
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Akli MOHAND OULHADJ-Bouira

Faculté des Sciences & des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés



Mémoire

Présenté par

LENSARI Abdou Rabih

NASRI Nour Elhouda

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique



Évaluation de la Concentration en Métaux Lourds d'une Surface de sol Destinée à la Construction Bâtiment : Analyse Multitechnique et Résultats



Soutenue le 04 / 07 / 2024 devant le jury composé de :

Mr. HADIOUCHE D. MCB, Univ. Bouira Président du jury
Mr. KERNANI R. MCA, Univ. Bouira Encadreur
Mr. HAMDACHE A. MCA, Univ. Bouira Examineur

Année universitaire 2023/2024

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents

À mes chères sœurs et frères

Et mes amis : Fadoua, Nouha, Imane, Amira

N.A.F.R.I. Nour Elhouda

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents

À mes chère soeurs et frères

Et mes amis : Fadoua, Nouha, chikk, Hanane, Ghilass

LENSARI Abdou Rabih

Remerciement

Voici une suggestion de texte de remerciements que vous pouvez inclure dans votre mémoire de master :

—

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers M. KERNANI R., notre encadreur, pour sa précieuse guidance, ses conseils éclairés et son soutien constant tout au long de ce travail de recherche.

Mes remerciements vont également à HAMDACHE A et AOUDJIT F, examinateurs et membres du jury, pour leur expertise, leurs suggestions constructives et l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance au personnel de la division laboratoires "DLAB" pour leur collaboration précieuse, leur assistance technique et leur généreux soutien tout au long de cette étude.

Table des matières

List of Figures	viii
List of Tables	ix
Introduction générale	1
I Etude bibliographique	3
1 Problématique liés aux métaux lourds	4
1.1 Classification des métaux lourds	6
1.2 Rôles et effets toxiques potentiels des métaux	6
1.3 Caractéristiques communes de la dangerosité des métaux lourds	8
1.3.1 Exemples de métaux lourds toxiques	9
1.3.2 Persistants et bioaccumulables	9
1.4 Sources de métaux lourds, stocks et flux	10
1.4.1 Sources naturelles des métaux lourds	11
1.4.2 Sources anthropiques des métaux lourds	12
1.4.2.1 Sources Agricoles de Métaux Lourds	12
1.4.2.2 Sources industrielles de Métaux Lourds	14
1.4.2.3 Sources Urbaines de Métaux Lourds	16
1.5 Effets des métaux lourds sur l'environnement et les écosystèmes	18
1.5.1 Bio-accumulation des métaux lourds dans la chaîne alimentaire	18
1.5.2 Contamination des sols	19
1.5.3 Contamination de l'eau et de l'air	20
1.5.3.1 Contamination de l'eau	20
1.5.3.2 Contamination de l'air	21
1.6 Réglementation sur les métaux lourds	22
1.6.1 Réglementation sur les Métaux Lourds au Niveau Européen	22
1.6.2 Réglementation sur les Métaux Lourds au Niveau Algérien	24
1.7 Gestion des métaux lourds	25
1.8 Contamination des Sols Destinés à la Construction par les Métaux Lourds	26
1.8.1 Sources de Contamination	26
1.8.1.1 Sources Industrielles	27
1.8.2 Impacts sur les Projets de Construction	27

1.8.3	Méthodes de Détection	27
1.8.4	Stratégies de Gestion et de Remédiation	28
1.9	Stratégie d'Échantillonnage des Sols Contaminés par les Métaux Lourds	28
1.9.1	sites d'échantillonnage	28
1.9.2	Détermination de nombre et la répartition des échantillons	29
1.9.3	Collecte des échantillons	29
1.9.4	Procédure d'Analyse des Échantillons de Sol	29
1.9.4.1	Préparation des échantillons	29
II	Matériels et Méthodes	31
2	Matériels et Méthodes	32
2.1	Site et Stratégie d'Échantillonnage des Sols de la Région de Biskra	32
2.1.1	Objectifs de l'échantillonnage	32
2.1.2	Approche de l'échantillonnage	33
2.1.3	Collecte des échantillons	33
2.2	Analyse des échantillons	34
2.2.1	Préparation des échantillons	34
2.2.2	Méthodes d'analyse	34
2.2.2.1	Teneur en matière sèche et teneur en eau	34
2.2.2.2	Perte au Feu	35
2.2.2.3	Mesure du pH	35
2.2.2.4	Dosage des Chlorures (Méthode de Mohr)	35
2.3	Prétraitement des échantillons de sol pour l'analyse des métaux lourds	36
2.3.1	Lixiviation	36
2.3.2	Prétraitement des Échantillons de Sol par Attaque Acide	37
2.3.3	Prétraitement des Échantillons de Sol par Fusion	37
2.4	Analyse avec un Spectrométrie de masse associée à un plasma d'argon à couplage inductif (ICP-MS)	38
2.4.1	Composants et Configuration de l'ICP-MS	38
2.4.2	Alimentation en Gaz	39
2.4.3	Principe de Fonctionnement de l'ICP-MS	40
2.5	Analyse avec un spectrométrie d'absorption atomique (SAA Flamme)	41
2.5.1	Principe de Fonctionnement de la SAA	41
2.6	Analyse avec spectroscopie d'Émission Optique (ICP -OES)	42
2.6.1	Principe de Fonctionnement de l'ICP-OES	42
2.6.2	Comparaison entre les différentes techniques	43
III	Résultats et Discussion	45
3	Résultats et Discussion	46
3.1	Caractérisation des échantillons de sols	46
3.1.1	Teneur en eau	46
3.1.2	Perte au feu	46
3.1.3	Le pH	47
3.1.4	Les chlorures	47

3.2	Analyses métaux lourds	48
3.2.1	Analyses des métaux lourds par ICP/MS	49
3.2.1.1	Echantillons prétraité par lixiviation	49
3.2.1.2	Echantillons prétraité par l'attaque à l'acide	50
3.2.1.3	Echantillons prétraité par par Fusion	52
3.2.2	Analyses des métaux lourds par ICP/OES	53
3.2.3	Analyses du cadmium (Cd) et du fer (Fe) par spectrométrie d'absorption atomique (SAA)	56
3.2.4	Synthèse comparative	58

Bibliographie

Table des figures

1.1	Tableau périodique des éléments chimiques, mettant en évidence les éléments considérés comme des "métaux lourds"	10
1.2	Stocks et flux des éléments traces (sources Robert et Juste 1997)	11
1.3	Sources naturelles des métaux lourds	13
1.4	Sources anthropiques des métaux lourds	13
1.5	Pyramide De Bioaccumulation	19
1.6	Cycle du mercure	19
1.7	Phytodisponibilité des éléments traces dans les sols	20
2.1	schéma d'échantillonnage systématique	33
2.2	Spectrométrie de masse associée à un plasma d'argon à couplage inductif (ICP-MS).	39
2.3	Principe de ICP/MS.	40
2.4	Principe de ICP-OES.	42
2.5	Spectroscopie d'Émission Optique (ICP -OES)	43

Liste des tableaux

1.1	Sources Anthropiques de Quelques Métaux Lourds et leurs Utilisations . . .	17
1.2	Valeurs limites d'émission pour les rejets d'eaux usées résultant de l'épuration des gaz résiduaires (Journal officiel de l'Union européenne L 334/73)	23
2.1	Comparaison entre les différentes techniques	44
3.1	Teneur en eau	46
3.2	Perte au Feu des Échantillons de Sols	47
3.3	pH	47
3.4	Concentration du chlore et chlorure de sodium dans les Échantillons de sol	48
3.5	Analyses des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg) - Éléments 1 à 9	49
3.6	Analyses des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg) - Éléments 10 à 18 . .	49
3.7	Analyses des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg) - Éléments 1 à 9 (prétraitement à l'acide)	51
3.8	Analyses des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg) - Éléments 10 à 18 (prétraitement à l'acide)	51
3.9	Analyses des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg) - Éléments 1 à 7 (prétraitement par fusion)	52
3.10	Analyses des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg) - Éléments 8 à 15 (prétraitement par fusion)	52
3.11	Résultats d'analyse des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg)	54
3.12	Résultats d'analyse de Cd et Fe par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) (mg/kg)	57

Introduction

La qualité du sol joue un rôle crucial dans la viabilité et la durabilité des projets de construction et d'aménagement urbain. L'un des aspects essentiels de cette évaluation concerne la présence et la concentration des métaux lourds, qui peuvent influencer non seulement la stabilité structurale des fondations mais aussi la sécurité environnementale et sanitaire des utilisateurs finaux.

Les métaux lourds, tels que le plomb, le cadmium, le mercure et le zinc, sont naturellement présents dans l'environnement, mais leur accumulation dans le sol peut résulter de diverses activités humaines telles que l'industrie, l'agriculture intensive et même le trafic routier. Ces métaux peuvent être toxiques à des concentrations élevées, entraînant des risques pour la santé humaine et impactant négativement la biodiversité et les écosystèmes environnants.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la concentration en métaux lourds dans des échantillons de sol prélevés sur un site spécifique destiné à un projet de construction. Pour ce faire, une série de méthodes analytiques, incluant la lixiviation, l'attaque à l'acide et la fusion, ont été utilisées pour mesurer les concentrations de métaux tels que le plomb, le zinc, le cuivre et d'autres éléments potentiellement toxiques. Ces analyses permettent non seulement de quantifier la présence de métaux lourds mais aussi d'identifier les éventuelles sources de contamination et de proposer des mesures appropriées de gestion et de remédiation.

L'étude s'appuie sur une approche multidisciplinaire, combinant des techniques de chimie analytique avancées telles que l'ICP/MS et l'ICP/OES avec une analyse géochimique et une caractérisation détaillée des propriétés physiques et chimiques des échantillons de sol. Les résultats obtenus fourniront des informations cruciales pour orienter les décisions de planification urbaine durable, en assurant à la fois la sécurité des infrastructures construites et la préservation de l'environnement local.

Cette recherche contribue à enrichir les connaissances sur la gestion des ressources naturelles et sur l'impact environnemental des activités humaines, offrant ainsi une base scientifique solide pour des pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement.

Première partie

Etude bibliographique

Chapitre 1

Problématique liés aux métaux lourds

Introduction

Le terme "métal lourd" fait référence à des métaux spécifiques basés sur leur densité volumique. Ces métaux incluent le cobalt, l'aluminium, le zinc et le cuivre, qui sont couramment associés à la contamination environnementale et à des implications pour la santé. Des études ont montré que l'exposition au cobalt peut entraîner des altérations significatives dans les communautés de nématodes, différentes espèces montrant des sensibilités variées à ce métal lourd. De plus, des recherches ont mis en évidence des niveaux élevés de zinc et de cuivre chez les patients diabétiques avec des infections du pied, classés selon la classification de Wagner, indiquant un rôle potentiel de ces oligo-éléments dans la détermination de la gravité de l'infection et des résultats. En outre, l'utilisation de biocapsules contenant des cellules bactériennes entières a été proposée pour détecter certains métaux lourds, soulignant l'importance de méthodes de détection innovantes dans les efforts de surveillance et de remédiation environnementales [1].

L'appellation de métaux lourds est le plus souvent considérée à partir de deux notions :

Notion de densité

Contrairement à la plupart des contaminants organiques, les métaux lourds sont des éléments métalliques naturels, comprenant des métaux et parfois des métalloïdes. Environ 65 éléments sont classifiés comme métaux lourds. Ces éléments se distinguent par une forte masse volumique, supérieure à 5 g/cm³ (Temmar, 2016). Cette caractéristique physique les différencie des autres contaminants et leur confère des propriétés spécifiques en termes de réactivité et de persistance dans l'environnement. Leur densité élevée est souvent associée à leur capacité de se déposer dans les sédiments et les sols, où ils peuvent rester pendant de longues périodes, posant ainsi un risque de contamination prolongée [2].

Notion de toxicité

Les métaux lourds sont également reconnus pour leur toxicité. Ces polluants s'accumulent dans l'organisme après une exposition à court ou à long terme, un processus connu sous le nom de bioaccumulation. Cette accumulation peut mener à des effets dévastateurs sur divers systèmes et fonctions biologiques. Par exemple :

- Système nerveux : Les métaux lourds tels que le plomb et le mercure sont neurotoxiques et peuvent causer des dommages significatifs au système nerveux central et périphérique. L'exposition à ces métaux peut entraîner des troubles cognitifs, des problèmes de développement chez les enfants et des maladies neurodégénératives chez les adultes.
- Fonctions rénales : Les reins sont particulièrement vulnérables à la toxicité des métaux lourds comme le cadmium et le mercure. L'accumulation de ces métaux peut entraîner des dommages rénaux, une diminution de la fonction rénale et, dans les cas graves, une insuffisance rénale.
- Fonctions hépatiques : Le foie, principal organe de détoxification de l'organisme, peut également être affecté par des métaux lourds tels que l'arsenic et le cuivre. L'exposition chronique peut provoquer des hépatites toxiques, une fibrose hépatique, voire un cancer du foie.
- Fonctions respiratoires : L'inhalation de poussières ou de vapeurs contenant des métaux lourds comme le nickel et le chrome peut entraîner des maladies respiratoires

chroniques, incluant des inflammations pulmonaires, des bronchites chroniques, et un risque accru de cancer du poumon [3].

