fractions organiques et minérales (Qasim, 2015).

Pendant plusieurs siècles, les teneurs en métaux dans le milieu naturel ont peu varié mais avec le développement industriel, les activités humaines sont devenues une nouvelle source d'émission de métaux; ainsi, les concentrations dans l'air (Nriagu, 1989), dans l'eau (Stumm et Morgan, 1996) et dans les sols (Kabata-Pendias et Pendias, 1992) représentent un important et dangereux risque de contamination de l'environnement.

I.3.3. Propriétés de certains éléments traces (Larrose, 2011)

Arsenic (As)

L'Arsenic est l'élément de numéro atomique 33. De couleur gris métallique, il possède 2 états d'oxydation (III et V). Il présente des propriétés intermédiaires entre celles des métaux et des non-métaux, il fait partie des métalloïdes. Il a été utilisé en agriculture en tant que pesticide (arséniate de plomb) ou pour les traitements antifongiques du bois en association avec Cr et

Cu. C'est un élément non essentiel et un poison puissant dont la toxicité varie avec sa nature chimique et son état d'oxydation.

Cadmium (Cd)

Le Cadmium est l'élément de numéro atomique 48. Il se présente sous la forme d'un métal blanc argent très malléable et ductile. On le retrouve à l'état d'impureté dans tous les minerais de Zn, de Pb et de Cu ainsi que dans les phosphates naturels. C'est un élément non-essentiel qui présente une toxicité élevée. Dans le milieu naturel, il présente une mobilité importante ce qui augmente sa disponibilité et de fait sa toxicité. Ainsi, à l'interface eau douce-eau salée, le Cd est soumis à des phénomènes de désorption entraînant une augmentation des concentrations en Cd dissous dans la colonne d'eau.

Chrome (Cr)

Le Chrome est l'élément de numéro atomique 24. C'est un métal dur, blanc grisâtre, possédant 3 degrés principaux d'oxydation (II, III, VI) qui conditionnent sa toxicité : Cr (III) est plus stable et moins toxique que Cr (VI). Seuls les oxydes de manganèse et l'oxygène dissous peuvent transformer Cr(III) en Cr (VI). C'est un élément essentiel pour l'homme (maintien du métabolisme du glucose). Le Chrome est utilisé dans la fabrication de l'acier et d'alliages inoxydables ainsi que dans les traitements du cuir et du bois. Sa disponibilité augmente pour des pH neutres à basiques, ce qui lui confère une mobilité spécifique par rapport à la majorité des ETM.

Cuivre (Cu)

Le Cuivre est l'élément de numéro atomique 29. Il est retrouvé sous forme de minerai à l'état natif ou associé à du soufre. Il est utilisé pour ses propriétés conductibles (câbles électriques, tuyaux) et en alliage lors de la fabrication de bronze (Cu-Sn) et de laiton (Cu-Zn). Dans le milieu naturel, Cu est retrouvé sous la forme d'ions libres Cu^+ et Cu^{2+} , de complexes hydratés, de sels inorganiques et de complexes organiques. Il est largement utilisé en agriculture pour ses propriétés antifongiques. Le Cuivre est un oligo-élément essentiel qui entre dans le cycle de formation de l'hémoglobine et qui intervient dans la fonction immunitaire.

Mercure (Hg)

Le Mercure est l'élément de numéro atomique 80. C'est le seul métal à l'état liquide dans les conditions normales de température et de pression. On le retrouve sous forme de minerai de

sulfure de Mercure (HgS, cinabre). Sensible aux variations de température et de pression, il a été très utilisé dans la fabrication d'instruments de mesure (baromètres, thermomètres, débitmètres). Sa capacité à former des alliages avec les autres métaux (or, argent...) a conduit à son utilisation massive pour l'orpaillage. C'est un élément non essentiel très toxique à partir de faibles concentrations (quelques pg/l).

Nickel (Ni)

Le Nickel est l'élément de numéro atomique 28. C'est un métal de couleur généralement grise, retrouvé sous forme d'Arséniure de Nickel (NiAs) ou combiné au soufre (NiS). Il est utilisé dans l'industrie pour sa résistance à la corrosion et à l'oxydation. C'est un oligoélément essentiel qui peut cependant présenter une toxicité envers les espèces végétales (chloroses ferriques) et envers l'homme.

Plomb (Pb)

Le Plomb est l'élément de numéro atomique 82. C'est un métal gris bleuâtre, dense et malléable. Largement utilisé par l'homme pour ses propriétés de lubrificateur et d'antidétonant dans les carburants, le Plomb est considéré comme un polluant à l'échelle du globe. Dans les écosystèmes, il est considéré comme un élément non mobile et est majoritairement retrouvé associé aux particules. C'est un élément non-essentiel toxique.

Vanadium (V)

Le Vanadium est l'élément atomique de numéro 23. C'est un métal blanc, mou et ductile. Il présente 4 états d'oxydation (II, III, IV, V). Il est principalement rejeté dans l'environnement via la combustion d'énergies fossiles et il est essentiellement utilisé en alliage dans les métaux ferreux et non-ferreux. La majorité du Vanadium produit est employé en tant que ferro-vanadium ou comme additif de l'acier (Bur, 2008).

Zinc (Zn)

Le Zinc est l'élément de numéro atomique 30. C'est un métal moyennement réactif, qui se combine avec l'oxygène de l'air pour former une couche d'oxyde blanc imperméable. Il est principalement extrait sous forme de sulfure (ZnS). Il est très utilisé dans l'industrie pour la galvanisation de l'acier et la fabrication d'alliages (laiton, Cu-Zn). On le retrouve également dans de nombreux cosmétiques ainsi que dans les batteries, les pigments et les peintures.

C'est un oligoélément essentiel présent dans certaines enzymes et qui participe au fonctionnement des échanges gazeux.

I.3.4. Origines des éléments traces métalliques dans le sol

Dans les sols, les ETMs sont d'origine naturelle en raison de leur présence dans les roches-mères, d'apports et d'enrichissement associés aux phénomènes d'érosion, d'altération, d'éruption et retombées volcaniques. Mais ils ont aussi été extraits de gisements ou déplacés d'un sol à l'autre par des actions anthropiques et proviennent alors d'activités agricoles, industrielles, domestiques (Collectif, 1998).

I.3.4.1. Origine naturelle

Sources naturelles de contamination : En dehors de toute intervention de l'homme, les sols ont une concentration naturelle en métaux provenant de l'altération de la roche-mère. L'effritement de celle-ci et l'érosion conduisent à la formation des sols. Ces processus géochimiques associés à d'autres phénomènes, en particulier biologiques, sont désignés sous le terme de différenciation des sols. Elle s'effectue sur une échelle de temps de l'ordre de plusieurs milliers d'années et est la source principale de contamination naturelle du sol en métaux. Ainsi, une roche-mère riche en arsenic, par exemple, donnera un sol riche en arsenic, bien que cette corrélation soit plus marquée pour certains métaux (Cr, V, Zn) que pour d'autres (Co, Mo, Pb, Se) dont l'abondance dans le sol peut être plus fortement liée au cycle biogéochimique (Pansu et Gautheyrou, 2003).

Dans certains cas les sols ainsi formés peuvent donc être fortement concentrés en métaux, au point que cette contamination naturelle soit problématique sur le plan écologique. D'autres sources de contamination naturelle des sols par les métaux sont identifiables, mais leur contribution est relativement faible comparée à l'apport d'origine géologique (Baize, 1997 ; Nriagu, 1989). Citons :

- Le cycle biogéochimique entre les sols et les plantes. Celles-ci absorbent des métaux dans le sol ou bien par voie atmosphérique, puis les redéposent à la surface (feuilles mortes, décomposition des végétaux...).
- Processus d'accumulation, dans un horizon du sol, des métaux provenant d'un autre horizon (illuviation).
- Apport par lessivage du sol et érosion en surface.

- Apports lointains d'origine atmosphérique : volcans (émissions d'As, Hg, Ni, Zn), feux de forêt (émission de Zn), embruns marins (émissions de Hg, Na), poussières et aérosols transportés par les vents.

I.3.4.2. Origine anthropique

La pollution des sols due à l'activité humaine intervient sur une échelle de temps beaucoup plus courte, de l'ordre de la décennie, voire moins. On distingue deux types de contamination (Bliefert et Perraud, 2001) :

- a. Les contaminations diffuses :** mettant en jeu un faible nombre de polluants aux concentrations peu variables provenant de sources non stationnaires ou de grande étendue, ou bien d'un grand nombre de sources. Dans ce cas, la pollution se fait par voie atmosphérique sous forme de poussière et d'aérosols issus de l'activité industrielle, des chauffages domestiques, des automobiles, etc., se déposant sur les sols, sur les végétaux et sur les eaux de surface sous forme de précipitations sèches (transport par les vents, sédimentation) ou humides (pluie, neige, grêle), ou par interception de particules en suspension (brouillards). On parlera alors de sol pollué.
- b. Les contaminations ponctuelles :** peuvent faire intervenir un grand nombre de polluants fortement concentrés, sur des zones localisées. C'est typiquement le cas d'une usine ou d'une mine, dans ce cas on préférera parler de site pollué ; mais il peut s'agir également d'apports agricoles bien délimités : engrais (notamment phosphatés, riches en cadmium), boues de station d'épuration (contenant la plupart des métaux toxiques), traitements phytosanitaires (pesticides et autres), etc.

Il faut souligner que dans les deux cas, nous avons essentiellement affaire à des pollutions par voie aérienne. Les métaux sont transportés par les particules (liquides ou solides) constituant les aérosols.

Les particules inférieures au micron peuvent être transportées sur de très longues distances (jusqu'à plusieurs milliers de km) alors que les particules plus grosses (10-100 μm) contaminent plutôt les zones proches de la source d'émission (Gombert et al. 2005).

- c. Les principales sources anthropiques de pollution des sols :** par les métaux lourds les plus fréquents sont résumés dans le Tableau 2 et dans la Figure 1. Elles sont en premier lieu liées aux activités de transformation primaire des métaux, c'est-à-dire aux industries d'extraction (mines) et aux industries métallurgiques.

- **La transformation d'énergie** : par combustion de carburants fossiles ainsi que le raffinage du pétrole sont des sources importantes de pollution par les métaux en raison de la présence de traces dans les combustibles. Même si les éléments considérés y sont présents en très faible concentration, la quantité de matériau consommé (dans le cas d'une centrale électrique à charbon par exemple) implique une émission de métaux non négligeable (Sirven, 2006).
- **L'incinération** : De même, la plupart des métaux lourds sont envoyés dans l'atmosphère par les **incinérateurs** de déchets à très haute température.
- **L'industrie** : Certains métaux sont spécifiquement utilisés dans des industries particulières, comme le cadmium pour les piles (accumulateurs Ni-Cd), l'arsenic pour la conservation du bois (Martin et al, 2005) ou le plomb pour les munitions.
- **Les transports** : On observe, sur les routes, des dépôts de métaux agglutinés avec les huiles de carter (usure des moteurs) ainsi que des dépôts provenant de l'usure des pneus ; On peut observer une contamination en Pb et Cd sur une bande de 10 à 20 m le long de l'axe routier (Kozlowskir et al, 2003). Les eaux de ruissellement des chaussées urbaines et autres peuvent être assez chargées en polluants. En milieu urbain, les eaux de pluie peuvent également emporter les métaux des toitures (Pb, Zn, Cu).
- **Source agricole** : Enfin, il faut signaler la part importante de la contamination d'origine agricole (les pesticides, les fertilisants ...), qui se différencie des pollutions précédemment décrites par le fait qu'elle a pour finalité d'ensemencer directement les sols en substances diverses, dont le but est de fertiliser le sol (engrais, boues) ou de se débarrasser des êtres vivants nuisibles aux cultures (pesticides, herbicides, etc.).

Ces épandages variés ont cependant pour conséquence néfaste la contamination directe et quasi-immédiate des sols en métaux lourds. Cette pollution est d'autant plus grave que les métaux peuvent très vite passer des sols vers les nappes phréatiques par lessivage, et contaminer ainsi l'eau potable (Sirven, 2006).

La figure I. 1 illustre les différentes sources de transfert des ETM dans l'environnement.

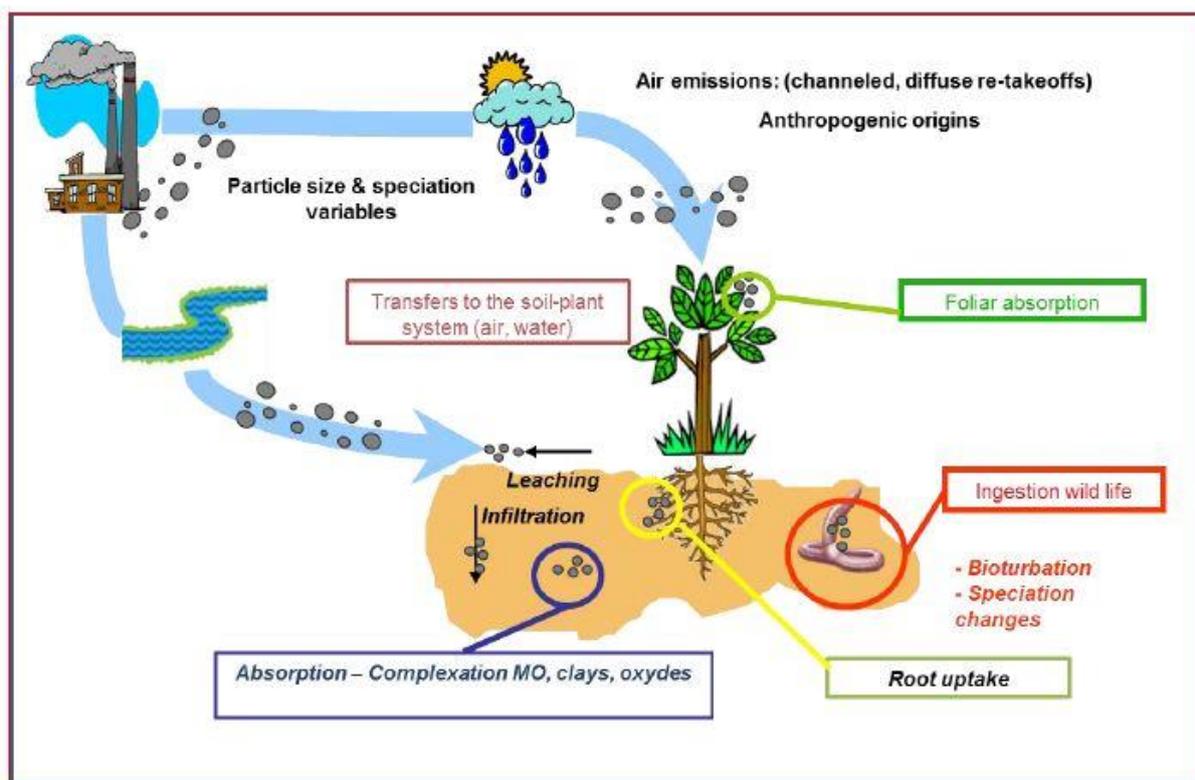


Figure I.1: Sources, transferts, impacts et risques des éléments traces sur l'environnement (Qassim, 2015)

Le tableau I.2 regroupe les Principales sources naturelles et anthropiques en éléments traces (Pacyna et Pacyna, 2001 ; Rausch de Traubenberg et al., 2013)

Tableau I.2: Principales sources naturelles et anthropiques en éléments traces

| Eléments | Sources naturelles | Sources anthropiques |
|-----------|---|---|
| Al | aérosols terrigènes | transport, énergie (charbon), sidérurgie, emballage |
| As | activités volcaniques, aérosols terrigènes, végétation | énergie, déchets, industrie (verre et métaux), transport, agriculture |
| Cd | activités volcaniques, aérosols terrigènes, végétation | métallurgie, énergie, déchets, transport, agriculture |
| Co | aérosols terrigènes. | énergie (charbon), métallurgie, transport, déchets (batteries) |
| Cr | activités volcaniques, aérosols terrigènes | sidérurgie, industrie (verre, ciment et papier), transport, agriculture, énergie, déchets |
| Cs | aérosols terrigènes | métallurgie, nucléaire (essais et accidents) |
| Cu | aérosols terrigènes, aérosols marins, activités volcaniques, végétation | transport, industrie, métallurgie, énergie, déchets, agriculture |

| | | |
|-----------|--|--|
| Fe | aérosols terrigènes, aérosols marins | sidérurgie, extraction, énergie (charbon) |
| Mn | aérosols terrigènes, végétation | métallurgie, énergie (charbon) |
| Ni | activités volcaniques, aérosols terrigènes, aérosols marins, végétation | énergie (pétrole), sidérurgie, agriculture, déchets, transport, extraction |
| Pb | aérosols terrigènes, aérosols marins, activités volcaniques, feux de forêt | industrie, énergie (transformation), transport, métallurgie, déchets |
| Sb | activités volcaniques, aérosols marins, végétation | énergie (charbon), industrie (métaux non ferreux), déchets (incinération et épuration) |
| Sn | aérosols terrigènes, biométhylation de composés inorganiques | énergie (pétrole, fioul et charbon), déchets |
| Sr | aérosols terrigènes | énergie (pétrole et charbon), déchets, nucléaire (essais et accidents) |
| Ti | aérosols terrigènes | Métallurgie |
| V | activité volcanique, aérosols terrigènes, aérosols marins | énergie (transformation et pétrole), transport, déchets, extraction (Cu et Zn) |
| Zn | aérosols terrigènes, activités volcaniques, aérosols marins, végétation | industrie, métallurgie, énergie (charbon), déchets, transport, agriculture |

I.3.5. Spécificité de la pollution par les métaux

Comparés aux polluants organiques, comme les hydrocarbures par exemple, les métaux lourds ont l'inconvénient majeur de n'être pas dégradables par des processus chimiques ou biologiques dans le sol, on parle de persistance des métaux. Ils ne sont susceptibles que de changer de forme chimique — dont la répartition dans le sol est désignée sous le nom de spéciation, et de passer d'un compartiment du sol à un autre au gré de ces transformations. S'ils ne sont pas présents à l'état métallique, ils peuvent se fixer aux argiles ou aux matières organiques par liaison ionique, ou bien former des complexes en solution, ou des composés inorganiques, ou encore se fixer à la surface de particules par adsorption. De cette façon, ils s'accumulent dans le sol, ou ils sont lessivés par les eaux de ruissellement vers des horizons plus profonds, éventuellement jusqu'aux nappes phréatiques. Pour décrire l'origine, le devenir et la toxicologie des métaux dans les sols, on a recours à trois notions (Baize, 2004) :

- **La mobilité** d'un élément caractérise son aptitude à passer d'un compartiment du sol où il est retenu avec une certaine énergie à un autre, où il est retenu avec une moindre énergie. (Juste 1988 ; McLaughlin et al, 2000). Plus une substance se déplace dans le

sol, plus elle sera susceptible d'être absorbée par un organisme vivant. Cette mobilité est dirigée par un certain nombre de facteurs et de conditions du milieu : le pH du sol, le potentiel d'oxydoréduction, la température et l'humidité du sol et l'apport de matière organique.