1.1 Classification des métaux lourds

La classification des métaux lourds (toxiques), qui ne sont pas uniquement lourds ou métalliques, est une tâche complexe en raison d'éléments comme le zinc et l'arsenic. Pour y remédier, de nombreux scientifiques préfèrent utiliser le terme "Éléments Traces Métalliques" (ETM) ou simplement "éléments traces" pour la classification. Ces éléments, incluant l'arsenic, le cadmium, le mercure et le plomb, sont considérés comme des métaux lourds classiques en raison de leurs niveaux de toxicité élevés. La toxicité de ces éléments peut varier en fonction de la concentration et de la durée d'exposition, certains étant essentiels pour les fonctions biologiques tandis que d'autres n'ont aucun rôle biologique connu. Les métaux lourds comme l'arsenic, le cadmium, le plomb et le mercure sont connus pour leur persistance, leur accumulation et leurs effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement. Diverses activités industrielles libèrent des métaux lourds comme le cadmium, le mercure et le chrome dans les écosystèmes, posant des risques pour les organismes vivants et nécessitant des méthodes efficaces de retrait des eaux usées [4].

1.2 Rôles et effets toxiques potentiels des métaux

Ces éléments peuvent jouer un rôle crucial dans de nombreux processus cellulaires à l'état de trace et se trouvent en proportions très faibles dans les tissus des êtres vivants. Bien que ces métaux lourds soient indispensables au bon fonctionnement biologique, leur toxicité peut augmenter considérablement lorsque leur concentration dépasse un certain seuil [5].

Cuivre (Cu)

- Rôle biologique : Le cuivre est un cofacteur essentiel pour plusieurs enzymes, impliqué dans le métabolisme énergétique, la formation de collagène, et le fonctionnement du système nerveux.

- Toxicité : Une surcharge en cuivre peut provoquer des troubles gastro-intestinaux, des dommages hépatiques, et des troubles neurologiques.

Nickel (Ni)

- Rôle biologique : Le nickel participe à certaines réactions enzymatiques et est impliqué dans le métabolisme des lipides.
- Toxicité : À des concentrations élevées, le nickel peut causer des dermatites, des problèmes respiratoires, et un risque accru de cancer du poumon.

Zinc (Zn)

- Rôle biologique : Le zinc est crucial pour la fonction immunitaire, la synthèse protéique, et la cicatrisation des plaies. Il est également un cofacteur pour plus de 300 enzymes.
- Toxicité : Un excès de zinc peut entraîner des nausées, des vomissements, des pertes d'appétit, des crampes abdominales, et des déficiences immunitaires.

Fer (Fe)

- Rôle biologique : Le fer est essentiel pour le transport de l'oxygène dans le sang via l'hémoglobine, ainsi que pour la respiration cellulaire.
- Toxicité : Une surcharge en fer peut causer des lésions hépatiques, des troubles cardiovasculaires, et des dommages oxydatifs aux cellules.

Cobalt (Co)

- Rôle biologique : Le cobalt est un composant clé de la vitamine B12, nécessaire pour la formation des globules rouges et le maintien du système nerveux central.
- Toxicité : Une exposition excessive au cobalt peut provoquer des effets cardiotoxiques et une toxicité thyroïdienne.

Manganèse (Mn)

- Rôle biologique : Le manganèse est un cofacteur pour les enzymes impliquées dans le métabolisme des acides aminés, des lipides et des glucides.
- Toxicité :** Une accumulation excessive de manganèse peut entraîner des troubles neurologiques similaires à la maladie de Parkinson.

Chrome (Cr)

- Rôle biologique : Le chrome intervient dans le métabolisme des glucides et des lipides et est nécessaire pour l'action de l'insuline.
- Toxicité : Le chrome hexavalent (Cr VI) est particulièrement toxique et peut causer des cancers, des lésions cutanées, et des problèmes respiratoires.

Sélénium (Se)

- Rôle biologique : Le sélénium est essentiel pour le fonctionnement de certaines enzymes antioxydantes et la protection contre les dommages oxydatifs.
- Toxicité : Une surcharge en sélénium peut provoquer la sélénose, caractérisée par la chute des cheveux, des ongles cassants, des troubles neurologiques et gastro-intestinaux.

Vanadium (V)

- Rôle biologique : Le vanadium joue un rôle dans le métabolisme osseux et peut avoir des effets sur la régulation de la glycémie.
- Toxicité : À des concentrations élevées, il peut provoquer des irritations respiratoires, des troubles gastro-intestinaux et des lésions hépatiques [6].

1.3 Caractéristiques communes de la dangerosité des métaux lourds

Certains éléments n'ont aucun effet bénéfique connu pour les cellules, mais leur accumulation dans les tissus biologiques a des effets toxiques et polluants pour les organismes vivants, même à très faible concentration. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), et du cadmium (Cd). Ces éléments sont des micropolluants capables de causer des nuisances importantes même lorsqu'ils sont rejetés en quantités minimales. Leur toxicité est particulièrement problématique en raison de leur tendance à la bioaccumulation le long de la chaîne alimentaire. La dangerosité des métaux lourds pour les organismes vivants est causée par plusieurs caractéristiques communes :

- Non biodégradables et persistants au cours du temps : Les métaux lourds ne se décomposent pas facilement dans l'environnement, ce qui les rend persistants et contribue à leur accumulation progressive dans les écosystèmes.
- Toxiques dès qu'ils dépassent les limites de tolérance : Même à des concentrations relativement faibles, les métaux lourds peuvent dépasser les seuils de tolérance des organismes vivants, provoquant divers effets toxiques.
- Tendance à s'accumuler dans les organismes vivants : Les métaux lourds s'accumulent dans les tissus des organismes vivants, augmentant leur concentration au fil du temps et au fur et à mesure des transferts de matière dans les chaînes trophiques [7].

1.3.1 Exemples de métaux lourds toxiques

Plomb (Pb)

- Toxicité : Le plomb est neurotoxique et peut causer des problèmes cognitifs et de développement, en particulier chez les enfants. Il affecte également le système cardiovasculaire et rénal.
- Sources de pollution : Les sources incluent les vieilles peintures, les batteries, les carburants plombés, et certaines industries.

Mercure (Hg)

- Toxicité : Le mercure peut endommager le système nerveux central, provoquer des troubles moteurs et sensoriels, et affecter le développement cérébral chez les fœtus.
- Sources de pollution : Les sources majeures sont les émissions industrielles, les déchets médicaux, et les amalgames dentaires.

Cadmium (Cd)

- Toxicité : Le cadmium affecte principalement les reins et peut provoquer des maladies rénales, des perturbations du métabolisme du calcium et des problèmes osseux.
- Sources de pollution : Les principales sources incluent les batteries, les plastiques, et les engrais phosphatés [8].

1.3.2 Persistants et bioaccumulables

Les métaux lourds sont problématiques car ils ne sont pas biodégradables et persistent dans l'environnement. Leur capacité à se bioaccumuler et à se biomagnifier signifie qu'ils deviennent plus concentrés à chaque niveau de la chaîne alimentaire. Par exemple, les petits organismes aquatiques absorbent les métaux lourds présents dans l'eau, les poissons se nourrissent de ces organismes, et les humains consomment les poissons, conduisant à une concentration accrue de métaux lourds dans les tissus humains [9].

Le terme "métaux lourds" est associé à divers métaux et métalloïdes présents dans le tableau périodique, notamment à partir de la première série de transition. Bien que ce terme soit parfois critiqué pour son manque de précision scientifique, il reste couramment utilisé dans la littérature et les études pour désigner un groupe d'éléments avec des propriétés toxiques similaires. Tout au long de cette étude, nous utiliserons le terme métaux lourds à pour harmoniser la terminologie utilisée [10].

hydrogen 1 H 1.0079																	helium 2 He 4.0026																														
lithium 3 Li 6.941	beryllium 4 Be 9.0122											boron 5 B 10.811	carbon 6 C 12.011	nitrogen 7 N 14.007	oxygen 8 O 15.999	fluorine 9 F 18.998	neon 10 Ne 20.180																														
sodium 11 Na 22.990	magnesium 12 Mg 24.305											aluminium 13 Al 26.982	silicon 14 Si 28.086	phosphorus 15 P 30.974	sulfur 16 S 32.065	chlorine 17 Cl 35.453	argon 18 Ar 39.948																														
potassium 19 K 39.098	calcium 20 Ca 40.078	scandium 21 Sc 44.956	titanium 22 Ti 47.867	vanadium 23 V 50.942	chromium 24 Cr 51.996	manganese 25 Mn 54.938	iron 26 Fe 55.845	cobalt 27 Co 58.933	nickel 28 Ni 58.693	copper 29 Cu 63.546	zinc 30 Zn 65.38	gallium 31 Ga 69.723	germanium 32 Ge 72.64	arsenic 33 As 74.922	selenium 34 Se 78.971	bromine 35 Br 79.904	krypton 36 Kr 83.798																														
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62	yttrium 39 Y 88.906	zirconium 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	molybdenum 42 Mo 95.94	technetium 43 Tc [98]	ruthenium 44 Ru 101.07	rhodium 45 Rh 102.91	palladium 46 Pd 106.42	silver 47 Ag 107.87	cadmium 48 Cd 112.4	indium 49 In 114.82	tin 50 Sn 118.71	antimony 51 Sb 121.757	tellurium 52 Te 127.60	iodine 53 I 126.90	xenon 54 Xe 131.29																														
caesium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33											hafnium 72 Hf 178.49	tantalum 73 Ta 180.95	tungsten 74 W 183.84	rhenium 75 Re 186.21	osmium 76 Os 190.23	iridium 77 Ir 192.22	palladium 78 Pd 195.08	gold 79 Au 196.97	mercury 80 Hg 200.59	thallium 81 Tl 204.38	lead 82 Pb 207.2	bismuth 83 Bi 208.98	polonium 84 Po [209]	astatine 85 At [210]	radon 86 Rn [222]																					
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]											rutherfordium 104 Rf [261]	dubnium 105 Db [262]	seaborgium 106 Sg [266]	bohrium 107 Bh [264]	hassium 108 Hs [277]	meitnerium 109 Mt [268]	darmstadtium 110 Ds [271]	roentgenium 111 Rg [272]																												
																		lanthanum 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodymium 59 Pr 140.91	neodymium 60 Nd 144.24	promethium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.96	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.93	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.93	erbium 68 Er 167.26	thulium 69 Tm 168.93	ytterbium 70 Yb 173.05	lutetium 71 Lu 174.97	actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.04	protactinium 91 Pa 231.04	uranium 92 U 238.03	neptunium 93 Np [237]	plutonium 94 Pu [244]	americium 95 Am [243]	curium 96 Cm [247]	berkelium 97 Bk [247]	californium 98 Cf [251]	einsteinium 99 Es [252]	fermium 100 Fm [257]	mendelevium 101 Md [258]	nobelium 102 No [259]	lawrencium 103 Lr [262]

FIGURE 1.1: Tableau périodique des éléments chimiques, mettant en évidence les éléments considérés comme des "métaux lourds"

1.4 Sources de métaux lourds, stocks et flux

Les stocks et flux des éléments traces, notamment les métaux lourds, jouent un rôle crucial dans les écosystèmes et la santé environnementale. Comprendre ces concepts est essentiel pour évaluer l'impact des activités humaines et naturelles sur la distribution et la mobilité de ces éléments [11].

Les stocks d'éléments traces se réfèrent aux quantités totales de ces éléments présents dans un compartiment donné de l'environnement, tels que le sol, l'eau, ou l'air [12].

- La composition des roches-mères influence la quantité et le type de métaux lourds disponibles.
- Les sols peuvent stocker de grandes quantités de métaux lourds, influencés par la matière organique, le pH et les minéraux argileux.
- Les particules atmosphériques peuvent contenir des métaux lourds provenant de sources naturelles (comme les volcans) ou anthropiques (comme les émissions industrielles)[13].

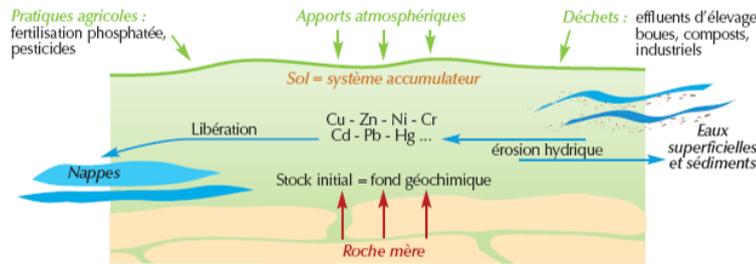


FIGURE 1.2: Stocks et flux des éléments traces (sources Robert et Juste 1997)

Les flux d'éléments traces se réfèrent aux mouvements de ces éléments entre différents compartiments de l'environnement, comme le transfert du sol à l'eau ou à l'atmosphère [14].