- **La biodisponibilité** qui est l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment quelconque du sol dans un être vivant, (bactérie, végétal, animal ou homme), le plus souvent via la solution du sol.
- **La solubilité** Ainsi, la dangerosité d'une substance va de pair avec sa mobilité ainsi qu'avec sa biodisponibilité, mais aussi avec sa **solubilité**, puisque les composés en solution sont très mobiles et pénètrent facilement dans les plantes par leurs racines : ils sont facilement bio-disponibles. En fonction de la mobilité de l'élément considéré, celui-ci va s'accumuler préférentiellement dans tel ou tel horizon du sol et avoir un effet différent sur les plantes, qui puisent leurs ressources à travers leurs racines bien au-delà de l'horizon de surface, et sur les organismes du sol.

Certains éléments, comme le cadmium, le thallium ou le zinc, sont réputés très mobiles alors que d'autres, tels que le plomb, le mercure ou le chrome, le sont beaucoup moins. Le zinc et le thallium ont des ions très solubles, donc très mobiles et bio-disponibles. En particulier, l'ion Tl^+ a un comportement analogue à celui de l'ion K^+ qui lui permet de se substituer facilement à ce dernier et d'être absorbé par les plantes.

D'autre part, la mobilité des métaux dépend également de leur origine, naturelle ou anthropique. Le cadmium naturel est souvent immobilisé sous des formes relativement inertes, ce qui est a priori moins le cas du cadmium anthropique, et qui aggrave donc les risques liés à une pollution industrielle. Ou réciproquement, la donnée de la mobilité d'un élément peut permettre de déterminer si une contamination est d'origine naturelle ou anthropique. Par exemple, le fait de trouver du plomb, réputé très peu mobile (de l'ordre de 100 fois moins que le cadmium) car très fortement lié aux matières organiques, en grande quantité dans les horizons de surface peut être un signe d'une pollution d'origine atmosphérique. Enfin, la forme chimique joue également un rôle essentiel : ainsi le chrome III, très peu mobile, comparé au chrome VI, très mobile (Baize, 1997).

Finalement, les trois paramètres (mobilité, biodisponibilité, solubilité) dépendent fortement de la spéciation de l'élément considéré. La détermination de la spéciation est donc cruciale pour caractériser le comportement et les effets des métaux traces dans les sols. Deux formes chimiques différentes d'un même élément peuvent avoir des toxicités très différentes, par conséquent la donnée de la teneur totale d'un élément dans un sol n'est qu'un moindre avantage en termes d'évaluation de la dangerosité d'un site : elle ne donne qu'une indication globale du degré de pollution, mais ne permet pas de connaître avec précision le risque toxique lié à l'élément — les mesures de teneurs totales sont néanmoins beaucoup plus simples que les mesures de spéciation. Au point que dans certains cas de décontamination de sites pollués, on se contente de changer la spéciation de la substance à risque, à défaut de pouvoir éliminer celle-ci complètement. Dans la référence (Nowak et al., 2003), on étudie également le potentiel de certains sites à changer naturellement la spéciation des polluants au cours du temps. Cette stratégie de remédiation intrinsèque est appelée l'atténuation naturelle.

Plus généralement, le degré de pollution des sols dépend de leur nature : les sols dits « légers » comme les sols sableux adsorbent peu les métaux, alors que les sols dits « lourds », contenant beaucoup d'argiles et de matières organiques, les retiennent beaucoup plus. De plus, les oxydes de manganèse et de fer (deux des 12 éléments majeurs) jouent le rôle de pièges pour les éléments traces métalliques, de la même façon que les argiles et les matières organiques. De même, un sol acide favorisera la mise en solution, donc la mobilité des métaux ; à l'inverse un pH élevé favorisera l'accumulation des métaux lourds sous forme d'hydroxydes ou de complexes (immobilisation).

I.3.6. Toxicité

Quand ils ne contaminent pas les eaux souterraines par lessivage, les éléments traces métalliques, non dégradables dans le sol, s'y accumulent puis pénètrent dans les plantes que les animaux consomment ensuite, l'homme y compris. On estime ainsi que les végétaux récoltés stockent environ 1 % des métaux présents dans l'horizon de surface (Baize, 1997). Pour l'homme, l'inhalation de poussières et d'aérosols reste la principale source d'intoxication, mais les risques liés à l'absorption de métaux lourds par ingestion d'eau ou de nourriture ne sont toutefois pas négligeables. Des exemples historiques montrent qu'une contamination accidentelle massive par ingestion peut avoir des conséquences dramatiques à l'échelle de toute une population. C'est ce qui s'est produit lors de la catastrophe tristement célèbre de la baie de Minamata, au Japon, dans les années 50 (Miquel, 2001) : une usine de

produits chimiques déversait dans la mer le mercure alors employé comme catalyseur. Les coquillages et les poissons, largement consommés par la population locale, furent fortement contaminés et des teneurs en mercure furent mesurées jusqu'à deux ordres de grandeur au-dessus des normes de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Près de 2000 personnes furent contaminées, et la pêche fut interdite pendant 40 ans dans la baie.

Il existe une troisième voie d'introduction des polluants dans l'organisme, la voie dermique, qui intervient en cas de contact direct avec les substances. Cependant, quel que soit le mode de contamination, les éléments s'accumulent dans l'organisme : sang, foie, cerveau, reins..., et ne sont éliminés que très lentement. Le tableau 3 montre, par ordre croissant, la demi-vie biologique des métaux (Bliefert et Perraud, 2001), au bout de laquelle l'organisme a éliminé la moitié de la quantité absorbée. Celle-ci s'étale de quelques jours pour le molybdène à plusieurs années pour le chrome, le zinc ou le cadmium. On note que certains éléments (plomb, mercure, cadmium) ont des demi-vies biologiques très différentes selon leur cible dans l'organisme

Le tableau I.3 regroupe les temps de demi-vie biologique de quelques éléments (Bliefert et Perraud, 2001 ; Ineris, 2005).

Tableau I.3 : Temps de demi-vie biologique de quelques éléments

| Élément | Temps de demi-vie biologique |
|----------------|--|
| Mo | 5 jours |
| Cu | 13-33 jours |
| Mn | 15-20 jours |
| Pb | 20-30 jours dans le sang 40-60 jours dans les reins, la moelle, le foie, le cerveau (2-10 ans dans les os) |
| Hg | 30-60 jours (1 an dans le cerveau) |
| Cr | 1-2 ans |
| Co | 2-15 ans |
| Cd | 30 jours dans le sang 20-30 ans dans le rein |
| Zn | 2-3 ans |

Le tableau I.4 regroupe les effets de certains métaux lourds sur la santé (Galsomies, 1999).

Tableau I.4 : Effets de certains métaux lourds sur la santé

| Métaux | Effet sur la santé |
|---------------|---|
| As | Cancérogène et atteinte de différents organes (foie, système nerveux, peau...) ; Pas d'organes cibles pour les expositions de longues durées. |
| Cd | Potentiel toxique élevé ; Dommages rénaux pour des expositions chroniques à faible dose ; Oxydes, chlorures, sulfates et le cadmium sont classés cancérogènes |
| Cr | Chromates endommagent le système respiratoire pour des expositions à long terme ; Trouble dermatologiques, anémie ; Composés avec du chrome VI responsable d'eczéma ; Cr VI cancérogène (groupe A1: cancer prouvé chez l'homme) |
| Cu | Effet irritant par inhalation, allergie par contact ; Lésion du foie par voie orale sur période longue |
| Hg | Tous les composés du mercure sont toxiques à de faibles doses ; Cerveau et rein touchés ; Intoxication chronique responsable de dommages irréversibles sur le système nerveux central et périphérique ; Sous la forme organique peut perturber le développement du fœtus |
| Ni | Allergie par contact avec la peau et par présence dans la nourriture pour personne sensible ; Composés du nickel sont cancérogènes (groupe A1) pour le nez, poumon |
| Pb | Entraîne l'anémie forte dose ; Perturbe le système nerveux et les reins ; Effet mutagène de l'acétate et du phosphate de plomb (expérience animale) |
| V | Effet irritatif à forte dose pour les yeux, le nez, les bronches |
| Zn | Pas d'effet cancérogène du zinc par voie orale ou par inhalation ; Mais, le chromate de zinc est cancérogène |

I.3.7. Dépollution des sols

Le but de la dépollution des sols est de restituer les sites dans un état aussi proche que possible de l'état antérieur à la pollution.

En outre, la ou les techniques de traitement des sols ne doivent pas être plus polluantes que le résultat de la dépollution. C'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de transfert de pollution. Ainsi il est convenu d'une liste des critères auxquels doivent répondre les techniques de dépollution :

- Enlever ou neutraliser les matières incriminées.

- Peser aussi peu que possible sur les ressources mises en œuvre (eau, air, énergie, capital...).
- Ne pas provoquer d'émissions secondaires (eau et air du processus) contenant des polluants.
- Obtenir un taux important de recyclage du matériau traité, minimiser la quantité et le danger potentiel des matières résiduelles.
- Ne pas produire de nouvelles substances toxiques par l'enlèvement ou le transfert de celles déjà existantes (Louniçi, 2016).

Le tableau suivant résume les principales méthodes de dépollution des sols par les métaux lourds (Tableau I. 5) (Fornarini et al, 2005), (Christopher et al, 2003).

Tableau I.5 : Méthodes de dépollution des sols par les métaux lourds

| Méthodes | Description |
|-----------|--|
| Physique | <ul style="list-style-type: none"> • Excavation + traitement (le traitement dépend de l'élément) • Excavation + enfouissement • Lavage physique: consiste à éliminer la phase de taille et/ou de densité dans laquelle sont concentrés les métaux lourds (phase de concentration, en général la fraction la plus fine 11), par diverses techniques (tamisage, filtration...) + traitement éventuel. • Mise en tombeau ou confinement par encapsulation : enfermement du matériel pollué dans un dispositif de parois, couverture et/ou fond étanches. • Stabilisation par injection de ciment (ou matériau analogue) + eau pour piéger le polluant dans un milieu non lessivable et stable dans le temps. • Inertage par mélange à de la chaux ou à de la cendrée. • Mobilisation et extraction : injection in situ d'une solution de lessivage (acide pour les métaux lourds, HCl, HNO₃ ou H₂SO₄) + pompage et recyclage de la solution, ou traitement sur site après excavation éventuellement combinée à une séparation granulométrique. |
| Chimique | <ul style="list-style-type: none"> • Réaction de réduction visant à changer la spéciation (Cr VI → Cr III notamment, par exemple par mise en place dans une nappe phréatique d'une barrière perméable contenant de la grenaille de fer en solution acide. Le fer est oxydé en Fe²⁺ par l'acide, puis réduit les ions Cr⁶⁺ en donnant Cr³⁺ et Fe³⁺). Également utilisée pour faire précipiter les métaux et limiter ainsi leur mobilité. |
| Thermique | <ul style="list-style-type: none"> • Incinération : utile pour les métaux volatilisables comme Cd, Pb ou Zn, récupérés avec les gaz puis recyclés. • Inertage par vitrification in situ en appliquant un courant intense dans le sol, avec récupération et traitement des gaz d'échappement |

- **Biolixiviation** par des bactéries spécifiques, résistantes aux métaux et oxydant le fer et les sulfures, ce qui libère les cations métalliques. Peut se faire dans un contenant (bioréacteur) après excavation.
Phytoremédiation : bien adaptée aux métaux lourds. Épuration du milieu par des végétaux supérieurs spécifiques qui concentrent les métaux soit dans les racines (rhizofiltration), soit dans les parties aériennes (phytoextraction), ou qui les piègent dans leur réseau racinaire (phytostabilisation). Les plantes stockent soit des métaux spécifiques, soit sont « multi-métaux ». Elles sont régulièrement arrachées puis replantées.
pour la phytoextraction
Lagunage : consiste à faire passer des effluents à travers des marécages dont la végétation (plantes, algues, bactéries...) immobilise les métaux, notamment par précipitation sous forme sulfurée (bactéries sulfo-réductrices).

I.3.8. Échantillonnage des sols

Du fait de l'hétérogénéité des sols à toutes les échelles — du microscopique à l'échelle du continent—, un choix s'impose quant à la résolution spatiale des mesures souhaitée. Ce choix est guidé par les objectifs du maître d'ouvrage ; par ordre d'exigence il s'agira en particulier de :

- vérifier l'état global du sol ;
- évaluer la variabilité statistique de la teneur en métaux lourds sur la zone.

Dans le premier cas, quelques prélèvements aléatoirement répartis suffiront pour acquérir une vue d'ensemble du site. Par exemple, la norme afnor NF X 31-100 sur l'échantillonnage des sols agricoles préconise un nombre minimum de prélèvements de 14 à 16. À l'inverse, dans le dernier cas un maillage serré du terrain sera mieux adapté, et le nombre d'échantillons pourra dépasser le millier pour des sites étendus.

Globalement le problème à résoudre est toujours celui du compromis entre le degré de précision désiré, le temps et le coût des mesures. Pour cela il faut définir un plan d'échantillonnage, c'est-à-dire le nombre de prélèvements, leur localisation et les techniques à utiliser. L'échantillonnage peut être :

- **Systématique** : on définit une maille d'une certaine dimension et d'une certaine géométrie et l'on effectue le prélèvement au centre ou à chaque nœud de la maille. La probabilité de détection d'une zone polluée, pour un intervalle de confiance donné, varie dans le même sens que le nombre de prélèvements et en sens inverse du rapport entre la surface de la zone polluée et la surface du site. Cette méthode est adaptée aux superficies élevées.

- **Aléatoire** : les coordonnées des points de prélèvements sont tirées au hasard. Ce mode d'échantillonnage est mieux adapté aux sols uniformément pollués et aux sites pour lesquels on dispose d'une information insuffisante.
- **Systématique aléatoire** : on définit un maillage puis dans chaque maille on tire aléatoirement la position du prélèvement.
- **Ciblé** : lorsqu'une zone polluée est déjà identifiée et que l'on veut la caractériser plus précisément.
- **Par profils** : les prélèvements sont effectués selon des directions privilégiées (coupes), par exemple les directions des vents dominants. Cela permet de visualiser l'extension d'une pollution.
- **Selon une grille circulaire** : lorsque l'on veut évaluer la contamination due à une source ponctuelle déjà localisée.
- **À neuf points** : on définit une étoile à huit branches du type rose des vents autour d'un point remarquable et on effectue les prélèvements selon une maille, au centre et dans ces huit directions. C'est une autre façon de se concentrer sur certains points particuliers.
- **À maille variable** : la dimension de la maille croît avec la distance à la source (connue) de pollution. Cette méthode permet de mesurer rapidement un gradient de concentration en un élément autour d'une zone localisée (Sirven, 2006).

Chapitre II : Techniques d'analyse

II.1. Généralités sur les techniques d'analyses

Il existe de très nombreuses méthodes d'analyse des métaux dans l'environnement mais au vu des faibles teneurs rencontrées dans les particules, seules les méthodes les plus sensibles sont mises en œuvre. De nos jours, les méthodes spectroscopiques et spectrométriques sont dominantes pour leur rapidité, leur capacité d'analyse multi-élémentaire et leur grande sensibilité. Les méthodes analytiques peuvent être distinguées selon qu'elles soient destructives (nécessitant la mise en solution des éléments à doser) ou non destructives (analyse directe du support de collecte) (Alleman and Mathe, 2008).

Ainsi les méthodes par fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF) ou de longueur d'onde (WD-XRF) ou à réflexion totale (T-XRF) sont particulièrement adaptées pour l'analyse de grands nombres d'échantillons particuliers car elles ne nécessitent pas de préparation préalable tout en offrant une sensibilité importante pour une large gamme d'éléments traces (une soixantaine). Les techniques PIXE (Proton Induced X-ray Emission) et INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis) présentent également des caractéristiques intéressantes (rapidité d'analyse, sensibilité importante, large gamme d'éléments) mais nécessitent la présence d'un accélérateur et d'un réacteur nucléaire pour la production de protons et de neutrons respectivement.

Pour les solutions de minéralisation, les méthodes spectroscopiques classiques, telles que la Spectroscopie d'Absorption Atomique, sont le plus souvent remplacées par l'ICP-AES (Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry) pour sa capacité d'analyse multi-élémentaire avec des limites de détection comparables dans la plupart des cas. Cependant, dans le cas d'éléments à l'état d'ultra-traces ou pour de très faibles quantités de matières (quelques μg de particules).

La technique de microsonde Raman apporte une dimension moléculaire à l'analyse individuelle de particules en déterminant les espèces chimiques qui les composent. Pour augmenter la résolution et atteindre la dimension nanométrique,

II.2. L'Analyse par Activation Neutronique Instrumentale (INAA)

II.2.1. Historique

En 1936, Hevesy à Copenhague irradie des minerais de terres rares par les neutrons à l'aide d'une source radium-béryllium ; après quelques essais infructueux, il obtient une radioactivité qu'il attribue à de nouveaux isotopes radioactifs identifiés par leur période de décroissance : c'est la découverte de l'analyse par activation neutronique (Meyer, 2003) deux ans après la découverte de la radioactivité artificielle par Frédéric et Irène JOLIOT-CURIE en 1934 (Chevalier et Tousset, 1984).