- Les processus d'érosion peuvent libérer des métaux lourds des sols et des roches, tandis que la sédimentation peut les déposer dans des nouvelles zones.
- L'eau de pluie peut lessiver les métaux lourds des sols vers les cours d'eau, influençant ainsi leur distribution aquatique.
- Certains métaux lourds, comme le mercure, peuvent se volatiliser et être transportés sur de longues distances par l'atmosphère.
- Les industries, l'agriculture et le transport contribuent de manière significative aux flux d'éléments traces par l'émission de polluants dans l'air, l'eau et le sol [15].

Les flux de métaux lourds peuvent entraîner une accumulation dans certains compartiments environnementaux, conduisant à des niveaux toxiques qui affectent la santé des écosystèmes et des organismes vivants. Les métaux lourds peuvent être bioaccumulés dans la chaîne alimentaire, affectant ainsi les animaux et les humains [16].

1.4.1 Sources naturelles des métaux lourds

Les éléments traces sont présents naturellement dans les sols en fonction de leurs caractéristiques géologiques, connues sous le terme de concentration pédo-géochimique naturelle. Ces métaux proviennent principalement des processus géologiques (géogène) et des cycles biologiques. Comprendre ces sources naturelles est crucial pour distinguer les niveaux de contamination anthropique et évaluer les impacts environnementaux [17].

Les métaux lourds se retrouvent dans tous les compartiments de l'environnement (Kerch et Vernus, 2001). Ils constituent une part naturelle de la croûte terrestre et sont donc

toujours présents dans le sol, l'eau souterraine et l'eau de surface (Miquel, 2001). La composition et la concentration des métaux lourds dépendent de plusieurs éléments : le type de roche, les conditions environnementales et l'activation du processus de vieillissement [18].

La formation des sols provient principalement de roches sédimentaires. Cependant, de nombreuses roches ignées, telles que l'olivine, l'augite et la hornblende, contribuent des quantités considérables de Mn, Co, Ni, Cu et Zn aux sols. Les volcans sont connus pour émettre des niveaux élevés d'Al, Zn, Mn, Pb, Ni, Cu et Hg, accompagnés de gaz toxiques et nocifs (Seaward M.R.D et Richardson D.H.S., 1990). On estime que les volcans libèrent annuellement entre 800 et 1400 tonnes de cadmium dans le monde [19].

Les poussières transportées par le vent et les éruptions volcaniques jouent un rôle important dans l'apport de particules à l'écosystème et influencent les bilans de métaux lourds. La poussière d'origine éolienne, provenant de régions désertiques comme le Sahara, contient des niveaux élevés de Fe et de moindres quantités de Mn, Zn, Cr, Ni et Pb (Ross S.M., 1994). Les aérosols marins et les incendies de forêt exercent également une influence majeure sur le transport de certains métaux lourds dans divers environnements (Davidson C.L et al., 1985). Par exemple, les émissions de l'Etna en Sicile comprennent 10^9 à 10^6 kg par an de Cd, ainsi que du Cr, Cu, Mn et Zn (Climino G et Ziino M., 1983). Les métaux lourds volatils, tels que Hg et Se, font partie de la matière carbonée produite au cours des incendies de forêt [20].

1.4.2 Sources anthropiques des métaux lourds

Les métaux lourds d'origine anthropique sont présents sous des formes chimiques assez réactives, ce qui engendre des risques bien supérieurs à ceux posés par les métaux d'origine naturelle, qui sont généralement immobilisés sous des formes relativement inertes

1.4.2.1 Sources Agricoles de Métaux Lourds

Les sources les plus importantes de métaux lourds dans l'agriculture proviennent principalement des engrais inorganiques et organiques. Les engrais sont des substances ajoutées au sol pour améliorer la croissance des plantes et le rendement. Cependant, leur utilisation intensive peut entraîner une pollution significative des sols et des eaux [21].



FIGURE 1.3: Sources naturelles des métaux lourds



FIGURE 1.4: Sources anthropiques des métaux lourds

1. **Engrais Inorganiques** : Ces engrais sont des produits chimiques fabriqués industriellement, souvent à base de minéraux. Ils contiennent des nutriments essentiels comme l'azote, le phosphore et le potassium, mais peuvent également inclure des traces de métaux lourds. Les engrais phosphatés, en particulier, sont connus pour contenir des niveaux variables de cadmium (Cd), de chrome (Cr), de nickel (Ni), de plomb (Pb) et de zinc (Zn). Ces métaux lourds proviennent des matières premières utilisées dans la fabrication des engrais.

2. **Engrais Organiques** : Ces engrais proviennent de matières d'origine biologique, comme le fumier, le compost et les boues d'épuration. Bien que généralement bénéfiques pour la structure du sol et la biodiversité, les engrais organiques peuvent également contenir des métaux lourds en raison de la contamination des matières premières ou de la présence de polluants dans les sources de déchets organiques.
3. **Boues d'épuration** : Les boues d'épuration, également appelées biosolides, sont des sous-produits du traitement des eaux usées. Lorsqu'elles sont utilisées comme amendements de sol en agriculture, elles peuvent introduire des métaux lourds dans le sol. Les boues d'épuration peuvent contenir des métaux tels que le Cd, le Cr, le Ni, le Pb et le Zn, en fonction de la composition des eaux usées traitées.
4. **Irrigation et Eaux de Rejet** : L'irrigation avec des eaux contaminées est une autre source de métaux lourds dans l'agriculture. Les eaux de surface et les eaux souterraines peuvent contenir des niveaux élevés de métaux lourds en raison de la contamination industrielle ou des ruissellements urbains. L'utilisation de ces eaux pour l'irrigation peut entraîner une accumulation de métaux lourds dans le sol et les plantes.
5. **Pesticides et Fongicides** : Les pesticides, y compris les fongicides, sont utilisés pour protéger les cultures contre les ravageurs et les maladies. Cependant, certains de ces produits contiennent des métaux lourds comme le cuivre (Cu) et le mercure (Hg). L'utilisation répétée de ces produits peut entraîner une accumulation de métaux lourds dans le sol [22].

1.4.2.2 Sources industrielles de Métaux Lourds

Les sources industrielles des éléments traces métalliques incluent l'exploitation minière, le raffinage des métaux, et d'autres activités industrielles. L'exploitation minière, en particulier, est une opération qui émet différents métaux lourds en fonction du type de mine. Par exemple, les mines de charbon sont connues pour libérer des métaux tels que l'arsenic (As), le cadmium (Cd), et le fer (Fe). Les extractions d'or, quant à elles, deviennent une source importante d'émissions de mercure (Hg) en raison de l'utilisation de ce métal dans le processus de récupération de l'or. De plus, les anciennes mines d'or, même abandonnées, continuent de libérer du mercure, contribuant ainsi à la pollution persistante de l'environnement (Lacerda L.D., 1997). Ces activités minières, en dépit de

leur importance économique, posent de sérieux risques environnementaux, nécessitant des mesures de gestion et de remédiation rigoureuses pour minimiser leur impact négatif [23].

Transformation et Raffinement des Métaux

Les opérations de transformation des métaux à haute température, telles que la fonte et le moulage, émettent des métaux lourds sous forme de particules et de vapeurs. Ces métaux, en se combinant avec l'eau présente dans l'atmosphère, forment des aérosols. Ces aérosols peuvent être dispersés par le vent (dépôt sec) ou déposés par les précipitations (dépôt humide), provoquant ainsi la contamination des sols et des plans d'eau [24].

Raffineries et Traitement des Métaux

Les raffineries, par leurs divers procédés de traitement, sont également une source significative de contamination par les métaux lourds. Les différents types de traitement dans ces installations libèrent des métaux tels que le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), et le nickel (Ni) dans l'environnement [25].

Combustion de Combustibles et Installations Énergétiques

La combustion de pétrole, l'exploitation des centrales nucléaires et les lignes à haute tension contribuent également à la dispersion de nombreux métaux lourds dans l'environnement. Les métaux impliqués incluent le sélénium (Se), le bore (B), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le césium (Cs) et le nickel (Ni) [26].

Autres Sources Industrielles

En plus des sources mentionnées, plusieurs autres industries contribuent à la pollution par les métaux lourds :

1. Traitement des Matières Plastiques et Textiles : - Les procédés de fabrication et de traitement des plastiques et textiles peuvent libérer divers métaux lourds dans l'environnement.
2. Microélectronique : - L'industrie de la microélectronique utilise des métaux lourds dans la production de composants électroniques, entraînant des émissions potentielles.

3. Préservation du Bois et Traitement du Papier : - Les produits chimiques utilisés pour préserver le bois et traiter le papier contiennent souvent des métaux lourds, contribuant à leur dispersion [27].

1.4.2.3 Sources Urbaines de Métaux Lourds

Les zones urbaines sont des sources significatives de pollution par les métaux lourds, contribuant de manière substantielle à la contamination des rivières, des lacs et des zones côtières [28].

Eaux Usées :

Les eaux usées constituent la principale source de métaux lourds dans les cours d'eau et les lacs urbains. Les effluents domestiques peuvent être composés d'eaux usées non traitées ou uniquement traitées mécaniquement. Même après un traitement biologique, les substances résiduelles qui passent à travers les filtres contiennent souvent des traces de métaux lourds. Ces matières résiduelles, lorsqu'elles sont déchargées dans les plans d'eau, finissent souvent par atteindre la mer, particulièrement dans les zones résidentielles côtières [29].

Détergents et Produits Ménagers :

L'utilisation de détergents dans les ménages urbains pose également un risque de pollution par les métaux lourds. Les détergents enzymatiques, en particulier, contiennent des traces de métaux tels que le fer (Fe), le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le cobalt (Co), le zinc (Zn), le strontium (Sr) et le bore (B). Ces métaux peuvent affecter la qualité de l'eau lorsque les eaux usées ménagères sont déversées sans traitement adéquat dans les systèmes de drainage urbains [30].

Activités et Émissions Domestiques :

Les activités domestiques et les cheminées contribuent également à la pollution par les métaux lourds. La combustion de bois, de charbon ou d'autres combustibles dans les foyers libère des métaux lourds dans l'atmosphère, qui peuvent se déposer dans les sols et les eaux environnantes [31].

Émissions des Véhicules :

Les gaz d'échappement des voitures et des camions sont une autre source majeure de métaux lourds dans les environnements urbains. Les émissions de ces véhicules contiennent des métaux tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le nickel (Ni) et le cuivre (Cu), qui peuvent se déposer sur les routes et les sols, puis être lessivés par les pluies, contaminant ainsi les eaux de ruissellement urbaines [32].

TABLE 1.1: Sources Anthropiques de Quelques Métaux Lourds et leurs Utilisations

Métal	Sources et Utilisations
Plomb (Pb)	Antidétonant, batteries, pigments en peinture et céramique, plastique, verrerie, alliage, soudure, canalisation et tubage, soufflage des câbles, munitions, rayons X, protection contre les radiations, production de verre optique.
Mercure (Hg)	Extraction des métaux par amalgamation, cathode mobile en industrie chlore-alcali pour la production de NaCl et Cl ₂ des saumures, appareils électriques et de mesure, fongicide, amalgames dentaires, réactifs, lampes à vapeur de mercure, pesticides et biocides, thermomètres, baromètres, batteries, production d'or, désinfectants, instruments de laboratoire.
Cadmium (Cd)	Batteries Ni-Cd, pigments, revêtement métallique anticorrosif, stabilisateur des PVC, alliages, combustion du charbon, panneaux solaires, composants électroniques, plastiques, engrais, fabrication de pigments jaunes, production de semi-conducteurs.
Chrome (Cr)	Alliage pour fer et acier inoxydable, métallisation, pigments, coloration textile et tannage de cuir, passivation des circuits de refroidissement, conservateur du bois, stockage audio, vidéo et de données, fabrication de céramiques réfractaires, production de catalyseurs, traitements de surface, production de verre coloré.
Cuivre (Cu)	Bon conducteur de chaleur et d'électricité, canalisation d'eau, ustensiles, produits chimiques et équipements pharmaceutiques, pigments, alliages, électronique, câbles électriques, pièces de monnaie, moteurs électriques, toitures, tuyauterie, systèmes de chauffage, panneaux solaires, production de bronze et de laiton, aquaculture (comme biocide).
Zinc (Zn)	Alliage de zinc (bronze, laiton), revêtement métallique anticorrosif, batteries, boîtes et bidons, stabilisateur de PVC, médicaments et produits chimiques, industrie du caoutchouc, soudure, nutriments dans l'agriculture, protection des ponts, des toits et des bâtiments contre la corrosion, production de teintures et d'encres, composants électroniques, déodorants.
Cobalt (Co)	Métallurgie (en superalliages), céramiques, diamants, aimants, lunettes, peintures, produits chimiques, alliages pour turbines d'avion, batteries Li-ion, catalyseurs, production de verre coloré, outils de coupe, colorants pour céramiques et verres, électrodes pour batteries rechargeables, radiographie industrielle [33].

1.5 Effets des métaux lourds sur l'environnement et les écosystèmes

Les métaux lourds (ETM) d'origine anthropique, présents en quantités et sous formes variées dans les environnements marins, terrestres et atmosphériques, causent des dégâts considérables. Souvent, ces dangers ne sont pas perceptibles à l'oeil nu ou sur une courte période.

1. Bioaccumulation : Les métaux lourds peuvent s'accumuler dans les organismes vivants, passant à travers les chaînes alimentaires et atteignant des concentrations dangereuses dans les prédateurs supérieurs, y compris les humains.
2. Contamination des sols : L'accumulation de métaux lourds dans les sols peut entraîner une dégradation de la qualité des terres agricoles, affectant la croissance des plantes et la santé des écosystèmes.
3. Contamination de l'eau : Les métaux lourds peuvent se dissoudre dans les sources d'eau, contaminant les nappes phréatiques et les cours d'eau, ce qui pose des risques pour la santé humaine et animale.
4. Air pollué : Les particules fines contenant des métaux lourds peuvent être inhalées, entraînant des maladies respiratoires et d'autres problèmes de santé à long terme.
5. Perturbation des écosystèmes : La présence de métaux lourds peut perturber les équilibres naturels des écosystèmes, affectant la biodiversité et la survie de certaines espèces [34].

1.5.1 Bio-accumulation des métaux lourds dans la chaîne alimentaire

Les métaux lourds sont des polluants biocumulatifs, c'est-à-dire qu'ils ont la capacité de s'accumuler dans les tissus des organismes vivants qui les ingèrent, car ils ne sont pas dégradés par l'organisme. Ce processus cumulatif expose les consommateurs finaux dans une chaîne alimentaire à un risque accru d'accumuler des métaux lourds. Ceux-ci sont transférés par prédation à partir d'organismes primaires ou secondaires vivant dans un milieu contaminé. Par conséquent, les concentrations de métaux lourds augmentent progressivement dans la chaîne alimentaire, selon la position des organismes dans cette chaîne. Ce phénomène de bioaccumulation et de biomagnification coexiste [35].

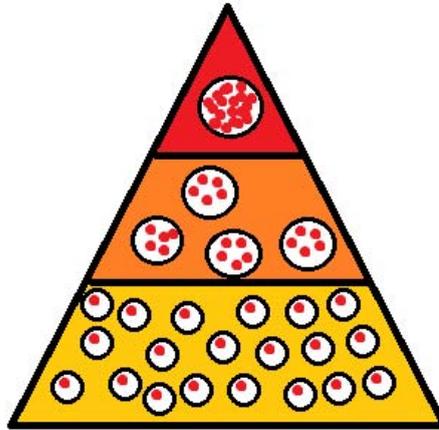


FIGURE 1.5: Pyramide De Bioaccumulation

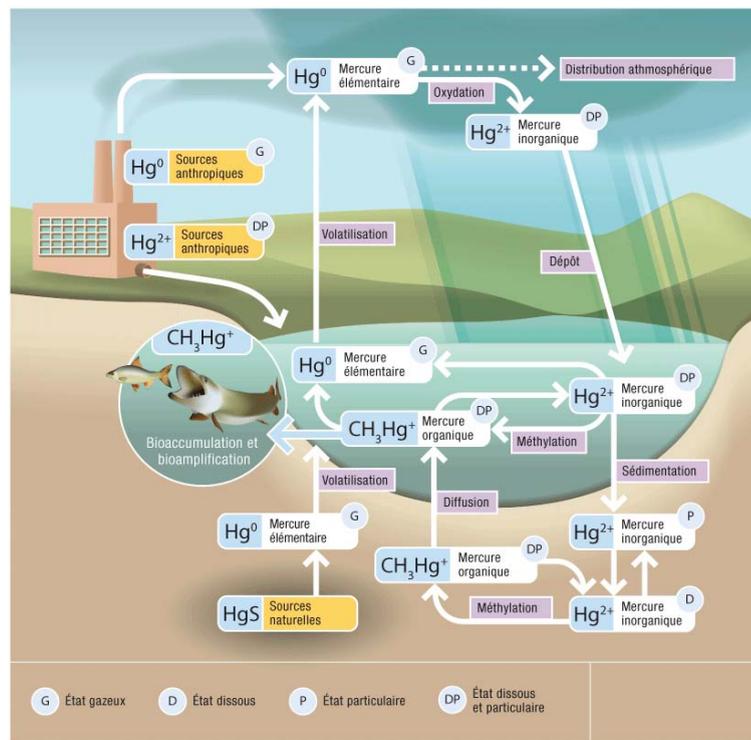


FIGURE 1.6: Cycle du mercure

1.5.2 Contamination des sols

L'utilisation de compost pour fertiliser les sols pauvres en éléments minéraux peut introduire des quantités significatives de certains métaux traces tels que le cuivre (Cu), le zinc (Zn) et le fer (Fe). Ces éléments, bien que nécessaires en petites quantités pour la croissance des plantes, peuvent s'accumuler dans les sols à des niveaux toxiques. Cette accumulation de métaux dans les sols cultivés pose des problèmes de phytotoxicité, affectant la santé des plantes et réduisant les rendements agricoles. Par exemple, des

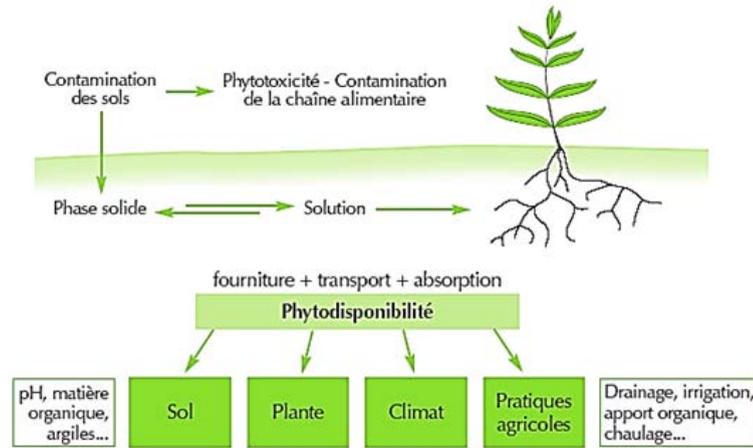


FIGURE 1.7: Phytodisponibilité des éléments traces dans les sols

concentrations élevées de zinc peuvent être particulièrement toxiques pour des cultures sensibles comme les cacahuètes. Le phénomène de phytotoxicité lié à l'accumulation de métaux lourds dans les sols a été largement documenté [36].

En plus de la phytotoxicité, cette accumulation peut entraîner une diminution de la biodiversité du sol, altérant les micro-organismes bénéfiques et les insectes essentiels pour la santé des sols. Les métaux lourds peuvent également se déplacer vers les nappes phréatiques, contaminant ainsi les sources d'eau potable. Ces effets négatifs soulignent l'importance de surveiller et de réguler l'utilisation de compost et d'autres amendements organiques pour prévenir la contamination des sols et protéger la santé des écosystèmes agricoles [37].

1.5.3 Contamination de l'eau et de l'air

1.5.3.1 Contamination de l'eau

La contamination de l'eau par les métaux lourds est un problème majeur qui affecte les écosystèmes aquatiques et la santé humaine. Les métaux lourds peuvent pénétrer dans les sources d'eau par diverses voies, notamment le ruissellement agricole, les rejets industriels, les eaux usées domestiques et les dépôts atmosphériques. Une fois dans l'eau, ces métaux peuvent se dissoudre ou se fixer aux particules en suspension, contaminant ainsi les rivières, les lacs, les nappes phréatiques et les océans [38].

Effets sur les écosystèmes aquatiques

- Toxicité pour la faune aquatique : Les métaux lourds, tels que le mercure (Hg), le plomb (Pb) et le cadmium (Cd), sont hautement toxiques pour les organismes aquatiques. Ils peuvent causer des dommages aux branchies, aux organes internes et aux systèmes reproducteurs des poissons et autres animaux aquatiques [39].
- Bioaccumulation : Les métaux lourds s'accumulent dans les tissus des organismes aquatiques, augmentant ainsi les concentrations à chaque niveau trophique de la chaîne alimentaire. Ce phénomène, connu sous le nom de biomagnification, expose les prédateurs supérieurs, y compris les humains, à des niveaux toxiques de métaux lorsqu'ils consomment des poissons et autres produits de la mer contaminés [40].
- Perturbation des écosystèmes : La contamination des eaux peut altérer les équilibres écologiques, affectant la biodiversité et la structure des communautés aquatiques [41].

Effets sur la santé humaine

- Consommation d'eau potable contaminée : L'ingestion d'eau contenant des métaux lourds peut provoquer diverses maladies, notamment des troubles neurologiques, rénaux et hépatiques .
- Consommation de produits de la mer contaminés : La consommation de poissons et de fruits de mer contaminés par des métaux lourds peut entraîner une exposition chronique à des niveaux toxiques de ces substances, avec des effets graves sur la santé, en particulier chez les populations sensibles comme les enfants et les femmes enceintes [42].

1.5.3.2 Contamination de l'air

La contamination de l'air par les métaux lourds résulte principalement des émissions industrielles, des incinérateurs de déchets, de la combustion des carburants fossiles et de l'exploitation minière. Les métaux lourds, sous forme de particules fines ou de vapeurs, peuvent être transportés sur de longues distances par les courants atmosphériques avant de retomber sur le sol et l'eau, contaminant ainsi de vastes zones géographiques [43].

Effets sur la santé humaine :

- Inhalation de particules fines : Les particules fines contenant des métaux lourds peuvent être inhalées profondément dans les poumons, provoquant des maladies respiratoires telles que l'asthme, la bronchite chronique et le cancer du poumon. Le plomb, par

exemple, est particulièrement préoccupant en raison de ses effets neurotoxiques, en particulier chez les enfants.

- Absorption par la peau : Certains métaux lourds peuvent également être absorbés par la peau, contribuant à l'exposition totale de l'organisme [44].

Effets sur l'environnement

- Dépôt sur les sols et les eaux : Les métaux lourds déposés par voie atmosphérique peuvent contaminer les sols et les cours d'eau, exacerbant les problèmes de pollution terrestre et aquatique .

- Impact sur la végétation : La contamination de l'air peut affecter la végétation en endommageant les feuilles, en réduisant la photosynthèse et en compromettant la croissance des plantes .

La gestion de la contamination de l'eau et de l'air par les métaux lourds nécessite des réglementations strictes des émissions industrielles, une surveillance constante de la qualité de l'eau et de l'air, et des pratiques agricoles et industrielles durables pour minimiser la libération de ces substances toxiques dans l'environnement [45].

1.6 Réglementation sur les métaux lourds

1.6.1 Réglementation sur les Métaux Lourds au Niveau Européen

L'Union Européenne a mis en place plusieurs règlements et directives pour contrôler et réduire la pollution causée par les métaux lourds dans l'eau, l'air et le sol.

Directive-Cadre sur l'Eau (DCE)

La Directive-Cadre sur l'Eau (DCE) 2000/60/CE vise à atteindre un bon état écologique et chimique des eaux souterraines, des eaux superficielles et des eaux côtières. Cette directive impose aux États membres de réduire les émissions, les rejets et les pertes de substances prioritaires, parmi lesquelles figurent des métaux lourds comme le cadmium, le plomb, le nickel et le mercure. Les valeurs seuil pour ces métaux sont spécifiques et dépendent du fond géochimique naturel [46, 47].

Directive n°2010/75/UE sur les Émissions Industrielles

Cette directive, aussi connue sous le nom de Directive sur la prévention et la réduction intégrées de la pollution (IPPC), vise à minimiser la pollution de l'eau, de l'air et du sol par les installations industrielles et agricoles. Elle impose des normes strictes pour les émissions de métaux lourds et autres polluants industriels [40, 48].