Depuis 1970, l'INAA est largement utilisée pour la détermination des éléments de traces. En résumé, on peut distinguer quatre périodes :

- [1938 -1948] : La période des études de base
- [1948 – 1959] : La période de développement avec en 1951 l'utilisation du réacteur et en 1953 l'étude des interactions gamma/matière
- [1959 – 1970] : La découverte du NaI[Tl] et du Ge[Li] en 1965
- [1970 – 1990] : L'élargissement des domaines d'applications de la technique

II.2.2. Définition

L'analyse par activation neutronique (INAA : Instrumental Neutron Activation Analysis) est une méthode d'analyse exclusivement élémentaire. Elle est basée sur l'idée que l'on peut doser les éléments par les rayonnements qu'émet une réaction nucléaire ou les radionucléides obtenus par une telle réaction. Elle permet d'identifier et de quantifier la plupart des éléments de nombre de masse supérieur à 8, en utilisant des réactions nucléaires (n,α) , (n, p) ou (n,γ) . (Zikovsky, 1995) définit l'analyse par activation comme une méthode analytique qui repose sur les transformations (spécifique, pour chaque élément) des noyaux atomiques et l'émission d'un rayonnement caractéristique.

II.2.3. Principe

La mise en œuvre d'INAA consiste à irradier l'échantillon à analyser dans un flux de particules appropriées, neutrons, particules chargées... et à identifier, ensuite, après irradiation, les isotopes radioactifs créés à partir des éléments à doser.

Par son principe même, la méthode est unique parmi les méthodes d'analyse : l'excitation concerne le noyau de l'atome et les mesures portent sur les isotopes radioactifs artificiels ainsi créés. Les mesures de radioactivité permettent d'identifier de façon très sélective chacun des atomes présents et d'en quantifier le nombre. Pour le dosage des traces, cette méthode est l'une des rares à atteindre couramment et de façon sûre, ses limites théoriques de détection.

Actuellement la méthode est surtout utilisée comme méthode d'analyse de traces et d'ultra-traces, soit en tant que telle, soit pour calibrer et vérifier les résultats obtenus par d'autres méthodes, en général plus accessibles et plus rapides mais qui n'ont pas toujours la fiabilité de l'analyse par activation (Delmas et al., 2009). Il faut aussi préciser que plus de 80 % des analyses faites par activation le sont après irradiation aux neutrons ; on parle alors d'**irradiation neutronique**. La méthode est souvent désignée sous le sigle NAA : neutron activation analysis (Revel, 1999).

II.2.4. But de l'irradiation et différents modes

Le but de l'irradiation est de créer des radio-isotopes qui pourront être identifiés avec certitude et quantifiés avec précision après irradiation. Aussi, ces radio-isotopes doivent avoir une probabilité non négligeable d'être produits à partir des éléments à doser et leur durée de vie devra être suffisamment longue pour permettre leur détection. Pour doser la totalité des éléments, il est nécessaire de faire appel à plusieurs modes d'irradiation. Dans la pratique, le choix sera fait en fonction des propriétés des radio-isotopes créés dans l'échantillon à partir du ou des éléments à doser et des autres éléments présents (Revel, 1999).

II.2.5. Sources de neutrons (Revel, 1999)

II.2.5.1. Les accélérateurs

Ce type d'équipement génère des neutrons à travers des réactions nucléaires, exemple :

- ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$; neutrons de 2,5 Mev, intensité de 10^8 à 10^{10} s^{-1} .
- ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$; neutrons de 14 Mev; intensité de 10^9 à 10^{11} s^{-1} .

Ces sources sont généralement utilisées dans le domaine industriel pour le dosage rapide et en série de certains éléments légers par exemple l'oxygène.

II.2.5.2. Les sources isotopiques

Ce sont des moyens d'irradiation autonome avec des flux avoisinant 10^8 à $10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour une source de (α,n) de $3.7 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$. Les principales sources sont :

- ^{252}Cf ($T=2,6$ ans)
- Mélange de radio-nuclides avec du béryllium
- $^{226}\text{Ra}(\text{Be})$, $^{239}\text{Pu}(\text{Be})$ -période $2,4 \cdot 10^4$ ans, $^{241}\text{Am}(\text{Be})$ - période 458 ans

II.2.5.3. Les réacteurs nucléaires

C'est la principale source de neutrons pour la plupart des laboratoires utilisant l'analyse par activation neutronique. L'intensité du flux est très élevée permettant l'analyse des traces et ultra-traces.

Les flux de neutrons peuvent atteindre 10^{15} n.cm⁻².s⁻¹. Elle est de l'ordre de 10^{13} n.cm⁻².s⁻¹ pour les réacteurs NUR et Essalem.

Dans les réacteurs nucléaires le flux n'est pas mono-énergétique. Il se présente comme un spectre énergétique de neutrons dans l'intervalle 0,025 ev à plusieurs Mev.

II.2.6. Les réactions nucléaires

Les réactions nucléaires sont des processus où les constituants de la matière (noyaux, nucléons...etc.) interagissent selon une réaction nucléaire forte ou faible. De grandes quantités d'énergies sont émises lors de ces réactions, beaucoup plus que celles émises par des réactions chimiques normales (Avino et al, 2007).

L'énergie minimale pour provoquer une réaction nucléaire est connue comme énergie de seuil.

La radioactivité résulte de désintégrations spontanées de noyaux atomiques instables. Ces noyaux sont dits radioactifs. Cette désintégration radioactive s'accompagne de l'émission de particules α , β^+ ou β^- ou désexcitation (γ) (Avino et al, 2007).

La réaction (n, γ), par exemple, est une réaction qui se produit fréquemment avec des neutrons lents, dits neutrons thermiques, dans un réacteur nucléaire comme dans le cas de l'analyse par activation neutronique gamma prompt (PGNAA). Cependant, dans le cas de l'analyse par activation neutronique (NAA), la capture de neutrons produit une série de réactions retardées qui résulte en l'émission de rayons (γ), identifiés par spectroscopie gamma (Verma, 2007).

De façon générale, le noyau formé de la réaction (n, γ) est instable, se désintégrant par la suite, selon une ou plusieurs étapes, pour former un noyau stable.

En traitant les réactions nucléaires, il est communément convenu que les émissions (γ) sont le résultat de la réaction (n, γ), mais ce n'est pas vrai. En effet, la réaction (n, γ) est utilisée pour

la production de radio-isotope où les émissions (γ) sont le produit de la désintégration β^+ ou β^- durant les transitions pour former un noyau stable (Verma, 2007).

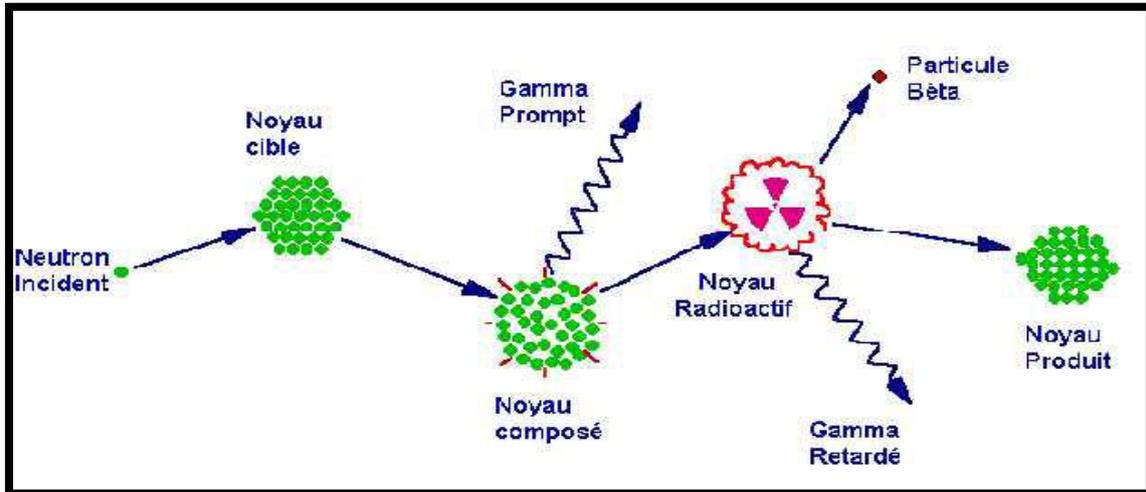
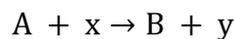


Figure II.1 : Diagramme illustrant le processus de la capture neutronique par un noyau cible suivi d'une émission de rayon gamma (Greenberg et al, 2011).

En effet, une désintégration radioactive s'accompagne souvent d'un rayonnement électromagnétique de fréquence élevée : un noyau père X, instable, se désintègre en un noyau fils excité Y^* qui retourne à son état fondamental Y par des émissions (γ). On parle de désexcitation (γ) : ${}_Z^A Y^* \rightarrow {}_Z^A Y + \gamma$

II.2.7. La radioactivité

Une réaction nucléaire peut être écrite comme une réaction chimique classique :



Avec :

- A : isotope de l'atome cible de l'élément à doser sur lequel la réaction nucléaire a lieu.
- B : radio-isotope produit par l'irradiation qui est souvent, mais pas toujours, un isotope de A.
- x : particule incidente.
- y : rayonnement émis pendant l'irradiation.

- **Équation de l'activité :**

Le nombre d'atome formé (d_B^F) par unité de temps (dt) est proportionnel au nombre d'atomes cible (N_0), à la probabilité de la réaction (σ_{AB}) et le débit de particules incidentes (Φ_{AB}) on obtient (Revel, 1999):

$$d_B^F = N_0 \sigma_{AB} \Phi_{AB} dt \quad (1)$$

d_B^F : Nombre d'atome formé.

N_0 : Nombre d'atome cible.

σ_{AB} : Section efficace (probabilité d'incidence en barns¹).

Φ_{AB} : Flux ou débit de particules incidentes (neutrons.cm⁻².s⁻¹).

dt: Intervalle de temps d'irradiation.

Le nombre d'atome détruit pendant le même temps (dt) :

$$d_B^D = N_B \lambda dt \quad (2)$$

d_B^D : Nombre d'atome de B détruit.

N_B : Nombre d'atome de B présent à l'instant «t».

λ : Constante de désintégration ($\lambda = \ln 2/T$).

T: Temps de décroissance radioactive.

Le nombre d'atome effectivement présents par unité de temps :

$$d_B^F - d_B^D = N_0 \Phi_{AB} \sigma_{AB} dt - N_B \lambda dt \quad (3)$$

Soit :

$$\frac{dN_B}{dt} + N_B \lambda = N_0 \Phi_{AB} \sigma_{AB} \quad (4)$$

Par l'intégration de cette relation, le nombre d'atome radioactif (N^*) à la fin de l'irradiation peut être obtenu :

$$N^* = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \sigma_{AB} \Phi_{AB} N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad (5)$$

N^* : Le nombre de noyau radioactif.

L'activité A, définit comme étant une désintégration par seconde s'écrit :

$$A = N^* \lambda \quad (6)$$

L'équation (5) devient :

$$A = \sigma_{AB} \Phi_{AB} N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad (7)$$

En remplaçant N_0 par la relation :

¹ 1 barns = 10⁻²⁴ cm²

$$N_0 = \frac{mN_A I}{M} \quad (8)$$

N_A : Nombre d'Avogadro ($N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ atomes/mole)

m : Le poids de l'élément recherché (grammes).

I : L'abondance isotopique de l'élément (en %).

M : La masse atomique de l'isotope irradié (grammes).

La relation (7) devient :

$$A = \left(\frac{1}{M}\right) m \sigma_{AB} \Phi_{AB} N_A I (1 - e^{-\lambda t}) \quad (9)$$

La sensibilité de la mesure dépend essentiellement de σ , Φ , λ et t . Pour augmenter la sensibilité le flux doit être élevé et le temps d'irradiation assez long. Dans le meilleur des cas, il est aussi préférable que σ et I soient grands.

Dans le cas où il s'est écoulé un temps t_d depuis la fin de l'irradiation l'équation de l'activité devient :

$$A = \left(\frac{1}{M}\right) m \sigma_{AB} \Phi_{AB} N_A I (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} \quad (10)$$

t_i : Le temps d'irradiation de l'échantillon (seconde).

t_d : Le temps de désactivation (seconde).

Pour le calcul de la teneur de l'élément recherché, deux méthodes sont utilisées :

- **La méthode absolue** (Leyni-barbaz, 2001) :

Elle consiste à établir une relation entre le taux de comptage et la masse de l'élément dans un échantillon.

Si σ_{AB} est exprimée en barns (1barns= 10^{-24} cm²) :

$$A = 0,6 \left(\frac{1}{M}\right) m \sigma_{AB} \Phi_{AB} I (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} \quad (11)$$

En pratique, cette méthode est peu utilisée à cause de l'imprécision de la connaissance de la fluctuation du flux Φ dans l'espace et dans le temps.

- **La méthode relative** (Leyni-barbaz, 2001) :

Cette méthode est utilisée lorsque l'échantillon et l'étalon sont irradiés en même temps. De ce fait, l'activité de l'étalon est :

$$A_R = 0,6 \left(\frac{1}{M} \right) m_R \sigma \Phi I (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_{dR}} \quad (12)$$

m_R Étant connue.

L'activité de l'échantillon est :

$$A_E = 0,6 \left(\frac{1}{M} \right) m_E \sigma \Phi I (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_{dE}} \quad (13)$$

Finalement, la masse de l'échantillon est :

$$m_E = (A_E m_R / A_R) e^{\lambda(t_{dE} - t_{dR})} \quad (14)$$

La relation entre le taux de comptage C et l'activité A :

$$A = \varepsilon C \quad (15)$$

ε : L'efficacité de comptage.

L'équation (13) devient :

$$m_E = (C_E m_R / C_R) e^{\lambda(t_{dE} - t_{dR})}$$

II.2.8. Avantages et inconvénients de la méthode d'INAA (Ousmoï, 1998)

Avantages :

- Les échantillons sont parfois très **précieux**, de faibles dimensions et souvent uniques ; Il est avantageux de pouvoir doser plusieurs éléments **simultanément** en une seule irradiation ou d'effectuer des analyses répétées sur la même prise d'essai;
- **La sélectivité** est un autre avantage de la méthode de INAA car la mesure est toujours effectuée sur un radioélément identifié d'une façon non ambiguë par l'énergie de ses raies gamma et par sa période ;
- La détermination de l'élément est **indépendante de sa forme chimique** car c'est le noyau qui a subi la modification par capture neutronique et non le cortège électronique ;
- **L'exactitude** est en général largement suffisante quand on compare les résultats des autres méthodes ;

- La technique d'analyse par activation neutronique instrumentale (INAA) est **non destructive**. En effet, l'échantillon analysé n'est ni contaminé par des produits chimiques ni détruit. Il peut être analysé plusieurs fois ;
- Parmi les autres avantages de la méthode, mentionnons sa **sensibilité élevée**, sa rapidité et le dosage des éléments traces. Mais parfois l'interprétation du spectre est difficile. Voir tableau comparatif en annexe 1

Inconvénients :

- La technique ne peut déterminer la valence des éléments dosés ;
- Bien qu'elle soit un avantage pour la méthode, la sensibilité peut devenir un inconvénient. Ceci est vrai lorsque l'élément présentant une haute sensibilité gêne l'analyse des éléments moins sensibles ;
- Disponibilité d'un réacteur nucléaire ;
- Cycle d'analyse long pour l'analyse des moyennes et longue période ;
- Manipulation de substances radioactives ;
- Certains éléments ne sont pas détectables soit parce qu'ils sont des émetteurs beta pur tel que P, soit en raison de leur période trop courte tel que celle du plomb, soit en raison de la faible probabilité de réaction de capture ($Z < 10$).

II.2.9. Application de l'INAA

Les applications d'INAA sont nombreuses et variées. Nous donnons dans ce qui suit les applications courantes.

- **Environnement :** L'analyse par activation est utilisée pour le dosage des poussières atmosphériques retenues par des filtres (Dams et Adams, 1970), sur les mousses ou les lichens. Pour l'analyse des filtres, elle est en compétition avec les méthodes de fluorescence X et de PIXE, mais l'INAA présente l'avantage d'avoir une sensibilité supérieure.
- **Domaine Nucléaire :** Dans ce domaine, les analyses suivantes sont effectuées de façon routinière :

- Analyse de la pureté du graphite utilisé comme modérateur dans les réacteurs (Pureté exigée : 99,999%).
- Analyse de la pureté de la capsule en aluminium utilisée pour activer les échantillons dont les éléments à doser possèdent une longue période (Pureté exigée 99,99%).
- Analyse du taux de cobalt dans l'acier. L'acier utilisé dans le réacteur doit contenir un très faible taux de cobalt.
- **Domaine biologique et médical :** Dans ces domaines, INAA a donné lieu à une multitude d'applications in vitro et quelquefois in vivo. De très nombreux éléments ont été ainsi dosés dans le sang, l'urine et la plupart des tissus. L'INAA est l'une des méthodes les plus sensibles pour les dosages de traces de certains d'entre eux, tel le sélénium et le vanadium.

Chapitre III : Matériel et méthodes

III.1. Zone d'Etude

On se propose dans ce travail d'étudier la pollution du sol par les ETM contenus prélevés sur un site de proximité, c'est-à-dire un site influencé par des sources émettrices de polluants du site choisi qui sont liées surtout au trafic routier mais aussi à la forte densité humaine. En effet, cette zone soumise à l'étude est caractérisée par une forte densité de population et un nombre de véhicules très important qui circulent en ville avec une architecture de rues souvent très étroites, accroissant davantage les risques de pollution par les émissions des gaz des pots d'échappements. Ceci en plus des autres sources concomitantes.

III.1.1 Situation géographique

Les zones de prélèvement ont été choisies de manière à obtenir un échantillonnage représentatif de la pollution du sol du site situé au niveau du Centre de Recherche Nucléaire localisé à la commune de Draria qui est une banlieue Sud-ouest d'Alger et chef-lieu de la Daïra du même nom. Elle est située à environ 10 Km du centre d'Alger.