TABLE 1.2: Valeurs limites d'émission pour les rejets d'eaux usées résultant de l'épuration des gaz résiduaux (Journal officiel de l'Union européenne L 334/73)

Substance polluante	Valeurs limites d'émission pour des échantillons non filtrés (mg/l sauf dans le cas des dioxines et furannes)	
	(95 %)	(100 %)
1. Total des solides en suspension tels que définis à l'annexe I de la directive 91/271/CEE	30	45
2. Mercure et ses composés, exprimés en mercure (Hg)	0,03	
3. Cadmium et ses composés, exprimés en cadmium (Cd)	0,05	
4. Thallium et ses composés, exprimés en thallium (Tl)	0,05	
5. Arsenic et ses composés, exprimés en arsenic (As)	0,15	
6. Plomb et ses composés, exprimés en plomb (Pb)	0,2	
7. Chrome et ses composés, exprimés en chrome (Cr)	0,5	
8. Cuivre et ses composés, exprimés en cuivre (Cu)	0,5	
9. Nickel et ses composés, exprimés en nickel (Ni)	0,5	
10. Zinc et ses composés, exprimés en zinc (Zn)	1,5	
11. Dioxines et furannes	0,3 ng/l	

Règlement (CE) n° 166/2006 sur le Registre Européen des Émissions et des Transferts de Polluants (E-PRTR)

Ce règlement oblige les installations industrielles à déclarer leurs émissions de métaux lourds. Il couvre une large gamme de métaux, dont le mercure, le cadmium et le plomb, et assure une transparence dans le suivi et le contrôle de la pollution industrielle [48, 49].

Directive n° 2008/50/CE sur la Qualité de l'Air

Cette directive établit des limites pour les concentrations de métaux lourds dans l'air ambiant, y compris l'arsenic, le cadmium, le mercure et le nickel. Elle vise à protéger la santé humaine et l'environnement contre les effets néfastes de la pollution atmosphérique [48?].

Directive sur l'Eau Potable (Directive 98/83/CE révisée)

La directive sur l'eau potable fixe des normes de qualité strictes pour les métaux lourds dans l'eau destinée à la consommation humaine. Des seuils maximums sont établis pour

des métaux comme le plomb et le cadmium, et des mesures doivent être prises pour surveiller et garantir la conformité de l'eau potable à ces normes [50?].

Convention de Minamata sur le Mercure

Bien que ce soit une initiative mondiale, l'UE est un acteur clé dans la mise en œuvre de la Convention de Minamata, qui vise à protéger la santé humaine et l'environnement contre les émissions anthropiques de mercure et de ses composés. Cette convention impose des restrictions strictes sur l'utilisation et l'émission de mercure, renforçant ainsi les mesures déjà en place dans l'UE [48?].

1.6.2 Réglementation sur les Métaux Lourds au Niveau Algérien

1. Cadre réglementaire général : - La loi n°83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement. - Le décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006 fixant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides.

2. Valeurs limites pour les rejets liquides :

- Le décret exécutif n°06-141 fixe les valeurs limites pour les métaux lourds suivants :

- Mercure (Hg) : 0,05 mg/L
- Cadmium (Cd) : 0,2 mg/L
- Chrome hexavalent (Cr6+) : 0,1 mg/L
- Plomb (Pb) : 0,5 mg/L
- Cuivre (Cu) : 0,5 mg/L
- Zinc (Zn) : 3 mg/L
- Nickel (Ni) : 0,5 mg/L

3. Contrôle et sanctions : - Les rejets sont soumis à un contrôle périodique par les autorités compétentes. - Le non-respect des valeurs limites peut entraîner des sanctions administratives et pénales.

4. Obligations des entreprises : - Mettre en place des dispositifs de traitement des effluents pour respecter les normes. - Effectuer un suivi régulier de la qualité des rejets et transmettre les résultats aux autorités. - Obtenir les autorisations nécessaires avant tout rejet dans l'environnement.

Cette réglementation vise à encadrer et à limiter les rejets de métaux lourds dans l'environnement afin de préserver la santé publique et l'écosystème [51].

1.7 Gestion des métaux lourds

1. Identification des sources de pollution :

- Inventaire exhaustif des secteurs industriels, miniers, agricoles et autres générant des rejets de métaux lourds (industries chimiques, métallurgiques, tanneries, mines, etc.).
- Évaluation précise des types de métaux lourds présents, de leurs concentrations et des quantités rejetées.
- Cartographie des zones à risque de contamination par les métaux lourds [52].

2. Traitement des effluents :

- Obligation pour les entreprises de mettre en place des unités de prétraitement physico-chimique ou biologique des effluents avant rejet.
- Techniques de traitement utilisées : précipitation, coagulation-floculation, adsorption, échange ionique, etc.
- Respect strict des normes de rejet fixées pour chaque métal lourd (Hg, Cd, Cr, Pb, Cu, Zn, Ni, etc.).
- Contrôle régulier de la qualité des rejets par les autorités et sanctions en cas de non-conformité.
- Accompagnement technique et financier des entreprises pour la mise aux normes [53].

3. Gestion des déchets contaminés :

- Identification et caractérisation détaillée des différents types de déchets contaminés (boues, cendres, résidus, etc.).
- Mise en place de filières de collecte, de transport et d'élimination dans des centres de stockage ou d'incinération agréés.
- Obligation de traçabilité et de suivi des déchets dangereux jusqu'à leur élimination finale.
- Développement de technologies de stabilisation ou de valorisation des déchets contaminés [54].

4. Dépollution des sites contaminés :

- Inventaire et hiérarchisation des sites pollués en fonction des niveaux de contamination.
- Études approfondies de caractérisation des sols et des eaux souterraines polluées.
- Mise en IJuvre de techniques de dépollution adaptées : excavation, confinement, lavage des sols, phytoremédiation, etc.
- Réhabilitation et réaménagement des sites dépollués [55].

5. Surveillance et suivi environnemental :

- Mise en place de réseaux de surveillance de la qualité des milieux (air, eau, sol, sédiments) au niveau national et local.
- Suivi régulier des teneurs en métaux lourds dans les différents compartiments de l'environnement.
- Évaluation des impacts sanitaires et environnementaux liés à la contamination par les métaux lourds.
- Information et sensibilisation du public sur les risques et les mesures de prévention [56].

1.8 Contamination des Sols Destinés à la Construction par les Métaux Lourds

La contamination des sols par les métaux lourds constitue un enjeu significatif pour les terrains destinés à la construction, influençant à la fois la santé humaine et l'environnement. Les sources de contamination des sols peuvent être variées, incluant les activités industrielles, les rejets miniers, l'utilisation de produits chimiques agricoles, et les émissions des véhicules. Cette pollution est préoccupante car les métaux lourds, tels que le plomb, le mercure, l'arsenic, le cadmium, et le chrome, peuvent persister dans l'environnement et s'accumuler dans la chaîne alimentaire, entraînant des effets toxiques à long terme [57].

1.8.1 Sources de Contamination

Les sources de métaux lourds dans les sols incluent principalement les activités industrielles et minières. Les usines de traitement des métaux, les installations de production d'énergie et les dépôts de déchets industriels sont souvent responsables de la libération

de ces polluants. Les pesticides et les fertilisants utilisés en agriculture sont également des contributeurs majeurs, tout comme les émissions des véhicules et des incinérateurs [58].

1.8.1.1 Sources Industrielles

- Anciennes Sites Industriels : Les anciens sites industriels peuvent être contaminés par des métaux lourds en raison des activités passées, comme la métallurgie, l'extraction minière et les usines de produits chimiques.
- Décharges et Dépôts de Déchets : Les décharges non contrôlées et les dépôts de déchets peuvent libérer des métaux lourds dans le sol. Sources Urbaines
- Pollution des Véhicules : Les émissions des véhicules et l'usure des pneus et des freins peuvent contribuer à la contamination des sols par des métaux lourds comme le plomb et le cadmium.
- Activités de Construction Antérieures : Les matériaux de construction et les peintures contenant des métaux lourds peuvent laisser des résidus toxiques dans le sol [59].

1.8.2 Impacts sur les Projets de Construction

La présence de métaux lourds dans les sols peut affecter gravement les projets de construction. Les sols contaminés nécessitent des évaluations et des traitements spécifiques pour être sécurisés avant le développement. Les coûts de remédiation peuvent être élevés, et les retards dans les projets peuvent résulter de la nécessité de décontaminer les sites. De plus, les risques pour la santé des travailleurs et des futurs résidents doivent être évalués et gérés de manière adéquate [60].

1.8.3 Méthodes de Détection

La détection des métaux lourds dans les sols repose sur diverses techniques analytiques, telles que la spectrométrie de masse, la fluorescence X, et la spectroscopie d'absorption atomique. Ces méthodes permettent de quantifier précisément la concentration des métaux lourds et de cartographier leur distribution dans les sols [61].

1.8.4 Stratégies de Gestion et de Remédiation

Les stratégies de gestion des sols contaminés incluent des techniques de confinement, d'excavation, et de traitement. Le confinement consiste à isoler les contaminants pour prévenir leur dispersion. L'excavation permet de retirer les sols contaminés pour les traiter ou les disposer dans des sites sécurisés. Les traitements peuvent être chimiques, tels que la stabilisation ou la solidification, ou biologiques, comme la phytoremédiation qui utilise des plantes pour absorber et stabiliser les métaux lourds .

1.9 Stratégie d'Échantillonnage des Sols Contaminés par les Métaux Lourds

La première étape dans la stratégie d'échantillonnage consiste à définir clairement les objectifs de l'étude. Cela peut inclure l'évaluation de l'ampleur de la contamination, la détermination des sources de métaux lourds, ou le suivi de l'efficacité des mesures de remédiation. Des objectifs bien définis permettent de guider la planification de l'échantillonnage et de s'assurer que les données collectées seront pertinentes et utiles pour les analyses ultérieures .

1.9.1 sites d'échantillonnage

L'identification des zones potentiellement contaminées est une étape cruciale. Les sites doivent être choisis en fonction des activités passées ou présentes susceptibles d'avoir contribué à la contamination par les métaux lourds, telles que les anciennes usines industrielles, les décharges non contrôlées, ou les zones agricoles intensivement traitées avec des pesticides. Une cartographie préalable des zones suspectes, basée sur des études historiques et des enquêtes préliminaires, peut aider à cibler les zones les plus pertinentes pour l'échantillonnage .

1.9.2 Détermination de nombre et la répartition des échantillons

Pour obtenir une représentation adéquate de la zone étudiée, il est essentiel de déterminer le nombre optimal d'échantillons nécessaires. L'utilisation de techniques statistiques, telles que l'échantillonnage aléatoire stratifié ou l'échantillonnage systématique, peut aider à garantir que les échantillons sont représentatifs de la variabilité spatiale de la contamination. Le nombre d'échantillons doit être suffisamment élevé pour couvrir l'étendue de la zone étudiée, tout en tenant compte des contraintes de temps et de budget. Une répartition judicieuse des points d'échantillonnage permet de minimiser les biais et d'améliorer la précision des estimations des niveaux de contamination.

1.9.3 Collecte des échantillons

La collecte des échantillons de sol doit être réalisée selon des protocoles rigoureux pour éviter toute contamination croisée et garantir la représentativité des échantillons. Les échantillons doivent être prélevés à différentes profondeurs pour évaluer la distribution verticale des métaux lourds. Des outils propres et appropriés sont utilisés, et chaque échantillon doit être correctement étiqueté et stocké dans des conditions qui préservent son intégrité. Une documentation précise des procédures de prélèvement est également essentielle pour assurer la traçabilité et la reproductibilité des résultats.

1.9.4 Procédure d'Analyse des Échantillons de Sol

La sélection des métaux lourds à analyser doit être guidée par les normes et les réglementations en vigueur, ainsi que par la nature présumée de la contamination. Par exemple, les sites industriels anciens peuvent nécessiter des analyses pour le plomb, le mercure, et le cadmium, tandis que les zones agricoles peuvent nécessiter des tests pour le cuivre et le zinc. Une analyse ciblée permet de concentrer les ressources sur les contaminants les plus pertinents, assurant ainsi une évaluation efficace et complète de la contamination.

1.9.4.1 Préparation des échantillons

Avant les analyses, les échantillons de sol doivent être préparés selon des protocoles spécifiques. Cela inclut des étapes comme le séchage à l'air libre ou dans un four, le

broyage pour obtenir une granulométrie homogène, et la digestion chimique pour extraire les métaux lourds du sol. Ces préparations sont cruciales pour garantir que les analyses ultérieures soient précises et reproductibles. Chaque étape doit être soigneusement contrôlée pour éviter toute perte ou contamination des échantillons, assurant ainsi la fiabilité des résultats.

Deuxième partie

Matériels et Méthodes

Chapitre 2

Matériels et Méthodes

2.1 Site et Stratégie d'Échantillonnage des Sols de la Région de Biskra

Introduction

L'échantillonnage des sols est une étape essentielle pour obtenir des données précises et représentatives sur la contamination par les métaux lourds. Pour la région de Biskra, quatre échantillons de sol ont été prélevés dans le cadre de cette étude visant à vérifier la conformité aux réglementations en vigueur. Cette section présente la planification de la procédure d'échantillonnage, les objectifs et la méthodologie suivie, en mettant l'accent sur l'approche systématique adoptée.