- * La superficie de la commune est de 10,65 km².
- * Coordonnées géographiques : 36° 42' et 36° 58' Nord, 2° 59' et 2° 50' Est
- * Altitude par rapport à la mer : 220 m.

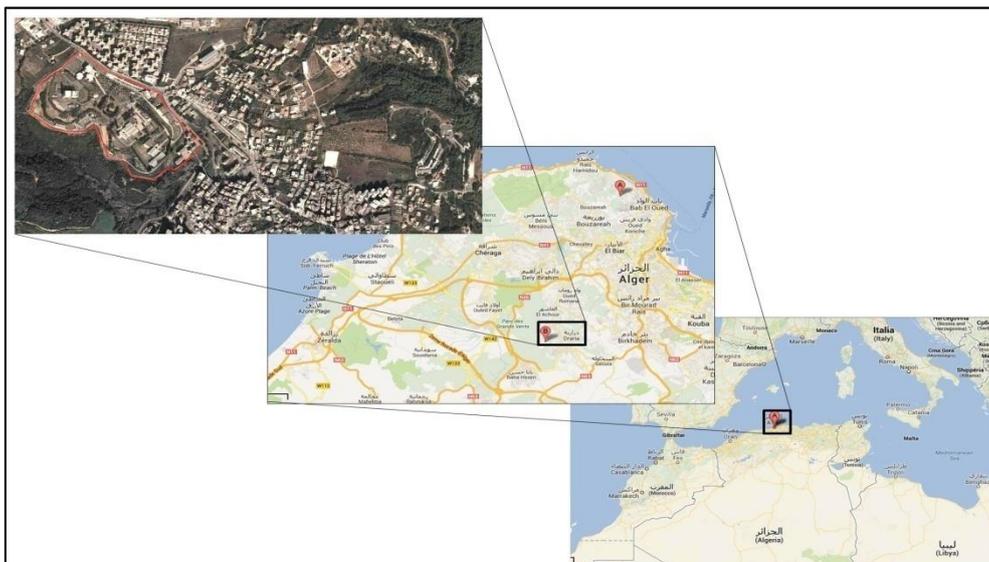


Figure III.1 : Carte d'Algérie illustrant le site de prélèvement (Googel Earth 2017)

Nous avons prélevé nos échantillons dans trois zones distinctes suivant un échantillonnage ciblé :

Zone 1 : à proximité d'un axe routier très fréquenté.

Zone 2 : à côté du réacteur nucléaire.

Zone 3 : près de l'institut d'études nucléaires.



Figure III.2 : zones de prélèvements

III.1.2. Présentation du centre de recherche nucléaire de Draria (CRND)

Le Centre de recherche nucléaire de Draria est une entité opérationnelle d'études et de recherche chargée de la réalisation des programmes de recherche dans les domaines de la valorisation des matériaux liés à la fabrication de combustible nucléaire, la physique, les techniques et le génie nucléaires ainsi que l'exploitation sûre du réacteur nucléaire de recherche NUR.

III.2. Matériel

III.2.1. Matériel et produits utilisés

- Gants en latex
- Spatule en Inox
- Aluminium de haute pureté nucléaire
- Tamis

- Mortier en Agar
- Pincettes en Inox
- Éthanol 99%
- Ciseaux en Inox
- Étuve
- Microbalance Analytique
- Dessiccateur
- Capsule en Aluminium
- Chaîne de spectrométrie gamma
- Réacteur NUR

III.2.2. Le réacteur NUR de Draria

Les différentes opérations d'irradiations, sont exécutées dans un des canaux du réacteur NUR de Draria.

Le réacteur nucléaire est un dispositif de contrôle des réactions en chaîne, il est de très loin la meilleure source de neutrons avec un flux allant jusqu'à 10^{14} n/cm².s. Un réacteur nucléaire peut produire un faisceau de neutrons très intense avec différentes types d'énergie (thermique, épithermique, rapide).

Le réacteur NUR est un réacteur de recherche ouvert de type piscine. Il est doté d'une grande flexibilité expérimentale et sa puissance nominale est d'un 01 Mégawatt. Le flux neutronique thermique de ce réacteur atteint une intensité de 10^{13} n / cm².sec. Le réacteur dispose de sites d'irradiation verticaux dans le cœur et dans la colonne thermique. Il dispose également de cinq canaux d'irradiation horizontaux.

Les autres principaux constituants du réacteur nucléaire NUR sont :

- Le cœur du réacteur.
- Le système de refroidissement.
- La protection biologique.
- Les canaux d'irradiation.

Le transfert des échantillons vers les sites d'irradiations s'effectue soit par voie manuelle pour les irradiations de longue durée, soit par voie pneumatique pour les irradiations de courte durée. La voie manuelle est utilisée pour les longues durées d'irradiation pour l'analyse des

radioéléments de longue période tel que le fer, le sélénium ou le cobalt. L'analyse des radioéléments de courte période (chlore, Manganèse, vanadium, etc.) nécessite l'utilisation de la voie pneumatique.

III.2.3. La chaîne de spectrométrie gamma

Dans sa structure de base, une chaîne de mesure (Figures III.3 et III.4) doit pouvoir assurer, au moyen des dispositifs appropriés, les fonctions suivantes :

- Extraction de l'information concernant chacune des grandeurs physiques à connaître et traduction en signale électrique au moyen de capteur et conditionneurs.
- Traitement analogique de signal destiné en particulier à en éviter la dégradation par le bruit et les parasites : amplificateur, filtrage.
- Conversion du signal sous forme numérique : adaptée au ordinateur chargé de l'exploiter, au moyen de l'échantillonneur-bloqueur et convertisseur analogique-numérique.
- La coordination des opérations précédentes est assurée par un ordinateur qui, en outre, peut être chargé de divers traitements sur les signaux numériques qu'il a acquis, les traitements sont destinés à faciliter leur exploitation (linéarisation) ou corriger des défauts de l'appareillage.

La chaîne de spectrométrie gamma utilisée au sein du centre de recherche nucléaire de Draïa se situe à proximité du dispositif de réception des capsules irradiées est composée de plusieurs modules électroniques :

- Source de refroidissement du cristal : l'azote liquide.
- Le détecteur : cristal de type HP Ge (Germanium de haute pureté).
- Le préamplificateur : placé à proximité du cristal, son rôle c'est de fournir une impulsion de tension qui peut être traité par l'amplificateur à partir des charges collectées sur les électrodes du détecteur.
- La haute tension : environ 2000V, son rôle c'est de polariser le SC afin d'obtenir une zone désertée importante dans le cristal HP Ge.
- L'amplificateur : améliore la précision de mesure en portant le signal au niveau requis par l'échelle d'entrée de l'élément final de la chaîne.

- Le convertisseur analogique digital (numérique) ADC : reçoit à son entrée une tension analogique V_i , et délivre à la sortie un signal numérique correspondant, selon un code binaire déterminé à la valeur numérique N associée à V_i .

- L'analyseur multi-canal MCA. : sélectionner les impulsions suivant leurs amplitudes.

Les détecteurs permettent de mesurer les rayons γ dans une gamme d'énergie de l'ordre de la centaine de KeV jusqu'à quelques MeV. Le pouvoir séparateur de ces détecteurs est de 1,5 à 1,8 keV pour une énergie de l'ordre du MeV.

Le détecteur est associé à un préamplificateur, un amplificateur et une haute tension. Le signal sortant de l'amplificateur est envoyé dans un codeur multicanaux.

Un micro-ordinateur pilote à la fois la mesure et le traitement du signal. Un passeur automatique d'échantillons, mécanique ou pneumatique, permet d'utiliser au mieux ce matériel et d'analyser simultanément de nombreux échantillons. Le traitement du signal comprend la recherche et l'identification des différents pics, leur sommation bruit de fond déduit.

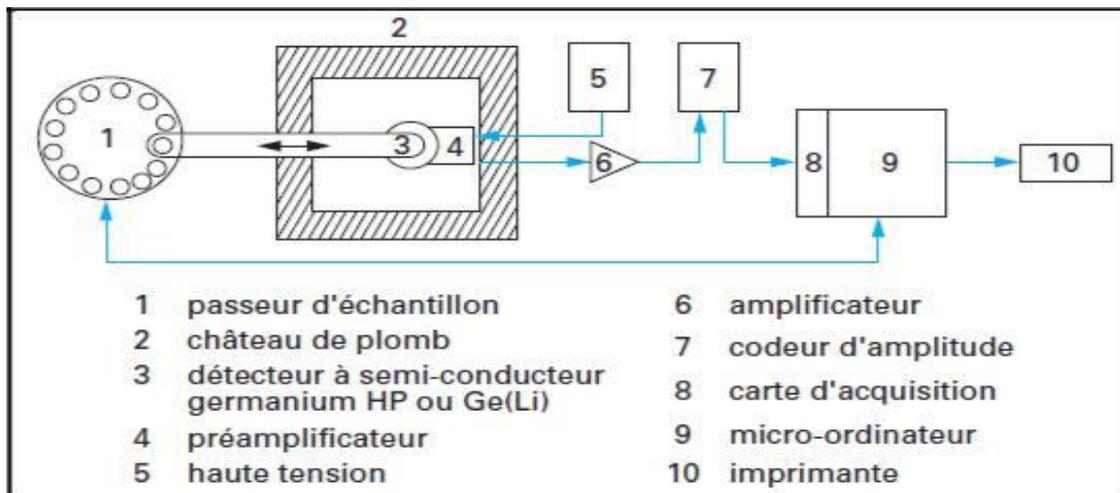


Figure III.3 : Schéma d'une installation de mesure des rayons γ utilisée en analyse par activation neutronique (Revel, 1999).



Figure III.4: Chaîne de spectrométrie gamma

III.3. Méthodes

III.3.1. Mode de prélèvement

Les prélèvements sont effectués au niveau de trois zones du site en question. Les sols sont prélevés au niveau de la couche superficielle, soit, entre 0 et environ 30 cm de profondeur et préparés au laboratoire suivant la norme NF X 31-101 (AFNOR, 1996).

III.3.2. Préparation et conditionnement des échantillons

Les mottes ont été émietées et les restes de végétaux retirés. Après tamisage à 2 mm, seule la fraction fine est conservée. Les échantillons ont été broyés à l'aide d'un mortier. Cette étape de broyage est importante car elle permet d'atteindre une granulométrie facilitant l'homogénéisation de l'échantillon. Nous avons utilisé la méthode relative selon le mode opératoire entièrement détaillé dans (Revel et Ayrault, 2000).

Pour ne pas altérer les résultats d'analyse et éviter toute interférence entre la composition en éléments traces des échantillons et celle de l'enveloppe, le conditionnement des échantillons

se fait dans des enveloppes en aluminium de haute pureté nucléaire avant l'envoi à l'irradiation (Avino et al, 2013) :

- Des rectangles de feuilles d'aluminium de haute pureté de dimensions (3x2 cm) sont découpés et nettoyés avec de l'éthanol 99%, puis séchés et mis sous forme d'enveloppes.
- Chaque enveloppe est pesée à vide puis remplie avec environ 100 mg d'échantillon de sol puis repesée.
- Pour chaque échantillon, un triplicata d'enveloppes est réalisé, lesquels à leur tour sont repesés puis numérotés.
- Une fiche de pesée est établie.

Tableau III.1 : Fiche de pesée des échantillons de sol et des standards

| Réf. | Nature échantillon | Masse enveloppe (mg) | Masse échantillon + enveloppe (mg) | Masse échantillon (mg) |
|------|--------------------|----------------------|------------------------------------|------------------------|
| 1 | Sol | 24.9 | 118.3 | 93.4 |
| 2 | Sol | 25 | 151 | 126 |
| 3 | Sol | 25.4 | 167.4 | 142 |
| 4 | Sol | 25.7 | 168.3 | 142.6 |
| 5 | Sol | 24.8 | 160 | 135.2 |
| 6 | Sol | 25.3 | 140.3 | 115 |
| 7 | Sol | 25.1 | 113.5 | 88.4 |
| 8 | Sol | 25.6 | 129.8 | 104.2 |
| 9 | Sol | 25.8 | 146 | 120.2 |
| 10 | Blanc Aluminium | 23.4 | | |
| 11 | Std. Sol ISE 918 | 24.3 | 153 | 128.7 |
| 12 | Std. Sol ISE 998 | 24.2 | 128.2 | 104 |
| 13 | Std. Sol Soil-7 | 24.6 | 90.3 | 65.7 |

Les échantillons et les standards sont disposés et organisés dans une capsule en aluminium pour l'irradiation de telle manière à permettre la réception du même flux neutronique. Les standards servent comme références pour le calcul des concentrations en polluants.

L'analyse des traces nécessite l'utilisation d'ustensiles très propre et toutes les précautions doivent être prises pour que l'échantillon ne soit pas contaminé. Tous les réactifs utilisés dans l'expérience sont au moins de grade analytique.

Des échantillons de CRM (Matériaux de Référence Certifiés) ont été préparés avec le même niveau de précision que nos échantillons de sol. En raison du coût élevé de CRM, l'exactitude de l'AANI appliquée à nos échantillons de sol, a été testé en utilisant des matériaux de

référence d'origine environnementale qui sont intensivement utilisés dans notre laboratoire (Bouhila et al, 2015).

En effet, dans chaque cas et en fonction de l'élément à analyser, plusieurs CRM sont fréquemment utilisés dans notre laboratoire, parmi lesquels l'AIEA-Soil-7 obtenue à partir de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA). Dans chaque expérience, un CRM a été utilisé comme témoin et l'autre en tant que comparateur. Les détails concernant les critères de qualification tels que recommandés et les concentrations en éléments se trouvent dans les fiches de référence correspondantes (AIEA-Soil-7, 2000).

III.3.3. Irradiation

Les enveloppes d'aluminium de haute pureté contenant les échantillons et les standards ont été rassemblées dans la capsule destinées à l'irradiation (Figure III.4).

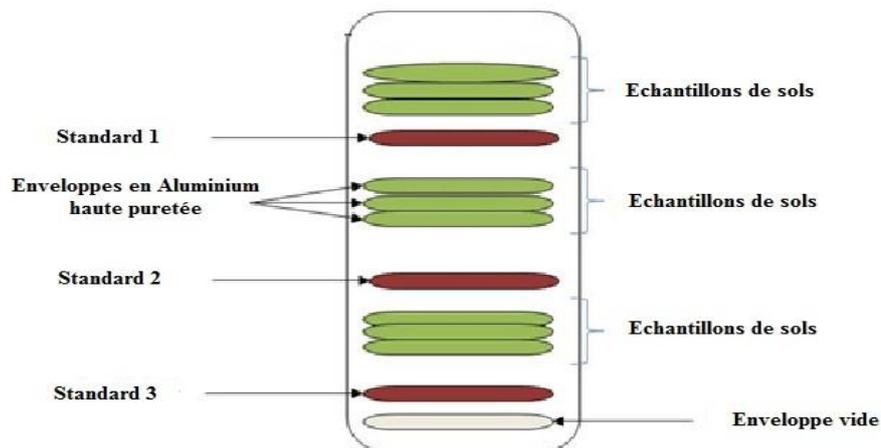


Figure III.5 : Organisation de l'enveloppes à l'intérieur de la capsule.

Les données d'irradiation dans le cœur du réacteur nucléaire NUR sont résumées dans le tableau suivant (Bouhila et al, 2015):

Tableau III.2: Protocole d'irradiation et de comptage pour l'analyse des éléments traces

| Expérience | Flux de neutrons ($n.cm^{-2}S^{-1}$) | T_i | T_d | T_c | Éléments déterminés |
|------------|---|-------|-------|-------|--|
| 1 | 1×10^{13} | 6h | 4j | 5000s | Br, Sb, La, Na, Mo, As, K, Ca et Sm |
| 2 | 1×10^{13} | 6h | 20j | 5000s | Eu, Hf, Sc, Ce, Cr, Sr, Zn, Co, Fe, Gd, Cs, Se et Cd |

NB: T_i , T_d , T_c sont respectivement: le temps irradiation, le temps de décroissance et le temps de comptage.

Les capsules contenant les échantillons et les standards ont été irradiées dans le réacteur NUR sous un flux neutronique thermique de puissance de l'ordre 10^{13} n/cm².s pendant une durée de 6 heures.

Les conditions d'irradiations ont été préalablement optimisées par d'autres études.

III.3.4. Refroidissement des échantillons

La durée de refroidissement des échantillons ou durée de décroissance dépend de la période des radionucléides à analyser.

Pour ce qui est de cette étape de refroidissement, deux conditions primordiales sont à respecter, à savoir :

- Assurer la radioprotection du personnel manipulateur ;
- Avoir une activité suffisante pour la mesure.

L'activité de nos échantillons décroît en fonction du temps, pour cela et dans notre cas, pour ne pas perdre les éléments de moyenne période, nous avons choisi une durée de refroidissement de 4 jours pour la détection des éléments de moyenne période et un mois pour les éléments de longue période.

En annexe 2 Schéma de décroissance de l'activité en fonction du temps

III.3.5. Calibration de la chaîne de mesure

Une bonne mesure spectroscopique dépend de la calibration de la chaîne de mesure réalisée par un personnel qualifié et qui suit les étapes suivantes (Ferkha et Lakehal, 2012):

- La calibration de l'amplificateur en utilisant une source de cobalt 60 nécessaire pour l'analyse du spectre.
 - Etalonnage en énergie : L'analyse du spectre nécessite l'alignement respectif des raies de la source d'étalonnage qui émet des photons gamma d'énergies connues aux canaux correspondants. La source de calibration est une d'Eu(152) qui couvre toute la gamme d'énergie qui nous intéresse.
 - Etalonnage en efficacité : Pour une chaîne de spectroscopie, la connaissance de l'efficacité permet de retrouver l'activité d'une source radioactive ou, dans le cas de l'analyse par activation neutronique par voie absolue, de déterminer la concentration d'un élément dans l'échantillon ; en effet, lorsqu'il n'est pas possible d'appliquer la procédure relative en raison de l'absence du standard adapté au spécimen à doser, on applique la voie absolue qui nécessite la détermination de l'expression de l'efficacité. Elle est aussi utilisée pour établir

des prévisions de comptage et déterminer les conditions de l'expérience telle que la durée d'irradiation, le niveau de flux et la durée de décroissance.

L'efficacité de la chaîne de détection est une fonction de l'énergie du photon gamma et de la distance source-détecteur.

III.3.6. Analyse spectrométriques des échantillons irradiés

Après l'irradiation, chaque échantillon a été analysé dans le spectromètre à rayon gamma pour une durée d'une heure et demie (5000 secondes).

Les spectres, résultants de l'analyse, fournissent des données concernant :

- Le taux de comptage, appelé NET, qui représente la surface des pics de l'élément détecté.
- L'énergie des pics émis.
- Le temps de décroissance radioactive.

Grace à des abaques indiquant l'énergie des éléments et d'autre la nature des réactions (Dams et Adams, 1970), on fait correspondre les énergies obtenues dans les spectres pour identifier les éléments.

III.3.7. Calcul des concentrations en éléments traces

Une fois un élément déterminé, le NET et le temps de décroissance radioactive sont utilisés pour le calcul de sa concentration.

L'équation (16) de la méthode relative doit être adaptée pour le calcul comme suit :

$$m_E = (C_E m_R / C_R) e^{\lambda(t_{dE} - t_{dR})} \quad (16)$$

En multipliant cette équation par les facteurs $\frac{1}{M_E}$ et $\frac{1}{M_R}$ tels que M_E et M_R représentent respectivement la masse de l'échantillon et celle du standard, on aura :

$$C_{CE} = (C_E M_R C_{CR} / M_E C_R) e^{\lambda(t_{dE} - t_{dR})} \quad (17)$$

C_{CE} : Concentration du polluant tel que $C_{CE} = m_E / M_E$ en $\mu\text{g}/\text{gramme}$ dans l'échantillon.

C_{CR} : Concentration du polluant tel que $C_{CR} = m_R / M_R$ en $\mu\text{g}/\text{gramme}$ dans le standard ou référence.

Le facteur d'humidité «h» est introduit afin de calculer les concentrations par rapport au poids sec des échantillons.

Au final la formule de calcul de la concentration devient :

$$C_{CE} = C_{CR} \left(\frac{N_e(0)/(M_E \times h_E)}{N_r(0)/(M_R \times h_R)} \right) \quad (18)$$

Où :

- * $N_e(0) = C_E e^{\lambda(t_{dE} - t_i)}$; Nombre total d'atomes radioactifs d'un élément dans l'échantillon.
- * $N_r(0) = C_R e^{\lambda(t_{dR} - t_i)}$; Nombre total d'atomes radioactifs d'un élément dans le standard.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Concentrations des éléments de radio-isotopes à moyenne période

Le tableau suivant représente les résultats des éléments dont les radio-isotopes sont de moyenne période avec un temps de demi-vie variant entre quelques heures et quelques jours. La concentration moyenne de chaque élément par site est calculée à partir de la relation

$$C_e = \frac{\sum C_{e(i)}}{n} \tag{19}$$

C_x : Concentration moyenne de l'élément e.

$C_{e(i)}$: Concentration de l'élément e dans prise i.

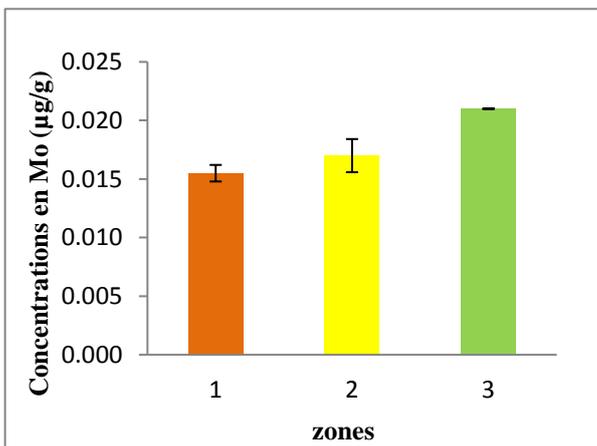
n : Nombre de prise.

Le tableau suivant indique les moyennes de concentrations des éléments détectés et quantifiés en $\mu\text{g/g}$:

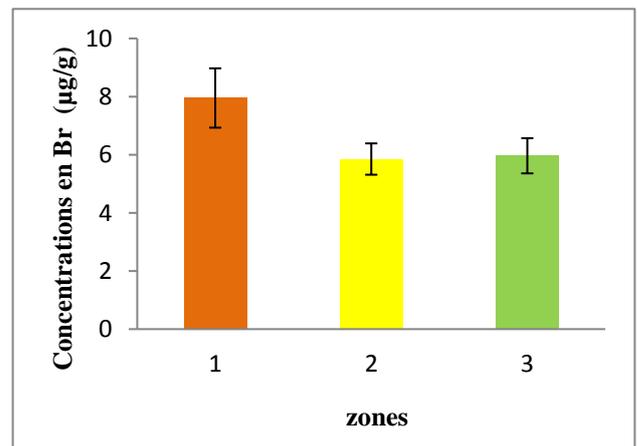
Tableau IV.1 : Moyennes de concentration des éléments ($\mu\text{g/g}$) en de moyenne période de demi-vie, relatives aux trois zones.

| Eléments | Mo | As | Br | Ga | La | Na | Sb | Ca | K | Sm | Yb |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Zone 1 | 0,0155 ± 0,0007 | 0,7960 ± 0,1245 | 7,9515 ± 1,0204 | 0,1150 ± 0,0071 | 0,1560 ± 0,0651 | 47,000 ± 9,4045 | 1,3115 ± 0,1153 | 88,860 ± 4,6910 | ND | 7,2575 ± 0,9793 | 1,8635 ± 0,2058 |
| | 0,0170 ± 0,0014 | 0,5397 ± 0,1049 | 5,8510 ± 0,5394 | ND | 0,1507 ± 0,0388 | 44,080 ± 3,6770 | 1,5220 ± 0,3017 | 50,0333 ± 3,2950 | 135,705 ± 4,5326 | 6,2447 ± 0,8590 | 1,9650 ± 0,0879 |
| Zone 2 | 0,0210 ± 0,0000 | 0,2400 ± 0,0569 | 5,9640 ± 0,6059 | 0,1750 ± 0,0212 | 0,1743 ± 0,0709 | 102,543 ± 32,8071 | 5,8063 ± 0,7226 | 201,366 ± 17,2451 | ND | 5,3337 ± 0,8279 | 1,9350 ± 0,2572 |
| | 0,0170 ± 0,0014 | 0,5397 ± 0,1049 | 5,8510 ± 0,5394 | ND | 0,1507 ± 0,0388 | 44,080 ± 3,6770 | 1,5220 ± 0,3017 | 50,0333 ± 3,2950 | 135,705 ± 4,5326 | 6,2447 ± 0,8590 | 1,9650 ± 0,0879 |

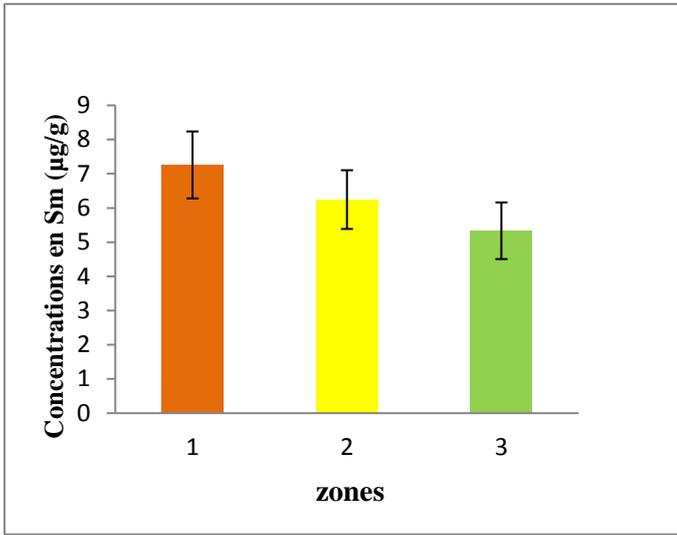
Nous avons décidé de nous intéresser dans cette étude aux éléments présentant une certaine toxicité et avons donc négligé volontairement d'autres éléments qui sont des Oligo-éléments. En effet, les 5 éléments suivants : Yb, Sm, La, Br, Mo ont des concentrations proches dans les 3 zones de prélèvement à quelque microgramme près.



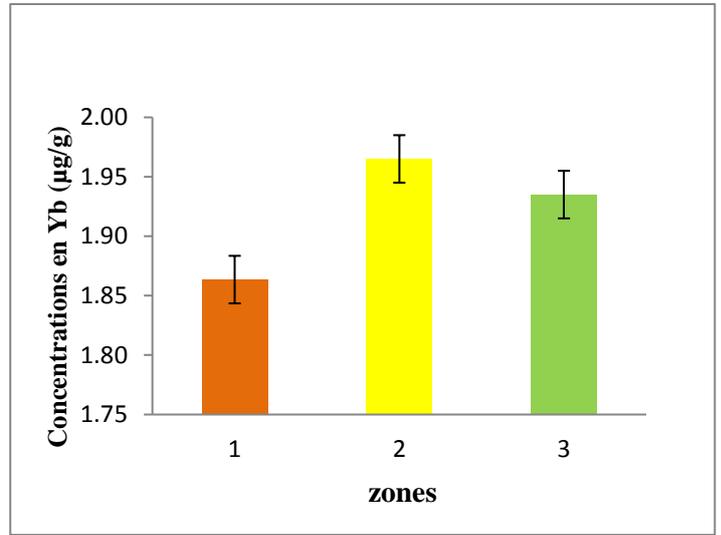
(a)



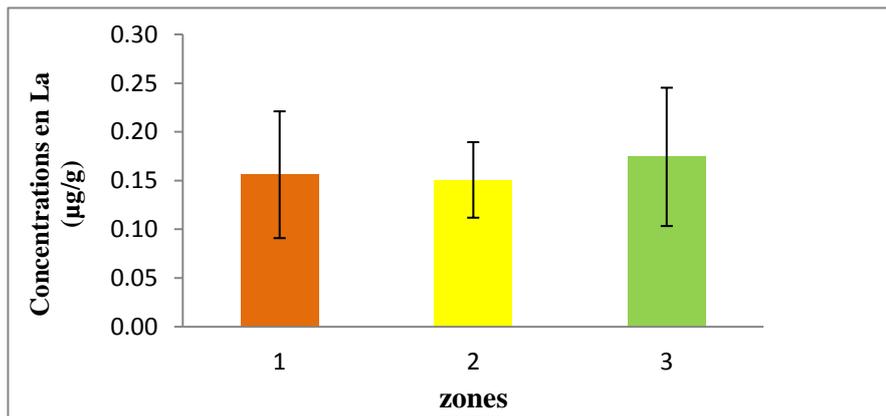
(b)



(c)



(d)



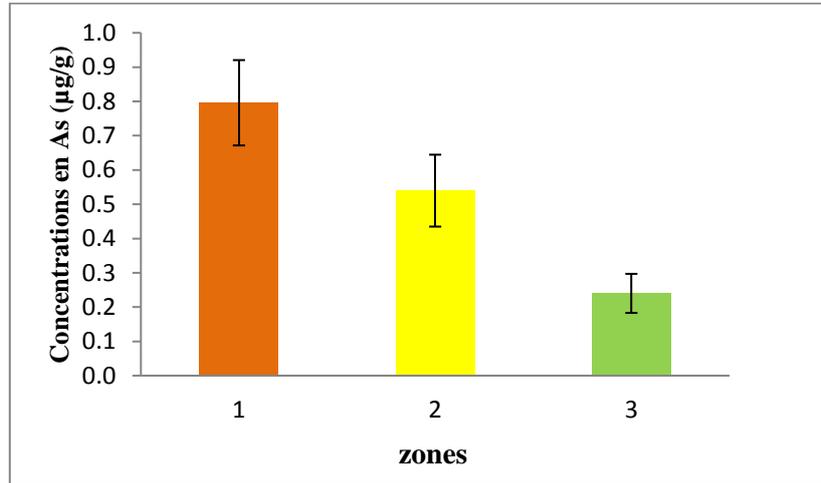
(e)

Le molybdène souvent appelé « moly » est un métal de transition, il est utilisé dans différentes industries telle que la métallurgie et les alliages, les électrodes et en catalyse, notamment pour l'acier; mais aussi principalement et couramment utilisé comme pigment dans les peintures. La teneur du Mo enregistrée aux trois zones peut être expliquée par la présence d'une usine de céramique à Draria.

La présence donc du Brome est principalement du au trafic routier car Le Dibromoethane ($C_2H_4Br_2$) est un additif utilisé dans le carburant pour éviter la formation de dépôt de plomb (Pb) dans les chambres de combustion et les systèmes d'échappement., sa concentration dans

la zone 1 (proche d'un axe routier) est supérieure au deux autres zones, ce qui tend à confirmer davantage cette hypothèse.

Nous supposons que Le Samarium, le Lanthane ainsi que l'Ytterbium proviennent des industries de céramique et de polissage situées dans la ville, car ces trois éléments sont utilisés en céramique et en polissage.



(f)

Figure IV.1: Moyenne des concentrations en éléments (µg/g) ; (a) Molybdène; (b) Brome; (c) Samarium; (d) Ytterbium ; (e) Lantane ;(f) Arsenic ; enregistrées dans les trois zones de prélèvement.

Dans les sols, l'Arsecenic existe principalement sous forme oxydée. Une des sources anthropiques de l'Arsecenic est due au trafic routier, ce qui est cohérent avec les valeurs trouvées dans la zone 1.

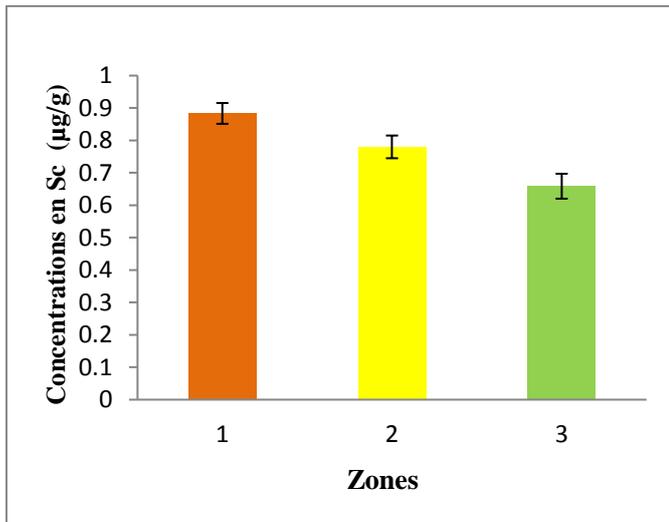
IV.2. Concentrations des éléments de radio-isotopes à longue période

Tableau IV.2 : Moyennes de concentration des éléments (µg/g) en de longue période de demi-vie, relatives aux trois zones

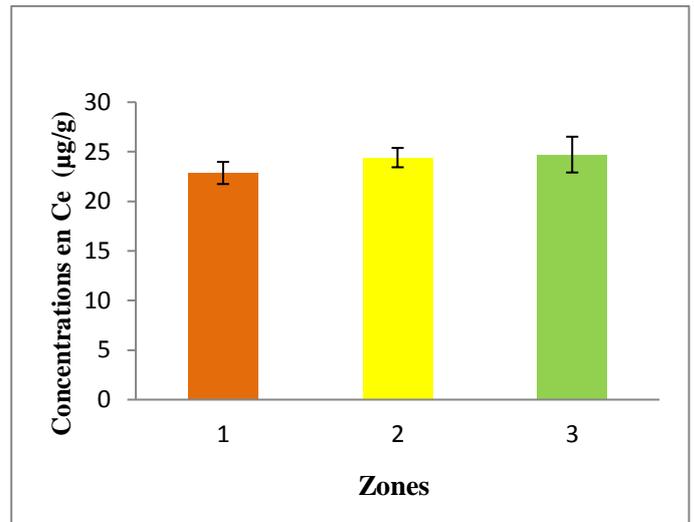
| Eléments | Nd | Ba | W | Se | Sb | Zr | Sc | Ce | Cr | Sr | Zn |
|----------|--------|----------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| zone 1 | 3,3210 | 222,3033 | 0,0093 | 0,3440 | 4,3063 | 1,4193 | 0,8833 | 22,8633 | 30,0067 | 21,6400 | 28,9133 |
| | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| zone 2 | 0,2851 | 9,6621 | 0,0006 | 0,1089 | 0,1873 | 0,2738 | 0,0321 | 1,1143 | 2,0115 | 7,4657 | 2,9975 |
| | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| zone 3 | 2,9270 | 177,5600 | 0,0110 | 0,2620 | 4,0190 | 2,4173 | 0,7800 | 24,4133 | 26,7433 | 17,3333 | 17,4100 |
| | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| zone 3 | 0,2325 | 11,4884 | 0,0010 | 0,1772 | 0,2419 | 0,2085 | 0,0350 | 0,9752 | 0,5752 | 4,0825 | 0,9277 |
| | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| zone 3 | 2,8757 | 569,1367 | 0,0140 | 0,5127 | 17,7000 | 2,1407 | 0,6587 | 24,7167 | 26,5767 | 67,4067 | 45,7100 |
| | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| zone 3 | 0,4156 | 44,3442 | 0,0017 | 0,2339 | 0,9060 | 0,2474 | 0,0385 | 1,8048 | 2,4532 | 1,9954 | 5,3935 |
| | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |

Suite du tableau IV.2

| Hg | Co | Fe | Ag | Cs | Cd | Hf | Tb | Ta |
|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|
| 0,0038 | 0,0178 | 0,9400 | 0,7343 | 9,9367 | 2,0800 | 23,9833 | 39,2933 | 26,2567 |
| ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| 0,0054 | 0,0007 | 0,0332 | 0,4537 | 0,7868 | 0,1646 | 1,4384 | 0,7145 | 5,7287 |
| 0,0013 | 0,0171 | 0,8050 | 1,1813 | 10,2967 | 2,6000 | 47,8900 | 33,5967 | 23,9967 |
| ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| 0,0006 | 0,0007 | 0,0180 | 0,6603 | 0,2987 | 0,2722 | 2,7160 | 1,4912 | 5,4949 |
| 0,0013 | 0,0132 | 0,5883 | 0,8360 | 8,2300 | 2,3600 | 46,3333 | 29,4333 | 22,4233 |
| ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| 0,0006 | 0,0007 | 0,0391 | 0,1244 | 0,3292 | 0,5903 | 4,3784 | 1,2359 | 4,5622 |



(a)

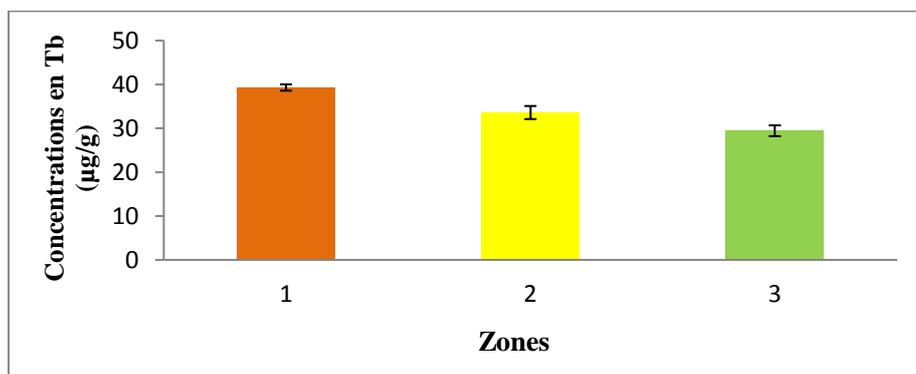


(b)

Le Scandium est l'élément chimique de numéro atomique 21, de symbole Sc. C'est un métal de transition mou.