2.1.1 Objectifs de l'échantillonnage

L'objectif clé est de vérifier que les niveaux de contamination de sol respectent les normes et les réglementations environnementales en vigueur. Cela est crucial pour assurer la sécurité environnementale et la protection de la santé publique.

2.1.2 Approche de l'échantillonnage

Le schéma d'échantillonnage systématique adopté est illustré sur la figure ???. Les points d'échantillonnage sont disposés selon une grille régulière couvrant la zone d'étude. Ce schéma garantit une couverture exhaustive et aide à identifier les zones de contamination potentielle avec précision.

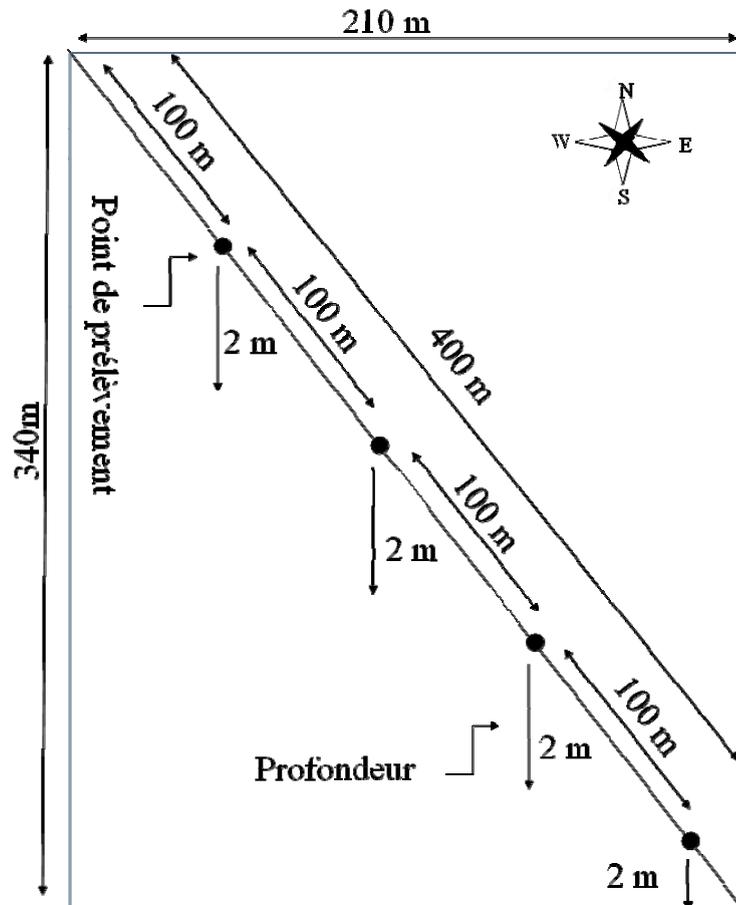


FIGURE 2.1: schéma d'échantillonnage systématique

2.1.3 Collecte des échantillons

Les échantillons de sol sont prélevés en suivant un protocole rigoureux pour éviter toute contamination croisée et garantir la représentativité des échantillons. Chaque échantillon est prélevé à une profondeur uniforme et est soigneusement stocké et étiqueté pour l'analyse ultérieure.

2.2 Analyse des échantillons

2.2.1 Préparation des échantillons

Avant l'analyse, les échantillons de sol sont préparés selon des procédures standardisées, incluant le séchage, le broyage et la digestion chimique. Cette préparation est essentielle pour obtenir des résultats d'analyse précis et reproductibles.

2.2.2 Méthodes d'analyse

Les échantillons de sol prélevés dans la région de Biskra sont soumis à diverses analyses pour déterminer leurs propriétés physiques et chimiques. Les analyses incluent la teneur en matière sèche et en eau, la perte au feu, la mesure du pH et le dosage des chlorures par la méthode de Mohr. Ces paramètres fournissent des informations essentielles sur la qualité et la contamination des sols, permettant une évaluation complète et précise de l'état environnemental du site.

2.2.2.1 Teneur en matière sèche et teneur en eau

Déterminer la proportion de matière sèche et d'eau dans les échantillons de sol est crucial pour évaluer l'état hydrique et la capacité de rétention d'eau du sol. Ces données sont essentielles pour comprendre le comportement du sol et sa capacité à soutenir la végétation et les activités humaines.

Méthodologie :

- Prélèvement d'un échantillon représentatif : Un échantillon de sol est prélevé et pesé immédiatement pour obtenir la masse humide.
- Séchage : L'échantillon est séché à 105°C pendant 24 heures dans une étuve pour éliminer toute l'eau libre.
- Pesée de l'échantillon sec : Après séchage, l'échantillon est de nouveau pesé pour obtenir la masse sèche.

$$\text{- Teneur en eau (\%)} = \frac{\text{Masse humide} - \text{Masse sèche}}{\text{Masse humide}} \times 100$$

$$\text{- Teneur en matière sèche (\%)} = \frac{\text{Masse sèche}}{\text{Masse humide}} \times 100$$

2.2.2.2 Perte au Feu

La perte au feu (PAF) permet de déterminer la quantité de matière organique et d'autres composés volatils présents dans le sol. Cette mesure est utile pour évaluer la fertilité du sol et la présence de contaminants organiques.

Méthodologie

- Prélèvement d'un échantillon sec : Un échantillon de sol sec, obtenu après la détermination de la teneur en matière sèche, est pesé.
- Calcination : L'échantillon est chauffé à 550°C dans un four pendant 4 heures pour brûler la matière organique.
- Pesée de l'échantillon calciné : L'échantillon est refroidi dans un dessiccateur puis pesé pour obtenir la masse après calcination.

$$\text{- Perte au feu (\%)} = \frac{\text{Masse sèche} - \text{Masse après calcination}}{\text{Masse sèche}} \times 100$$

2.2.2.3 Mesure du pH

La mesure du pH du sol est essentielle pour comprendre son acidité ou alcalinité, qui affecte la disponibilité des nutriments pour les plantes et l'activité microbienne. Le pH du sol influence également la mobilité et la toxicité des métaux lourds.

Méthodologie

- Préparation d'une suspension de sol : 10 g de sol sec sont mélangés à 25 mL d'eau distillée ou d'une solution de chlorure de potassium (KCl) à 0,01 M.
- Agitation : La suspension est agitée pendant 30 minutes pour assurer un bon mélange.
- Mesure du pH : Un pH-mètre calibré est utilisé pour mesurer le pH de la suspension après agitation et stabilisation.

2.2.2.4 Dosage des Chlorures (Méthode de Mohr)

Le dosage des chlorures dans le sol permet de déterminer la concentration en ions chlorure, qui peut provenir de sources naturelles ou de la pollution anthropique. Les chlorures influencent la salinité du sol, ce qui peut affecter la croissance des plantes et la qualité de l'eau souterraine.

Méthodologie

- Préparation d'un extrait de sol : Un échantillon de sol est mélangé avec de l'eau distillée et agité pour extraire les ions chlorure.
- Titration : La solution extraite est titrée avec une solution de nitrate d'argent (AgNO_3) en présence de chromate de potassium (K_2CrO_4) comme indicateur.
- Point de fin : Le point de fin de la titration est indiqué par le changement de couleur de la solution, passant du jaune au rouge brique, marquant la précipitation du chromate d'argent (Ag_2CrO_4).

2.3 Prétraitement des échantillons de sol pour l'analyse des métaux lourds

Pour garantir des résultats précis et fiables dans l'analyse des métaux lourds dans les échantillons de sol, il est essentiel de réaliser un prétraitement adéquat. Les méthodes couramment utilisées incluent la lixiviation, l'attaque acide et la fusion. Chacune de ces méthodes permet de préparer les échantillons de manière à libérer les métaux lourds présents, facilitant ainsi leur quantification.

2.3.1 Lixiviation

La lixiviation est une méthode qui permet d'extraire les métaux lourds du sol en utilisant une solution aqueuse. Cette méthode est particulièrement utile pour évaluer la mobilité des métaux dans l'environnement.

1. Préparation de l'échantillon :

- l'échantillon de sol est séché dans un four à basse température (environ $40\text{ }^\circ\text{C}$) pour éviter la perte de composés volatils.
- l'échantillon est broyé pour obtenir une granulométrie uniforme.

2. Lixiviation :

- une quantité précise de sol est dans un flacon,
- un volume d'eau distillée est ajouté, souvent de l'eau distillée,
- la suspension est agitée à l'aide d'un agitateur mécanique.

3. Filtration et Collecte :

- la suspension est filtré pour séparer le résidu solide du lixiviat à l'aide d'un papier filtre.
- le lixiviat est collecté pour analyse ultérieure des métaux lourds.

2.3.2 Prétraitement des Échantillons de Sol par Attaque Acide

L'attaque acide permet de décomposer la matrice du sol pour libérer les métaux lourds, rendant ainsi l'ensemble des métaux présents disponibles pour l'analyse.

- l'échantillon de sol est séché dans un four à basse température (environ 40 °C) pour éviter la perte de composés volatils.
- l'échantillon est broyé pour obtenir une granulométrie uniforme.
- Séchage à 105 °C, ce séchage est crucial pour garantir que les mesures de poids ultérieures soient précises et ne soient pas affectées par l'eau contenue dans les échantillons.
- Calcination à 450 °C,
- Après calcination, retirer la capsule du four et laisser refroidir à température ambiante dans un dessiccateur pour éviter l'absorption d'humidité.
- Un Volume de 10 mL d'acide fluorhydrique (HF) et 3 mL d'acide perchlorique (HClO₄) sont ajoutés dans le bécher contenant le résidu. et chauffé à 160 °C.
- Après évaporation, 2 mL d'acide chlorhydrique (HCl) et quelques millilitres d'eau déminéralisée sont ajoutés au résidu sec.

Ce prétraitement par est essentiel pour libérer et quantifier les métaux lourds présents dans les échantillons de sol.

2.3.3 Prétraitement des Échantillons de Sol par Fusion

Le prétraitement des échantillons de sol par fusion est une méthode utilisée pour homogénéiser les matériaux solides, facilitant ainsi leur analyse ultérieure. Cette technique est couramment employée en chimie analytique et en métallurgie pour préparer des échantillons difficiles à dissoudre par des méthodes conventionnelles, en particulier pour l'analyse des métaux lourds.

- l'échantillon de sol est séché dans un four à basse température (environ 40 °C) pour éviter la perte de composés volatils.
- l'échantillon est broyé pour obtenir une granulométrie uniforme.
- Une quantité appropriée de métaborate de lithium ou de tétraborate de lithium est ajouté (typiquement 10 fois la masse de l'échantillon) dans un creuset en platine.
- le creuset est placé dans un four à haute température** préchauffé à environ 900-1000 °C.
- l'échantillon est Chauffé jusqu'à ce que l'échantillon et le flux fondent complètement pour former un mélange homogène. Cette étape dure généralement entre 30 minutes et 1 heure. L'échantillon est ensuite refroidis à température ambiante dans un dessiccateur pour éviter l'absorption d'humidité.
- l'acide chlorhydrique (HCl) à 38 % est ajouté pour dissoudre complètement la perle.
- un chauffage à 160°C pour accélérer la dissolution.
- de l'eau déminéralisée distillée est ajouté pour aider à la dissolution complète de la perle.

2.4 Analyse avec un Spectrométrie de masse associée à un plasma d'argon à couplage inductif (ICP-MS)

L'instrument ICP-MS utilisé pour ce travail est un modèle Agilent série 7700x, acquis par le laboratoire de géochimie minérale en février 2015. L'ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) est une technique analytique physico-chimique permettant de mesurer simultanément presque tous les éléments chimiques en traces et ultra-traces. Cet appareil est équipé de diverses composantes essentielles pour une analyse précise et efficace des échantillons.

2.4.1 Composants et Configuration de l'ICP-MS

- Passeur automatique avec station de rinçage : Permet l'introduction automatisée des échantillons et le nettoyage entre chaque analyse pour éviter la contamination croisée.
- Pompe péristaltique : Assure le débit constant des solutions d'échantillons vers le nébuliseur.

- Nébuliseur concentrique type Meinhardt : Convertit les échantillons liquides en un aérosol fin pour l'analyse.
- Chambre de nébulisation type Scott : Stabilise l'aérosol avant qu'il n'entre dans la torche en quartz.
- Torche en quartz : Utilisée pour atomiser et ioniser les échantillons à une température élevée d'environ 10 000 K.
- Générateur de haute fréquence de 27 MHz : Fournit la puissance nécessaire pour maintenir le plasma.
- Spectromètre de masse : Sépare, identifie et quantifie les éléments de l'échantillon en fonction de leur masse.

2.4.2 Alimentation en Gaz

- Argon : Fournit à partir de bouteilles avec une pureté minimale de 99,9999%.
- Hélium : Utilisé à partir de bouteilles avec une pureté minimale de 99,999%.

Le système complet est contrôlé par le logiciel Mass Hunter, permettant une gestion intégrée des analyses et des données.