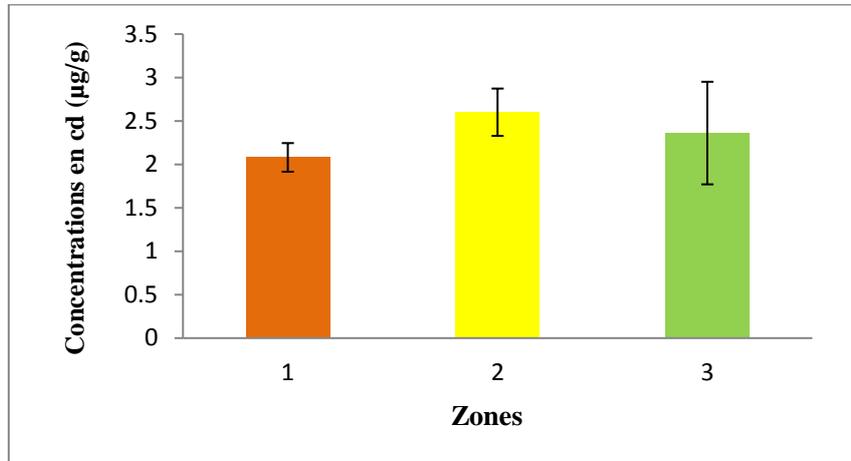
Le Cérium est le métal le plus abondant du groupe des terres rares. À température ambiante, il est malléable et s'oxyde rapidement à l'air.

Les concentrations de Scandium et de Cérium à Draria peuvent être rapportées à leur application industrielle dans les industries avoisinantes comme celle de céramique, du polissage et de briqueterie.



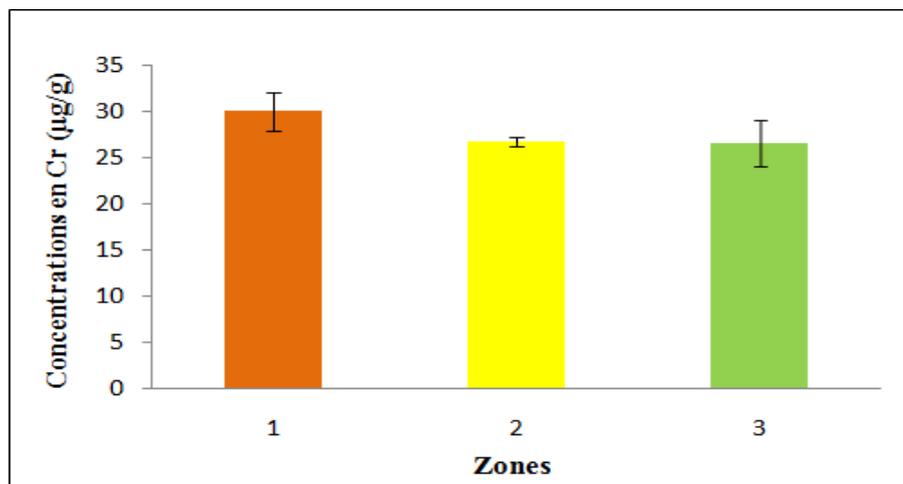
(c)

La présence du Terbium peut être rapportée aux mêmes applications, sa concentration supérieure en zone 1 peut favoriser l'hypothèse de pollution causée par le transport routier.



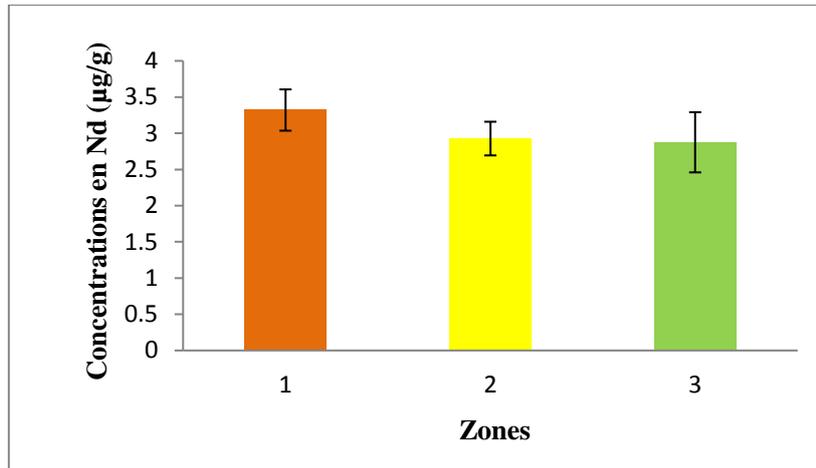
(d)

Le Cadmium a de multiples utilisations mais ses principales utilisations en masse restent celles de ses composés qui concernent les revêtements d'anticorrosion, dans la fabrication de pigments stables de couleurs ou dans les matières plastiques (casques, verres, céramiques...), sa présence en quantité plus ou moins similaire est donc justifiée.



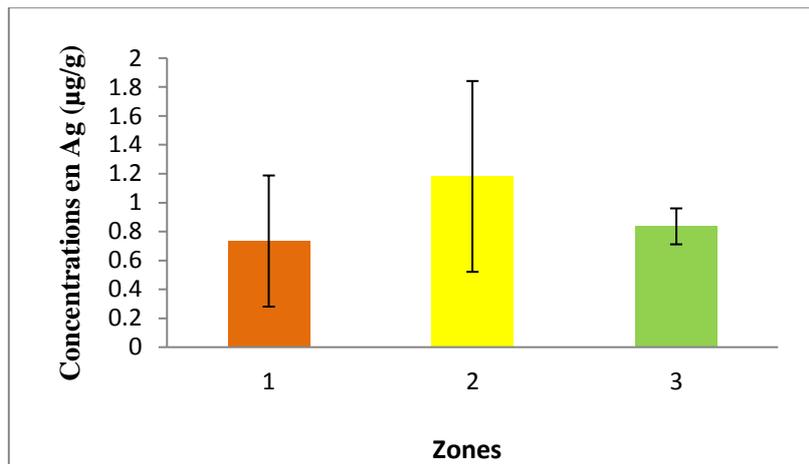
(e)

Le Chrome est un métal de transition qui résiste à la corrosion et au ternissement. Les chromates et les oxydes sont utilisés dans les colorants et les peintures, aussi le chrome est utilisé dans la fabrication de briques réfractaires, de revêtements intérieurs de fournaies, de mortiers et de produits mis en forme par moulage. Ces utilisations permettent d'identifier la source du chrome comme étant l'industrie de céramique à Draria. La concentration en chrome de la zone 1 qui est supérieure aux autres est probablement due au transport routier.



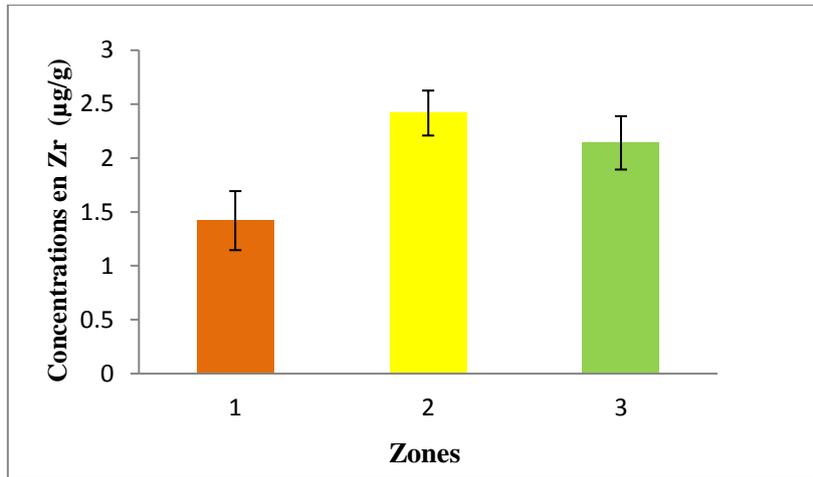
(f)

La concentration du Néodyme dans les trois zones diffère de très peu et sont du a son utilisation comme colorant pour céramiques. En effet, suivant le sel utilisé de chrome, on obtient du bleu jusqu'au mauve ainsi que les colorants du verre.



(g)

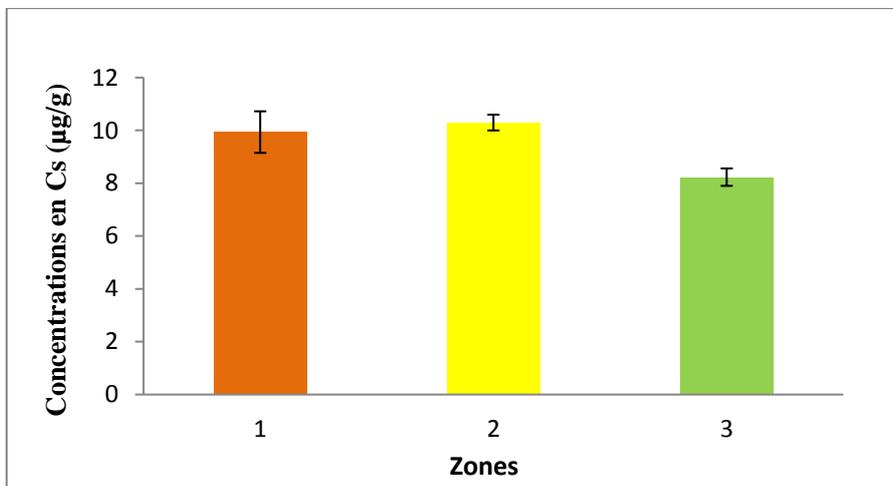
L'argent est émis par les installations nucléaires en fonctionnement normal et peut être rejeté au cours d'accidents. L'argent présente une mobilité faible dans la plupart des types de sols. La majorité des teneurs d'Argent rejeté dans l'environnement demeure dans les sols à proximité du lieu d'émission. Dans notre cas la concentration en Argent est plus importante en zone 2.



(h)

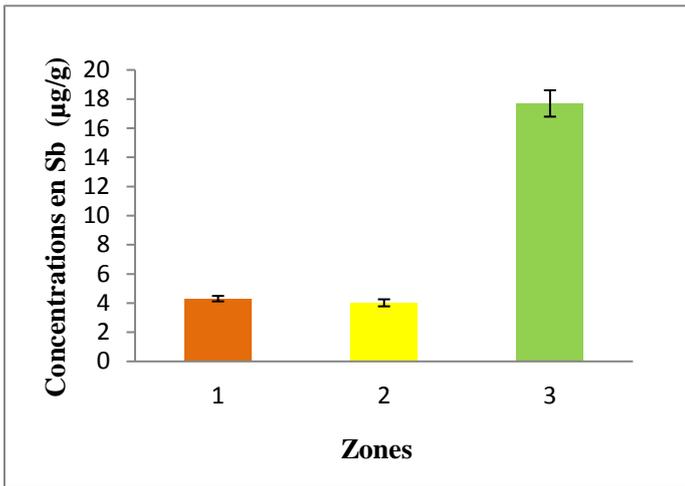
La plus grande partie du Zirconium est utilisée pour réaliser des matériaux céramiques (opacifiant pour les émaux vitreux et comme pigment). Oxyde utilisé dans les briques (briqueterie d'el Achour), les céramiques et les abrasifs.

En raison de ses excellentes propriétés aux températures élevées, et couplé à sa faible absorption des neutrons, il est utilisé dans la construction des réacteurs nucléaires ; de ce fait sa concentration est plus élevée en zone 2.

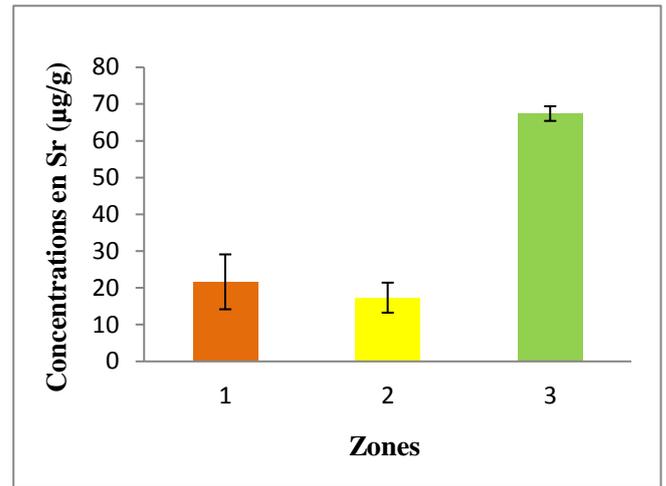


(i)

Le Césium est l'un des nombreux produits de fission de l'Uranium, il est connu à cause des rejets de centrales nucléaires ou de sites de retraitement, d'entreposage nucléaire. La valeur la plus basse enregistrée dans la zone 3 près de la forêt est due à son éloignement de la zone de recherche.

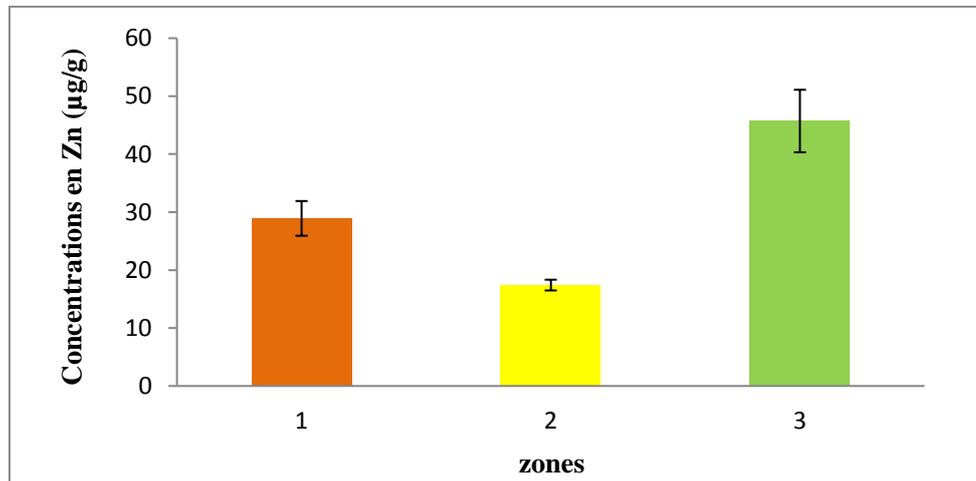


(j)



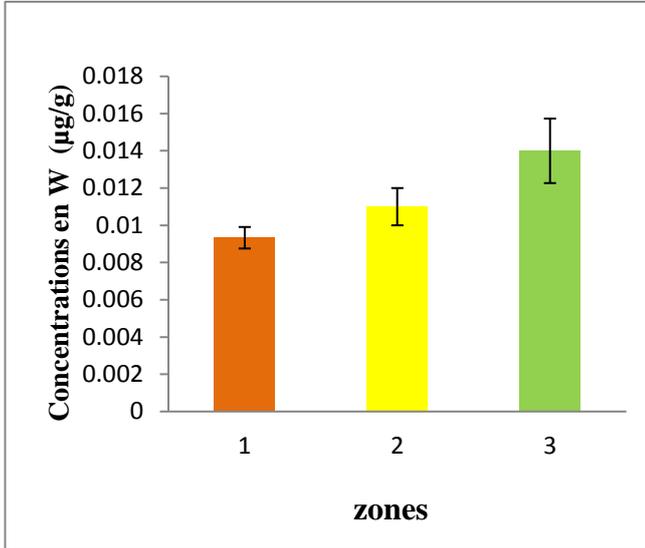
(k)

L'Antimoine entre dans la composition des alliages métalliques et ces oxydes (trioxydes d'antimoine) comme pigment de peinture qui reste longtemps en suspension dans l'air ; le Strontium par contre, sert de fondant dans les vernis et glaçures pour céramiques. Certains pigments sont des sels de Strontium. Leurs fortes concentrations à Draria peuvent s'expliquer par la présence de l'industrie de céramique pour la coloration de ses produits. L'incinération des déchets est aussi une source de contamination atmosphérique par ces éléments qui peuvent être transporté sur de longues distances depuis leurs points d'émission. Le fait que leurs concentrations soit élevé en zone 3 par rapport aux deux autre zones est probablement dû aux arbres qui retiennent ces suspensions.

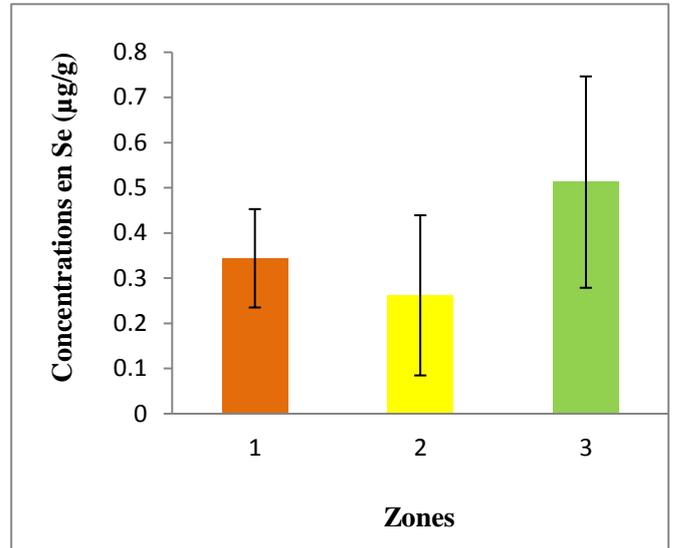


(l)

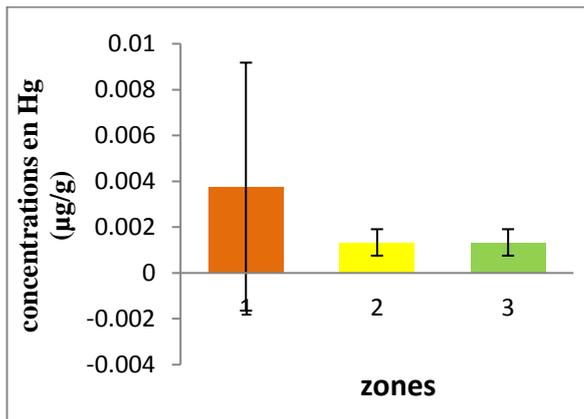
Le Zinc est un oligoélément important et joue un rôle direct dans la croissance des plantes. Il active la croissance, alors que la carence en cet élément la freine. Sa teneur dans les sols non pollués se situe entre 10 et 80 $\mu\text{g g}^{-1}$, sa forte présence en zone 3 par rapport aux deux autres zones est dû à l'éloignement de celle-ci des zones plus polluées.



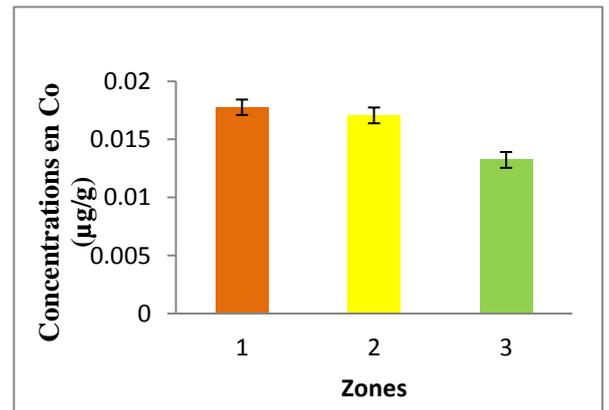
(m)



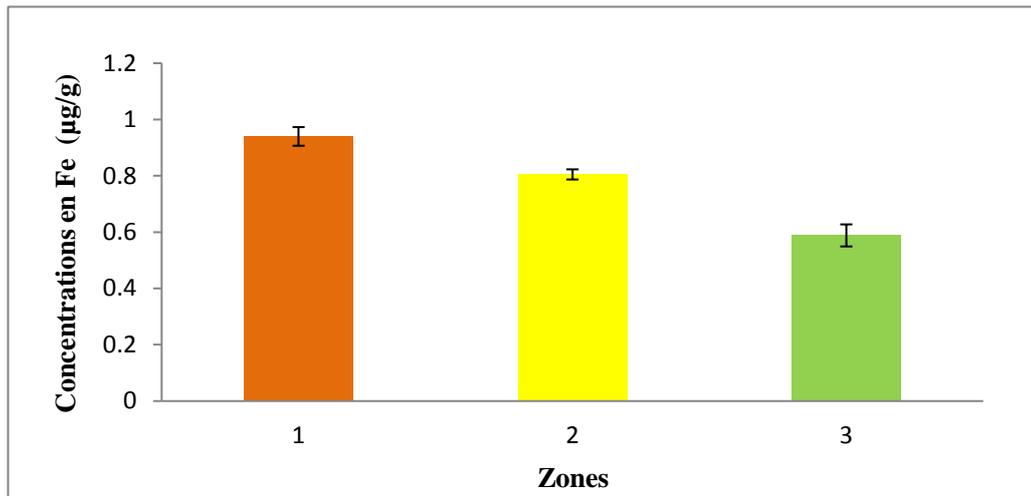
(n)



(o)



(p)



(q)

Figure IV.2: Moyenne des concentrations en éléments (µg/g) ; (a) Scandium; (b) Cérium ; (c) Terbium; (d) Cadmium ; (e) Chrome ; (f) Néodyme ; (g) Argent ; (h) Zirconium ; (i) Césium ; (j) Antimoine ; (k) Strontium ; (l) Zinc ; (m) Tungstène ; (n) Sélénium ; (o) Mercure ; (p) Cobalt ; (q) Fer ; enregistrées dans les trois zones de prélèvement.

Tous ces éléments : Tungstène, Sélénium, Mercure, Cobalt et le Fer ont des concentrations de l'ordre du dixième de microgrammes par gramme d'échantillon de sol et peuvent être considéré comme une teneur naturelle.

La concentration du fer supérieur en zone 1 et 2 est due aux travaux et au chantier de construction au niveau du site de prélèvement.

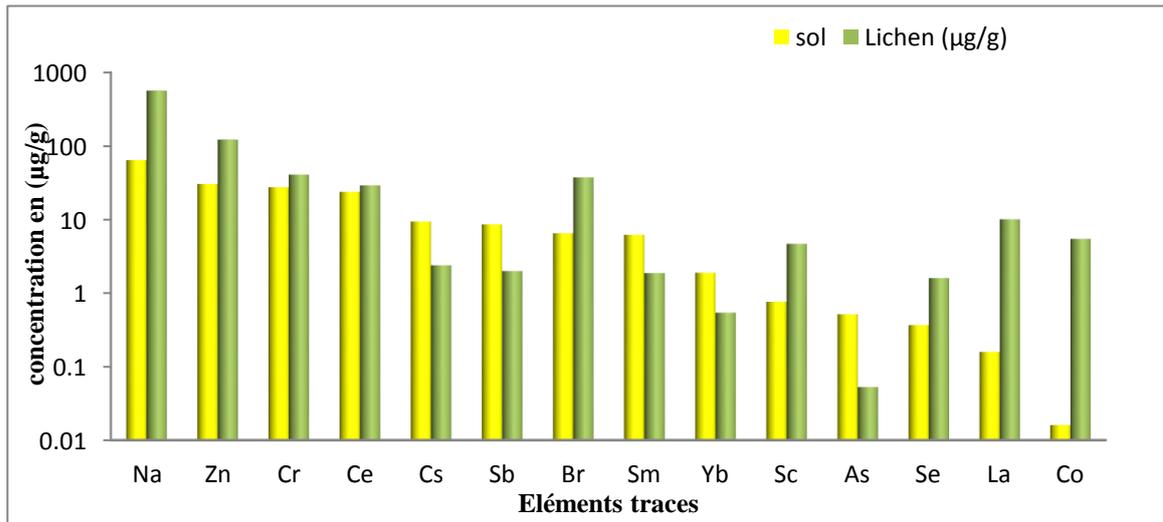
IV.3 : Comparaison des résultats avec ceux des lichens du même site

Les lichens sont le résultat d'une symbiose entre une algue et un champignon, ces organismes sont considérés comme des bio-indicateurs de pollution car ils dépendent exclusivement de l'atmosphère comme source de nutriments. Ils absorbent les polluants et les accumulent dans leurs tissus en même temps que les éléments qui leur sont nécessaire pour la survie. Ils fonctionnent « en éponge », ils absorbent tous les constituants de l'air, polluants compris. (Bouhila, 2016)

Nous avons calculé la moyenne des concentrations des éléments traces de nos échantillons de sols des trois zones puis avons procédé à une comparaison par rapport à la moyenne des concentrations des mêmes éléments d'échantillons de lichens du même site.

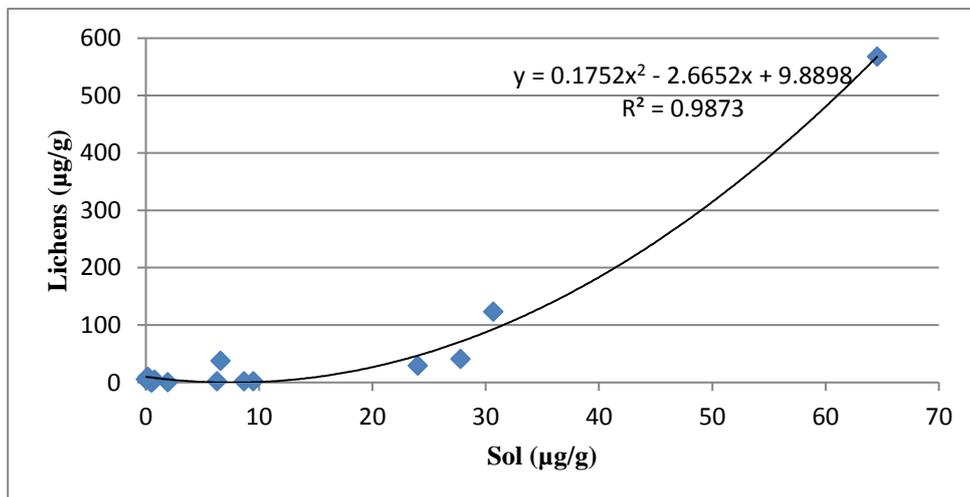
Tableau IV.3 : Concentration des éléments traces dans les échantillons de sol et de lichens ($\mu\text{g/g}$) du même site (Bouhila et al, 2013)

| Eléments | Sol ($\mu\text{g/g}$) | Lichen ($\mu\text{g/g}$) |
|-----------------|---|--|
| Na | 64,5410 | 568,20 |
| Zn | 30,6778 | 123,20 |
| Cr | 27,7756 | 41,20 |
| Ce | 23,9978 | 29,4 |
| Cs | 9,4878 | 2,42 |
| Sb | 8,6751 | 2,02 |
| Br | 6,5888 | 37,80 |
| Sm | 6,2786 | 1,90 |
| Yb | 1,9212 | 0,55 |
| Sc | 0,7740 | 4,75 |
| As | 0,5252 | 0,05 |
| Se | 0,3729 | 1,62 |
| La | 0,1603 | 10,20 |
| Co | 0,01603 | 5,53 |



Figures IV.3 : Variation des concentrations moyennes en éléments obtenues sur échantillons de sol et de lichens en (µg/g) au niveau du site de prélèvement.

La figure IV.3 nous montre l'évolution des différentes concentrations moyennes des mêmes éléments obtenus sur le même site. Néanmoins les concentrations de ces éléments dans les lichens sont plus importante exprimant ainsi leur pouvoir accumulateur d'où leur nom : les bio-accumulateurs. Ces derniers ont une meilleure accumulation en ETM, ceci peut être expliqué par le fait que ces éléments dans le sol sont assez mobiles et donc passent dans des horizons différents plus profond par lessivage.



Figures IV.4 : Corrélation entre les concentrations moyennes en éléments obtenues sur échantillons de sol et de lichens du même site.

Les résultats sont assez concluant et prouvés par une étude du coefficient de corrélation (=0,987) montrant une très bonne corrélation entre les concentrations des éléments traces du sol de surface et ceux des lichens.

Conclusion générale

Historiquement, on s'est d'abord intéressé à la santé humaine plutôt qu'à l'environnement, puis à la pollution des eaux plutôt qu'aux sols, car pendant longtemps on a cru que les sols étaient capables de s'auto-épurer. Ce n'est bien sûr pas le cas, particulièrement lorsqu'il s'agit des métaux lourds. Aujourd'hui, les risques sont (à peu près) connus, et il appartient aux responsables des sites pollués de décider du traitement de cette pollution.

Ce travail a été réalisé au sein du centre de recherche nucléaire de Draria dans le cadre d'un projet de recherche en cours de réalisation.

Cette étude nous a permis de détecter, d'identifier et de quantifier plusieurs éléments traces métalliques dont : l'Arsenic le Strontium, le Chrome et le Mercure...etc. Ces éléments, connus pour leur persistance dans le sol et qui constituent des risques majeurs aussi bien pour l'homme que pour son environnement.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons la différence des concentrations des éléments traces dans le site d'une zone à une autre; c'est bien évident que c'est les mêmes sources émettrices qui engendrent ces polluants, donc c'est la distribution de ces polluants qui diffère.

Cette dernière est influencée par plusieurs facteurs et parmi ces facteurs on trouve

- La géologie du sol (la roche mère, la forme, une plaine, sol plat ... etc.)
- Les conditions climatiques (T° , précipitations, vitesse du vent et humidité) ont un rôle très important dans la distribution des polluants.

Les résultats montrent que le trafic routier est principalement la source la plus émettrice et cela est confirmé par l'existence des éléments tel que : Br, As, Tb, Cr. La variation de leurs concentrations est due aux activités industrielles telles que : céramique, polissage et la briqueterie. Certains sont simplement dus aux travaux effectués (chantiers de construction) aux alentours des sites de prélèvement. Ces résultats sont d'autant plus justifiés quand on s'intéresse aux principales utilisations des ETM (Annexe 4).

Le choix de la technique de l'analyse par activation neutronique s'est avéré judicieux. En effet, sa remarquable précision et sa grande sensibilité nous ont permis d'aboutir à des résultats de choix avec des incertitudes très admissibles.

Cette étude nous renseigne sur la qualité du sol de surface mais ne nous renseigne pas assez sur la réalité de la pollution des sols étant donné que les éléments détectés ne restent pas présents longtemps dans les sols de surfaces et passent vers des horizons plus profonds.

Nos résultats démontrent qu'en dehors de la teneur du cadmium élevé par rapport à sa limite recommandée dans le sol (Annexe 3) toutes les teneurs des autres éléments quantifiés, quant à elles, sont inférieures à ces valeurs limites.

Cette étude en cours de réalisation doit encore être approfondie et des solutions pour remédier à la teneur élevée en cadmium doivent être proposées.

Références bibliographiques

- Adams F., Dams R..1970. Appendix III - A Compilation Of Gamma-Ray Spectra (Germanium Detector). Applied Gamma-Ray Spectrometry (Second Edition Completely Revised and Enlarged). Pages651: 469-471.
- AFNOR, 1996. Qualité des sols environnement. Association française de normalisation (AFNOR), Paris.
- Alleman L.Y. and Mathe F., 2008. Principales méthodes de prélèvement et d'analyse des éléments traces dans l'atmosphère. Air pur 75 : 16-2
- Anfossi S., Billiard E., Bonnet M., Henriot F., Kraemer F., Lechenne L., Le Herissier M., Lorin S.; 1997. Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation (les métaux lourds), Axe " Génie des Procédés", Ecole des Mines de Saint-Étienne.
- Avino P, Capannesi G, . Rosada A. 2007. Instrumental neutron activation analysis, a powerful instrument in determining environmental pollution: theory and applications.
- Avino, P., Capannesi, G., Renzi, L., Rosada, A., 2013. Instrumental neutron activation and statistical approach for determining baseline values of essential and toxic elements in hairs of high school students. Ecotoxicology, Environement and Safety 92. 206–214.
- Bliefert C. Perraud R. 2001. Chimie de l'environnement. Air, eau, sols, déchets. De Boeck Université, Paris, Bruxelles, 1^{re} édition
- Baize D. 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris.
- Baize D. 2004. Petit lexique de pédologie. INRA éditions, Paris.
- Bouhila Z., Mouzai M., Azli T., Nedjar A., Mazouzi C., Zergoug Z., Boukhadra D., Chegrouche S., Lounici H. 2015. Investigation of aerosol trace element concentrations nearby Algiers for environmental monitoring using instrumental neutron activation analysis. Atmospheric Research, Elsevier 166, 49–59.
- Bouhila Z. 2016. Contribution à l'évaluation des ETM dans les retombées atmosphériques par l'utilisation d'une technique d'analyse nucléaire. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechnique.
- Bouhila Z., Djakrir Zergoug Z., Azli T., Mouzai M., Nedjar A., Ferkha M.K., Lakehal C.« Biosurveillance de la Qualité de l'Air : Dosage des Éléments Traces Métalliques dans les Lichens par la technique d'Analyse par Activation Neutronique ». Journées Internationales de Biotechnologie 2013 (JIB2013), Tunisie, 21-24 Décembre (2013).
- Brignon J.M. ; Malherbe L. ; Soleille S. ; 2005. Les substances dangereuses prioritaires de la directive cadre sur l'eau – Fiches de données technico-économiques. Rapport final, INERIS DRC-MECO-2004-59520

- Bur T. 2008. Impact anthropique sur les éléments traces métalliques dans les sols agricoles de midi-pyrénées implications en termes de limites et de charges critiques. Toulouse : l'institut national polytechnique de toulouse (INPT).
- Chevarier N. Tousset J. 1984. Analyse par activation. Bulletin de l'union des physiciens. vol. 78 : 1173-1190 .
- Christopher R, Dockery and Scott R, Goode, 2003 . Laser-induced breakdown spectroscopy for the detection of gunshot residues on the hands of a shooter. Appl. Opt., 42 :6153–6158.
- Delmas R., Mariet C., Moskura M., Guiot D. 2009. Analyse par Activation Neutronique Instrumentale. disponible sur : http://iramis.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_sstechnique.php?id_ast=864
- Ferkha M.K. et Lakehal c. 2012. Utilisation des lichens pour le dosage des éléments traces métalliques par la méthode d'analyse par activation neutronique. Laboratoire des Biotechnologies Environnementales et de Génie des Procédés (BIOGEP). École Nationale Polytechnique d'Alger.
- Galsomies L. 1999. Retombées atmosphériques des métaux en France : estimation par dosage dans les mousses ; ADEME édition 1999.
- Girard MC, Walter C., Rémy J.C., Berthelin J. et Morel J.L. 2005. Sols et environnement. Dunod.
- Greenberg R. R., Bode P., De Nadal Fernandes E. A. 2011. Neutron activation analysis: A primary method of measurement. Spectrochimica Acta Part B: *Atomic Spectroscopy* 66, 193–241
- Gombert S., Colin J.L., Galsomies L., Leblond S., Losno R. et Rausch de Traubenberg C. 2005. Pollution atmosphérique par les métaux – Biosurveillance des retombées. EDP Sciences/ADEME Éditions 2005. Rapport de la campagne française de mesure des métaux dans les mousses réalisée en 2000.
- IAEA-Soil-7. Date of issue January 2000. Disponible sur : http://nucleus.iaea.org/rpst/Documents/rs_iaea-soil-7.pdf
- Juste C. 1988. Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces du sol. Science du Sol. 26, 103-112.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. 1992. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press (Ed.), London. pp. 413.
- Kozłowski R. et Grabowska L., Mankowski J., Szpakowska B, 2005. Métaux lourds dans l'environnement, menaces et possibilités de riposte. Disponible sur <http://www.chanvre-info.ch/info/fr/Metaux-lourds-dans-l-environnement.html> . le 14/05/17.
- Larrose A., 2011. Quantification et spatialisation de la contamination en éléments traces métalliques du système fluvio-estuarien girondin. Thèse doctorale. Université de Bordeaux 1.