FIGURE 2.2: Spectrométrie de masse associée à un plasma d'argon à couplage inductif (ICP-MS).

2.4.3 Principe de Fonctionnement de l'ICP-MS

La spectrométrie de masse est une technique analytique qui repose sur la séparation, l'identification et la quantification des éléments d'un échantillon en fonction de leur masse. L'ICP-MS combine une torche à plasma pour générer des ions et un spectromètre de masse pour séparer ces ions selon leur rapport masse/charge.

L'analyse par ICP-MS se déroule en quatre étapes principales :

1. Introduction et nébulisation : L'échantillon est introduit dans le nébuliseur où il est transformé en aérosol.
2. Ionisation : L'aérosol est introduit dans le plasma, où il est atomisé et ionisé.
3. Séparation en masse : Les ions sont dirigés vers le spectromètre de masse où ils sont séparés en fonction de leur masse.
4. Détection : Les ions séparés sont détectés et quantifiés.

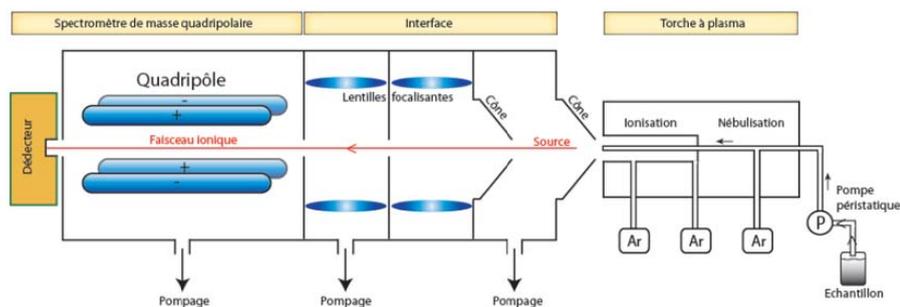


FIGURE 2.3: Principe de ICP/MS.

L'ICP-MS Agilent série 7700x est un instrument puissant et polyvalent pour l'analyse des éléments en traces et ultra-traces dans les échantillons de sol. Grâce à ses composants avancés et à son logiciel de contrôle, il offre une grande précision et efficacité dans la quantification des métaux lourds et autres éléments. Les caractéristiques techniques et la configuration de l'appareil assurent des résultats fiables et reproductibles, essentiels pour les études de géochimie minérale et autres applications analytiques.

2.5 Analyse avec un spectrométrie d'absorption atomique (SAA Flamme)

La spectrométrie d'absorption atomique (SAA) est une technique analytique introduite pour la première fois par Walsh en 1955. Elle repose sur l'étude des absorptions de lumière par les atomes libres et est couramment utilisée en analyse chimique pour détecter et quantifier une soixantaine d'éléments chimiques, y compris les métaux et certains non-métaux. La SAA utilise la spectroscopie atomique dans le domaine UV-visible et permet d'atteindre des concentrations inférieures au mg/L (ppm), ce qui en fait une méthode très sensible et précise.

2.5.1 Principe de Fonctionnement de la SAA

La SAA fonctionne en plusieurs étapes clés :

1. Aspiration et Nébulisation :
 - La solution contenant l'élément à analyser est aspirée à travers un capillaire et dirigée vers un nébuliseur.
 - Le nébuliseur pulvérise la solution à grande vitesse, créant un aérosol qui est ensuite introduit dans une chambre de nébulisation.
 - Les grosses gouttes sont éliminées grâce à une bille brise-jet, permettant uniquement aux fines gouttelettes de progresser.
2. Vaporisation et Combustion :
 - L'aérosol est transporté par le gaz combustible à travers le brûleur.
 - À la sortie du brûleur, la solution est soumise à une combustion dans une flamme, provoquant la dissociation thermique des composés en atomes libres.
3. Absorption et Détection :
 - Une lampe à cathode creuse, émettant le spectre de l'élément à analyser, projette des radiations incidentes à travers la flamme.
 - Les atomes libres absorbent ces radiations spécifiques.
 - La quantité de lumière absorbée est mesurée, ce qui permet de déterminer la concentration de l'élément présent dans la solution.

2.6 Analyse avec spectroscopie d'Émission Optique (ICP-OES)

L'ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy) est une technique utilisée pour analyser les échantillons par détection de la lumière émise via une spectroscopie optique. Elle est particulièrement efficace pour analyser les éléments en traces dans les échantillons de sol.

2.6.1 Principe de Fonctionnement de l'ICP-OES

Les échantillons liquides sont transformés en aérosol à l'aide d'un nébuliseur. L'aérosol est introduit dans une torche à plasma où les échantillons sont excités à haute température par un plasma à couplage inductif. Les éléments présents dans l'échantillon sont excités dans le plasma et émettent des spectres d'émission caractéristiques. La haute fréquence du plasma permet une excitation efficace des éléments, générant des émissions lumineuses spécifiques. Les spectres d'émission sont dispersés par un spectromètre à réseau. L'intensité des raies spectrales est mesurée par un détecteur. Les signaux du détecteur sont traités pour compenser les variations du bruit de fond, assurant ainsi une analyse précise et fiable.

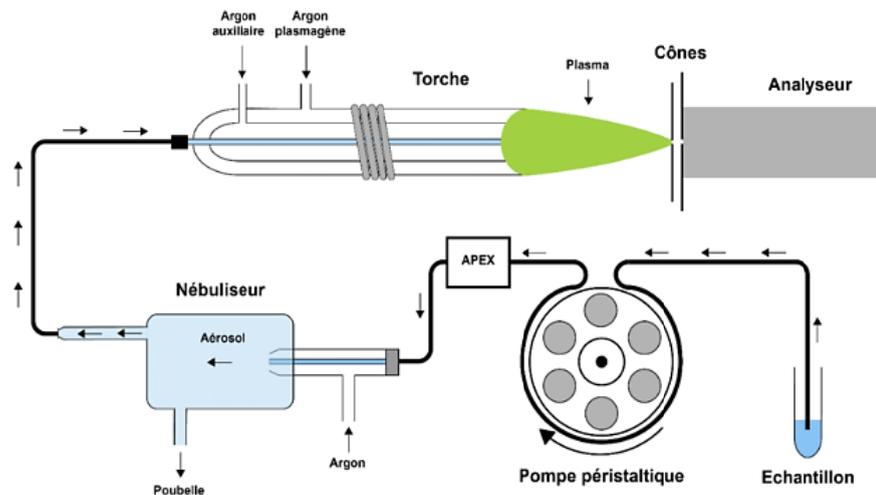


FIGURE 2.4: Principe de ICP-OES.

L'ICP-OES est largement utilisé pour la détection et la quantification de nombreux éléments en traces, en raison de sa sensibilité élevée et de sa capacité à analyser plusieurs

éléments simultanément. Cette technique est particulièrement utile pour les analyses environnementales, les études géochimiques et les contrôles de qualité industrielle.



FIGURE 2.5: Spectroscopie d'Émission Optique (ICP -OES)

La spectrométrie d'absorption atomique (SAA) et la spectroscopie d'émission optique par plasma à couplage inductif (ICP-OES) sont des techniques complémentaires utilisées pour l'analyse des éléments chimiques dans les échantillons de sol. La SAA est particulièrement adaptée pour l'analyse précise de certains éléments en traces, tandis que l'ICP-OES permet une analyse simultanée de multiples éléments, offrant ainsi une vue d'ensemble complète des composants présents. Ces techniques jouent un rôle crucial dans la surveillance environnementale, les études de contamination et les contrôles de qualité des sols.

2.6.2 Comparaison entre les différentes techniques

TABLE 2.1: Comparaison entre les différentes techniques

Caractéristiques	ICP/MS	ICP/OES	SAA Flamme
Sensibilité	Très élevée	Élevée	Modérée à élevée
Limite de détection (LOD)	Dans l'ordre de ppt (Parties par trillion)	Dans l'ordre de ppb (Parties par milliard)	Dans l'ordre de pp (Parties par million)
Sélectivité	Élevée	Modérée	Faible
Matrices analysables	Liquides, solides, gazeux	Liquides, solides, gazeux	Liquides
Applications	Géochimie, biochimie, environnement, sciences des matériaux, pharmacie	Environnement, géologie, industrie, métallurgie	Analyse de métaux alcalins et alcalino-terreux, contrôle de la pollution atmosphérique
Avantages	Sensibilité élevée, capacité à détecter les isotopes, large gamme d'applications	Sensibilité élevée, large gamme d'éléments analysables	Coût relativement faible Simplicité d'utilisation
Inconvénients	Coût élevé, complexité de l'équipement et de l'entretien	Coût élevé, moins sensible que l'ICP/MS, moins de capacité à détecter les isotopes	Les techniques d'analyse destructives nécessitent l'utilisation de sources caractéristiques pour chaque élément à mesurer, Limité aux éléments alcalins
Coût d'instrumentation	Élevé	Moyen à élevé	Faible à moyen

Troisième partie

Résultats et Discussion

Chapitre 3

Résultats et Discussion

3.1 Caractérisation des échantillons de sols

3.1.1 Teneur en eau

La détermination de la teneur en eau est essentielle pour estimer le taux d'humidité présent dans les échantillons de sols solides. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

TABLE 3.1: Teneur en eau

Échantillon	Teneur en Eau (%)
N01	1.665
N02	2.503
N03	2.400
N04	1.023

Ces données illustrent les variations de la teneur en eau entre différents échantillons de sol, permettant d'évaluer leur taux d'humidité respectif. En effet, la teneur en eau varie de 1.023% à 2.503% parmi les échantillons. Ces variations indiquent que les sols ont des taux d'humidité différents

3.1.2 Perte au feu

La perte au feu (PAF) est une mesure utilisée pour déterminer la quantité de matière organique dans un échantillon de sol. Cette méthode consiste à chauffer l'échantillon

dans un four à moufle à 500°C pendant 4 heures, ce qui provoque la combustion des matières organiques et permet de calculer la perte en masse de l'échantillon due à cette combustion. Les résultats de la PAF et le résidu de la perte au feu pour les échantillons de sols N1, N2, N3 et N4 sont présentés dans le tableau ci-dessous :

TABLE 3.2: Perte au Feu des Échantillons de Sols

Échantillon	Perte au Feu (%)
N01	3.240
N02	2.540
N03	2.535
N04	1.720

La perte au feu (PAF) est un indicateur clé de la teneur en matière organique des sols, ce qui est crucial pour comprendre leurs propriétés et leur comportement. Les résultats montrent une variation significative de la PAF parmi les échantillons. Ces variations indiquent que chaque échantillon de sol a des caractéristiques spécifiques qui peuvent influencer leur utilisation potentielle dans divers projets de construction et d'aménagement paysager. La gestion de ces sols doit tenir compte de leur composition pour optimiser leur utilisation et minimiser les risques environnementaux.

3.1.3 Le pH

TABLE 3.3: pH

Échantillon	pH
N01	8.26
N02	8.02
N03	7.75
N04	7.94

Les mesures du pH indiquent que tous les échantillons sont légèrement alcalins, avec des valeurs variant de 7.75 à 8.26. Ces résultats suggèrent que les sols pourraient contenir des quantités significatives de composés basiques, comme les carbonates ou les bicarbonates, qui peuvent influencer le pH.

3.1.4 Les chlorures

Les résultats du tableau indiquent les concentrations de chlore (Cl^-) et de chlorures de sodium (NaCl) dans différents échantillons de sol, exprimées en milligrammes par

TABLE 3.4: Concentration du chlore et chlorure de sodium dans les Échantillons de sol

Échantillons	Cl ⁻ en mg/kg	NaCl mg/kg
Ech N01	4788.95	7891.65
Ech N02	6553.5	10799.1
Ech N03	1512.3	2492.1
Ech N04	756.15	1246.05

kilogramme (mg/kg).

Les concentrations en chlore varient significativement entre les échantillons, allant de 756.15 mg/kg (Ech N04) à 6553.5 mg/kg (Ech N02). Cette variation peut être due à plusieurs facteurs, notamment la composition géologique du sol et les activités humaines telles que l'utilisation d'engrais ou de produits chimiques.

Les concentrations en chlorures de sodium, qui représentent le sel commun, montrent également une variation notable, allant de 1246.05 mg/kg (Ech N04) à 10799.1 mg/kg (Ech N02). Cette large gamme peut refléter des différences dans la salinité du sol, influencées par des facteurs tels que la proximité des sources d'eau salée ou l'utilisation de sel pour le déglacage ou d'autres fins agricoles.

d'autre part, les échantillons Ech N02 présentent les concentrations les plus élevées à la fois en chlore et en chlorures de sodium, indiquant potentiellement une contamination accrue ou une concentration naturellement plus élevée de ces substances dans cette zone spécifique. En revanche, les échantillons Ech N03 et Ech N04 montrent des concentrations plus faibles, ce qui pourrait être attribué à une moindre influence des activités humaines ou à une composition géologique différente du sol.