- Le Corfec Y., 2011. Sites et sols pollués, Gestion des passifs environnementaux. Dudon.
- Leyni-Barbaz D., 2001. Développement d'une méthode de dosage du mercure dans l'air à base d'hopcalite par analyse par activation neutronique. Montréal : Université de Montréal.
- Fornarini L., Colao F. , Fantoni R., Lazic V., and Spizzicchino V., 2005 Calibration analysis of bronze samples by nanosecond laser induced breakdown spectroscopy : A theoretical and experimental approach. *Spectrochim. Acta Part B*, 60 :1186–1201.
- Lounici ,2016 , les procédés de dépollutions du sol Cours.
- Martin M.Z., Labbé N., Rials T. G., and Wullschleger S. D. 2005. Analysis of preservative-treated wood by multivariate analysis of laser-induced break down spectroscopy spectra. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, Vol. 60 :1179–1185.
- McLaughlin, M.J., Zarcinas, B.A., Stevens, D.P., Cook, N., 2000. Soil testing for heavy metals. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31, 1661-1700.
- Meyer G. 2003. L'analyse par activation de neutrons de réacteur. *Journal de physique IV* 103 : 243-252
- Miquel G. 2001. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Sénat/Assemblée Nationale française. Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.
- Nowak C., Mossmann J.-R., Saada A., 2003. Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle : mécanismes et mise en œuvre. Rapport BRGM/RP-51960-FR, p 97
- Nriagu J. O. A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals, 1989. *Nature*, 338 :47–49.
- Ousmoï M. 1998, analyse par activation neutronique de l'argile québécoise utilisée pour la fabrication de la céramique amérindienne. Thèse doctorale. école polytechnique de Montréal.
- Pacyna J. M., Pacyna E. G. 2001. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environmental Reviews* 9: 269-298.
- Pansu M., Gautheyrou J. 2003. L'analyse du sol. *Minéralogique, organique et minérale*. Springer, 2003. pp 998
- Qasim BH. 2015. Détermination, spéciation et biodisponibilité des éléments traces métalliques dans les sols contaminés et technosols. Thèse doctorale. Institut des Sciences de la Terre d'Orléans.
- Rausch de Traubenberg C., Galsomiès L., Martinet Y. 2013. Pollution atmosphérique par les métaux en France : dix ans de biosurveillance des retombées. EDP Sciences. p 170.

- Revel G., Ayrault S., 2000. Comparative use of INAA and ICP-MS methods for environmental studies. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 244. 73–80.
- Revel G. 1999. Méthodes nucléaires d'analyse. Edition Techniques ingénieur. p 2 565
- Sirven JB. 2006. détection de métaux lourds dans lessols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser (LIBS). Université de Bordeaux 1
- Stumm, W. and Morgan, J.J., 1996. Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1022p.
- Verma, H.R. Atomic and atomic analytical methods: XRF, Mössbauer, XPS, NAA and Ion-Beam Spectroscopic Techniques, 2007. Springer, pp 373.

Annexe 1

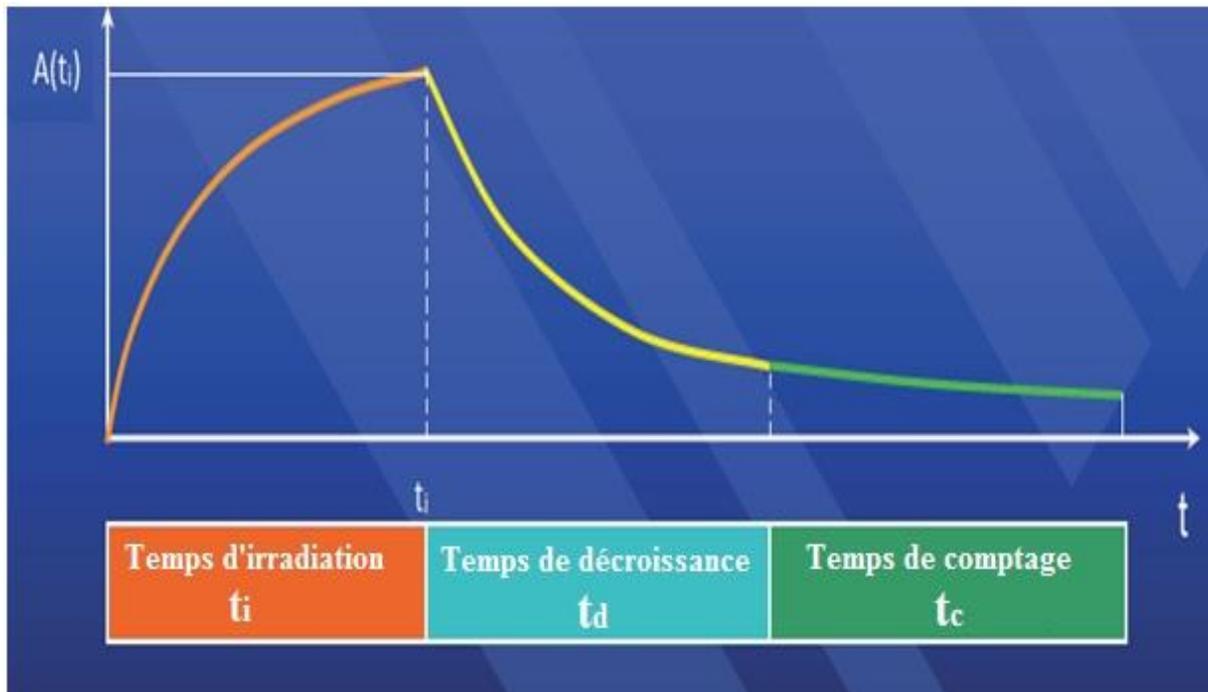
Méthodes d'analyse des éléments traces et comparaison

| | <i>Spectroscopie d'absorption Atomique</i> | <i>Analyse activation</i> | <i>par PIXE</i> | <i>Microsonde</i> |
|---|--|--|-------------------------------------|--|
| Échantillon et quantité | 10 mg - 1g Poudre; Mélangé | (50-100) mg Poudre; Entier | quelques mg, coupe en section | coupe Poudre; transversale |
| Composants analysés | 50 éléments non métallique | 65 à 92 éléments | éléments Z> 12 non Na | éléments Z>12 |
| Rang de la concentration | Majeurs ; Mineurs Traces 10ppm-10% | Majeurs, Mineurs Traces; ppb-100% | Majeurs, Mineurs Traces | Majeurs, Mineurs Traces; (*>100 Ppm) |
| Précision et exactitude | Élevée (2%) | Élevée (1% - %5) | Moyenne (5%) | Élevée; Problème avec la géométrie de l'échantillon |
| Coût | Faible | Élevée | Élevée | Élevée |
| Rapidité | Lente | rapide | rapide | rapide |
| Type d'échantillon analysé | Céramique; Verre; Forme plate | Céramique; Verre; Forme plate; Autres | Céramique; inclusion Peinture | Analyse de point; Fibre |
| destructivité | Oui | Oui pour L'échantillon de La grande taille | Oui | Oui mais l'échantillon est utilisable après |
| Forme analysée | en quantité | en quantité | en quantité ou ponctuelle | Ponctuelle ou en surface |
| Plusieurs éléments simultanément | Oui | Oui | Oui | Non |

| | <i>Diffraction aux ray- X</i> | | <i>Spectroscopie d'émission optique</i> | <i>Fluorescence X</i> |
|---|-----------------------------------|-------------|---|---|
| <i>Échantillon forme et quantité</i> | Minéraux amorphe | crystallin | 5-100 mg, Poudre; Mélange | 100 mg-2g, Poudre; Mélange; Artefact entier |
| <i>Composants analysés</i> | Minéraux Amorphe | crystallins | 30-40 éléments Métallique | 80 éléments z >12 |
| <i>Rang de la concentration</i> | Majeurs, Mineurs (>1 %) | | Majeurs, Trace,(jusqu'à 100 ppm) | Mineurs Trace! (50- 100) ppm |
| <i>Précision et exactitude</i> | Semi-quantitative | | Faible (10 %) | Elevée (2%) |
| <i>Coût</i> | Moyen | | Faible | Moyen |
| <i>Rapidité</i> | Rapide | | Rapide | Rapide |
| <i>Type d'échantillon analysé</i> | Minéraux inclusion | d'argile | Céramique, Verre Peinture, autre | Céramique, Verre, autre |
| <i>Destructivité</i> | Oui | | Oui | Non mais l'échantillon l'est plus utilisable |
| <i>Forme analysée</i> | en quantité | | en quantité | en quantité de poudre |
| <i>Plusieurs éléments simultanément</i> | Non | | Oui | Oui |

Annexe 2

Schéma de décroissance de l'activité en fonction du temps.



Annexe 3

Teneurs naturelles de quelques éléments traces dans les sols et apports anthropiques en ($\mu\text{g/g}$)

| | Teneurs naturelles en éléments traces dans les sols | | Apports anthropiques |
|---------------------|---|---|---------------------------------|
| | Concentration moyenne dans la croûte terrestre | Valeurs extrêmes relevées dans les roches | Nature des apports anthropiques |
| Cadmium (Cd) | 0.2 | 46 | 2 - 4 - 5 |
| Cobalt (Co) | 23 | 100 - 200 | 3 - 2 |
| Chrome (Cr) | 100 - 200 | 1 500 - 3 000 | 1 - 2 |
| Cuivre (Cu) | 45 - 70 | 80 - 150 | 3 - 4 - 5 |
| Nickel (Ni) | 80 | 2 000 | 3 |
| Plomb (Pb) | 13 - 16 | 30 | 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 |
| Zinc (Zn) | 70 - 132 | 120 | 3 - 4 - 5 - 6 |
| Mercure (Hg) | | 1 | 3 -4-6 |

(Baize, 1997)

Nature des apports anthropiques :

- 1 : retombées atmosphériques
- 2 : épandages boues de station d'épuration
- 3 : activités industrielles
- 4 : activités urbaines et trafic routier
- 5 : activités agricoles
- 6 : activités minières

Tableau des valeurs limites en ETM dans les sols (Baize, 1997)

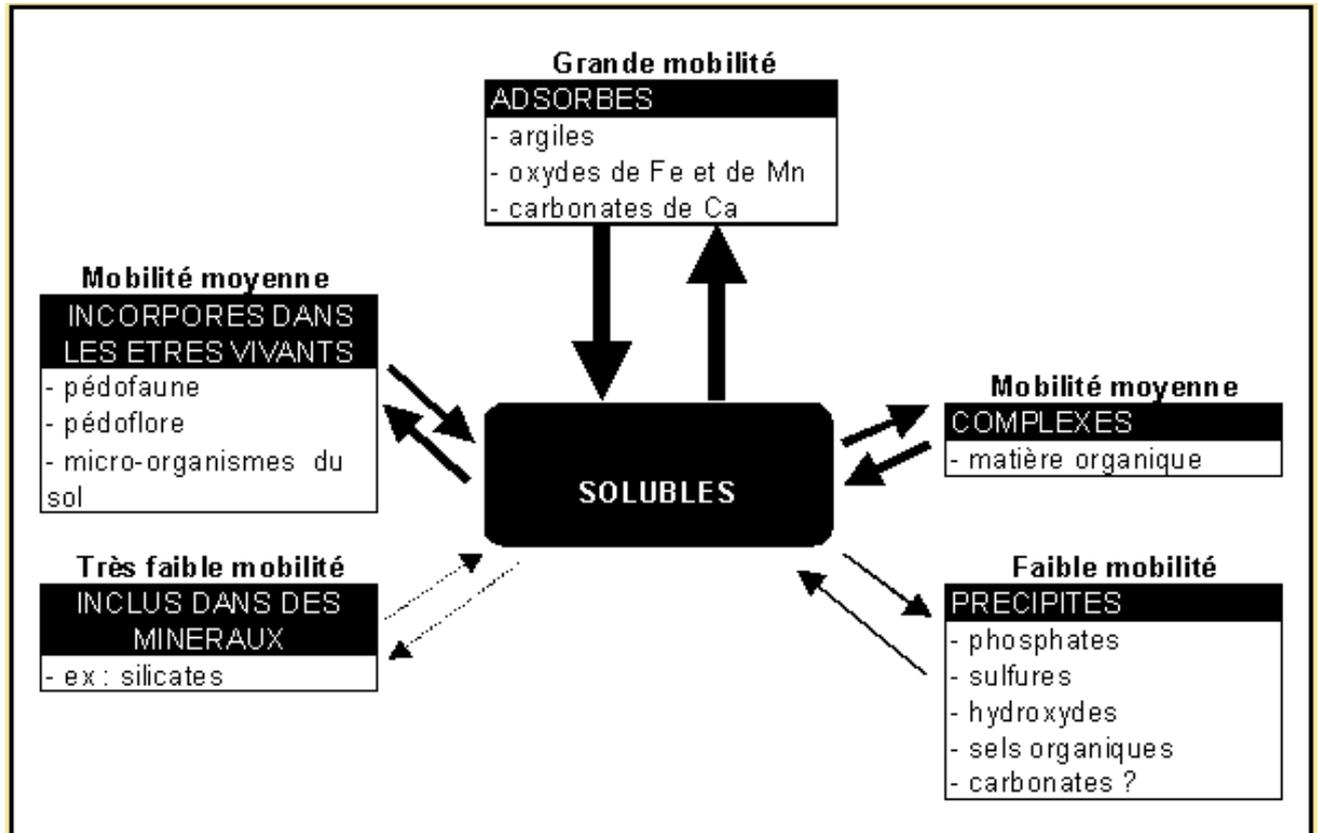
| Éléments | Cd | Cr | Cu | Hg | Ni | Pb | Zn |
|--|----|-----|-----|----|----|-----|-----|
| Valeurs limite ($\mu\text{g/g}$) | 2 | 150 | 100 | 1 | 50 | 100 | 300 |

Annexe 4

Sources industrielles et agricoles des éléments traces présents dans l'environnement (Brignon, 2005)

| Utilisations | Métaux |
|---|--|
| Batteries et autres appareils électriques | Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni, |
| Pigments et peintures | Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Cu, Fe |
| Alliages et soudures | Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, Cu |
| Biocides (pesticides, herbicides...) | As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn |
| Agents de catalyse | Ni, Hg, Pb, Cu, Sn |
| Verre | As, Sn, Mn |
| Engrais | Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn |
| Matières plastiques | Cd, Sn, Pb |
| Produits dentaires et cosmétiques | Sn, Hg |
| Textiles | Cr, Fe, Al |
| Raffineries | Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn |
| Carburants | Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd |

Annexe 5



Localisation des ETM dans les sols (juste, 1995, modifié)

Résumé :

L'industrie, le trafic routier, la corrosion des véhicules ou des infrastructures routières sont à l'origine d'une contamination de l'environnement par des éléments trace métalliques (ETM). A la différence de la plupart des contaminants organique, ces éléments sont des substances non biodégradables et potentiellement toxiques. Dans ce travail, on s'est intéressé à l'identification ainsi que la quantification des substances polluantes dans le sol afin d'évaluer la qualité de ce dernier au niveau du site situé au Centre de Recherche Nucléaire dans la commune de Draria à Alger. La technique utilisée était celle de l'Analyse par Activation Neutronique Instrumentale (INAA), qui est une technique connue notamment pour sa remarquable précision et sa grande sensibilité.

Mots clés:

Pollution des sols; éléments traces métalliques; Analyse par Activation Neutronique.

Abstract:

Industries, road traffic, corrosion of vehicles or road infrastructure, are causing contamination of the environment by metallic trace elements (ETM). Unlike most organic contaminants, these elements are non-biodegradable and potentially toxic. In this work, attention has been paid to the identification and quantification of polluting substances in the soil in order to assess the quality of the latter at the site located at the Nuclear Research Center in the commune of Draria in Algiers. The technique used was the instrumental Neutron Activation Analysis (INAA), which is a known technique notably for its remarkable precision and high sensitivity.

Keywords:

Soil pollution; trace elements; instrumental Neutron Activation Analysis

ملخص:

الصناعة، حركة المرور على الطرق، تآكل المركبات أو البنية التحتية للطرق تسبب تلوث البيئة بواسطة العناصر النزرة المعدنية (ETM) وخلافا لمعظم الملوثات العضوية، فإن هذه العناصر غير قابلة للتحلل ويمكن أن تكون سامة. في هذا العمل، أولي اهتمام لتحديد وتقدير المواد الملوثة في التربة من أجل تقييم نوعية هذه المواد في الموقع الواقع في مركز البحث النووي في بلدية دراريا بالجزائر العاصمة. وكانت التقنية المستخدمة هي التحليل النشط للنيوترون (INAA)، وهي تقنية معروفة خاصة لدقتها الملحوظة وحساسيتها العالية.

الكلمات الرئيسية:

تلوث الأرض، العناصر المعدنية الدقيقة، التحليل عن طريق التفعيل النيوتروني.