Ces résultats mettent en évidence la variabilité des concentrations de chlore et de chlorures de sodium dans les échantillons de sol étudiés. Cette variabilité souligne l'importance de surveiller et de comprendre la composition chimique du sol pour prendre des décisions informées en matière d'aménagement du territoire et de gestion des ressources naturelles.

3.2 Analyses métaux lourds

1. Lixiviation : Les échantillons soumis à la méthode de lixiviation montrent des concentrations variées en métaux lourds.

2. Attaque à l'acide : Les échantillons analysés après attaque à l'acide montrent souvent des concentrations plus élevées en métaux lourds par rapport à la lixiviation, en raison de la dissolution plus complète des métaux.

3. Fusion : La méthode de fusion est également utilisée pour dissoudre complètement les échantillons solides, permettant une analyse exhaustive des métaux lourds présents. Les concentrations observées dans les échantillons après fusion peuvent varier significativement en fonction de la composition chimique du sol et de la nature des métaux lourds présents.

3.2.1 Analyses des métaux lourds par ICP/MS

3.2.1.1 Echantillons prétraité par lixiviation

Les résultats des analyses par ICP/MS des métaux lourds dans les échantillons de sols prétraités par lixiviation montrent des concentrations variées, exprimées en mg/kg.

TABLE 3.5: Analyses des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg) - Éléments 1 à 9

Échantillons	Li	V	Cr	Mn	Co	Ni	Hg	Cu	Zn	As
N1 Lixiviat	0.23	0.02	<0.01	0.38	<0.01	0.01	<0.001	0.51	0.38	<0.01
N2 Lixiviat	0.25	0.02	<0.01	0.46	<0.01	<0.01	<0.001	0.52	0.35	<0.01
N3 Lixiviat	0.04	0.03	<0.01	0.31	<0.01	<0.01	<0.001	0.55	0.35	<0.01
N4 Lixiviat	0.04	0.03	<0.01	0.28	<0.01	<0.01	<0.001	0.50	0.32	<0.01

TABLE 3.6: Analyses des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg) - Éléments 10 à 18

Échantillons	Se	Mo	Cd	Sb	Ba	Pb	Al	Fe	Sr
N1 Lixiviat	0.04	0.01	<0.01	<0.01	0.41	<0.01	6.86	3.36	25.31
N2 Lixiviat	0.04	0.20	<0.01	<0.01	0.14	<0.01	0.84	0.89	26.43
N3 Lixiviat	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.12	<0.01	1.85	0.85	6.19
N4 Lixiviat	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.13	<0.01	1.65	0.88	6.05

- Variabilité des Concentrations :Les concentrations de métaux lourds varient considérablement entre les échantillons. Par exemple, le manganèse (Mn) montre des valeurs allant de 0.28 mg/kg à 0.46 mg/kg, ce qui peut indiquer des différences dans la composition géologique ou l'activité humaine locale.

- Détection de Métaux à Très Faibles Concentrations : Certains métaux comme le mercure (Hg) et le sélénium (Se) sont détectés à des concentrations très faibles (<0.001 mg/kg dans le cas du Hg), ce qui est important pour évaluer le risque environnemental potentiel dans les sols.
- Impact de l'Activité Humaine : Les métaux tels que le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) montrent des concentrations non négligeables dans certains échantillons, suggérant une possible influence des activités industrielles ou agricoles passées ou actuelles.
- Valeurs Inférieures au Seuil de Détection : Les valeurs " <0.01 mg/kg" indiquent que les concentrations sont inférieures au seuil de détection de la méthode d'analyse utilisée (ICP/MS). Cela peut être interprété comme une faible présence de ces métaux dans les échantillons, bien que leur totalité exacte puisse être plus précise.
- Comparaison entre les Échantillons : Les échantillons N1 et N2 montrent généralement des concentrations plus élevées pour plusieurs métaux par rapport aux échantillons N3 et N4. Cette variation pourrait être liée à des facteurs géographiques ou à des pratiques locales spécifiques.
- Concentration de Métaux Non-Toxiques : Certains métaux comme le fer (Fe) et l'aluminium (Al) montrent des concentrations relativement élevées, ce qui est souvent commun dans les sols mais peut nécessiter une surveillance continue pour éviter l'accumulation excessive.

L'analyse des métaux lourds par ICP/MS dans les échantillons de sols révèle une diversité de concentrations qui nécessite une interprétation attentive en fonction des normes environnementales et des effets potentiels sur la santé humaine et l'écosystème local.

3.2.1.2 Échantillons prétraité par l'attaque à l'acide

Les résultats d'analyses des métaux lourds par ICP/MS après prétraitement des échantillons de sols par attaque à l'acide révèlent des concentrations significativement différentes de celles obtenues par lixiviation.

TABLE 3.7: Analyses des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg) - Éléments 1 à 9 (pré-traitement à l'acide)

Échantillons	Li	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As
N1 Attaque acide	10.8	23.03	17.98	102.30	2.43	6.93	5.46	22.41	2.64
N2 Attaque acide	7.30	65.58	8.82	4873.6	101.77	68.58	18.50	35.17	21.86
N3 Attaque acide	7.48	24.08	16.02	169.86	2.21	6.17	4.52	19.73	4.20
N4 Attaque acide	6.34	17.38	13.43	107.62	1.78	5.76	4.47	23.08	2.55

TABLE 3.8: Analyses des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg) - Éléments 10 à 18 (pré-traitement à l'acide)

Échantillons	Se	Mo	Cd	Sb	Ba	Pb	Al	Fe	Sr
N1 Attaque acide	0.92	0.58	0.11	0.35	83.77	3.99	10314.18	7850.23	200.14
N2 Attaque acide	1.38	8.28	0.29	0.56	119.10	16.08	7854.86	17105.59	286.69
N3 Attaque acide	0.92	0.83	0.11	0.29	69.16	4.37	8829.98	7273.53	272.33
N4 Attaque acide	0.92	0.44	0.09	0.29	79.34	4.43	7630.72	6081.57	208.98

- Augmentation des Concentrations : Les concentrations de nombreux métaux, tels que le manganèse (Mn), le cobalt (Co), le nickel (Ni), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le plomb (Pb), l'aluminium (Al), et le fer (Fe), sont nettement plus élevées après le pré-traitement à l'acide comparé à la méthode de lixiviation. Par exemple, le manganèse (Mn) montre des valeurs allant jusqu'à 4873.6 mg/kg dans l'échantillon Nř2 après l'attaque acide, contre 0.46 mg/kg dans l'échantillon correspondant en lixiviat.
- Impact de l'Acidité sur la Solubilisation : L'attaque à l'acide vise à solubiliser les métaux lourds présents dans les échantillons de sol, permettant ainsi une mesure plus précise par ICP/MS. Cela explique les concentrations plus élevées observées après ce traitement, car il permet de libérer les métaux fixés dans la matrice du sol.
- Comparaison entre les Échantillons : Les échantillons montrent une variation significative des concentrations selon la nature du sol et possiblement l'histoire d'utilisation du site. Par exemple, les échantillons Nř2 présentent souvent les concentrations les plus élevées pour de nombreux métaux, suggérant une possible contamination locale ou une géologie enrichie en ces éléments.

- Présence de Métaux à Très Faibles Concentrations : Certains métaux comme le sélénium (Se), le molybdène (Mo) et le cadmium (Cd) montrent également des concentrations, bien que faibles, plus détectables après l'attaque à l'acide. Cela souligne l'importance de la méthode de prétraitement pour améliorer la sensibilité de détection des métaux lourds.

Les résultats montrent clairement l'effet du prétraitement à l'acide sur les concentrations mesurées des métaux lourds dans les échantillons de sols. Cette méthode est cruciale pour une évaluation précise de la contamination des sols par les métaux lourds, essentielle pour la gestion environnementale et la santé publique.

3.2.1.3 Echantillons prétraité par par Fusion

Les résultats d'analyses des métaux lourds par ICP/MS après prétraitement des échantillons de sols par fusion montrent des concentrations élevées pour plusieurs métaux.

TABLE 3.9: Analyses des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg) - Éléments 1 à 7 (prétraitement par fusion)

Échantillons	As	Se	Sr	Mo	Cd	Sb	Ba
N1 Fusion	7.235	17.870	354.404	1.702	0.499	4.508	97.731
N2 Fusion	8.005	10.720	349.889	4.619	1.871	18.137	195.407
N3 Fusion	4.464	16.085	728.295	0.790	0.749	0.105	120.446
N4 Fusion	2.771	17.870	273.363	0.122	0.249	0.035	301.236

TABLE 3.10: Analyses des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg) - Éléments 8 à 15 (prétraitement par fusion)

Échantillons	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
N1 Fusion	70.70	84.2810	4332.2610	1.404	207.262	20.709	104.247	47.281
N2 Fusion	16.102	1954.503	6203.703	50.181	520.810	107.677	213.647	10.556
N3 Fusion	22.768	275.332	3276.124	2.200	236.480	41.765	159.276	13.887
N4 Fusion	15.332	101.048	3527.813	2.409	521.651	37.009	87.135	15.963

- Effet du Prétraitement par Fusion : Le prétraitement par fusion a permis de libérer et de concentrer les métaux lourds présents dans les échantillons de sol, facilitant ainsi leur détection par ICP/MS. Cela explique les concentrations élevées observées par rapport aux méthodes de prétraitement précédentes comme la lixiviation ou l'attaque

acide.

- Concentrations Élevées de Certains Métaux : Par exemple, le fer (Fe) montre des concentrations allant jusqu'à plusieurs milliers de mg/kg dans certains échantillons (ex. N2 Fusion : 6203.703 mg/kg), indiquant potentiellement une contamination sévère par ce métal dans ces zones spécifiques.

Comparaison entre les Échantillons : Les échantillons présentent une variation notable dans les concentrations de métaux lourds. Par exemple, l'échantillon Nř3 Fusion montre des concentrations élevées de strontium (Sr) et de manganèse (Mn) par rapport aux autres échantillons, suggérant une géologie locale distincte ou une histoire d'utilisation du site différente.

Présence de Métaux Toxiques : Certains métaux comme le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) sont détectés à des niveaux non négligeables (ex. N2 Fusion : Cd - 1.871 mg/kg, Pb - 10.556 mg/kg), ce qui est préoccupant en termes de risques potentiels pour la santé humaine et l'environnement.

les analyses par ICP/MS après prétraitement par fusion fournissent une vision détaillée des concentrations de métaux lourds dans les échantillons de sols, mettant en évidence des niveaux

3.2.2 Analyses des métaux lourds par ICP/OES

Les données présentées sont les concentrations en milligrammes par kilogramme (mg/kg) de différents métaux lourds (Na, Mg, Ca, K, Sr, Ba) dans les échantillons de sol prétraité selon trois méthodes différentes : lixiviation, attaque à l'acide, et fusion.

La lecture des résultats d'analyse des métaux lourds par ICP/MS en fonction des données fournies dans le tableau, nous donne ces principaux points et observations :

- Méthode de Lixiviation :

1. N1 Lixiviation :

- Les concentrations observées pour Na (1289.19 mg/kg), Mg (238.75 mg/kg),

Échantillon	Na	Mg	Ca	K	Sr	Ba
N1 Lixiviation	1289.19	238.75	2282.10	46.50	26.91	0.43
N2 Lixiviation	1474.50	167.83	1279.44	39.93	27.20	0.16
N3 Lixiviation	694.28	193.14	5068.55	72.55	53.33	0.27
N4 Lixiviation	-	118.25	46.48	444.64	22.69	0.28
Blanc Attaque	-	603.8	112.4	9142.2	129.6	4.2
N1 Attaque Acide	2354.8	6814.2	108412	4921	262.4	105
N2 Attaque Acide	-	3100.2	11348.2	186970	3157.4	154.2
N3 Attaque Acide	-	1782.8	7126.4	310478	3541.2	83.6
N4 Attaque Acide	1306.2	7295.2	349285	3607.8	276.6	109.8
Blanc Fusion	-	1793	184	25404.5	1603	15
N1 Fusion	-	2550.5	4094	60823	4047	65.5
N2 Fusion	-	3590	7578.5	160399.5	2731.5	200
N3 Fusion	-	3279.5	5187.5	131042.5	3798	110.5
N4 Fusion	-	2896	3706	117240.5	3466	283

TABLE 3.11: Résultats d'analyse des métaux lourds par ICP/MS (mg/kg)

Ca (2282.10 mg/kg), K (46.50 mg/kg), Sr (26.91 mg/kg) et Ba (0.43 mg/kg) montrent des niveaux relativement élevés de calcium et de sodium. Ces éléments peuvent provenir de sources naturelles ou de processus géologiques.

2. N2 Lixiviation :

- Les concentrations pour Na (1474.50 mg/kg), Mg (167.83 mg/kg), Ca (1279.44 mg/kg), K (39.93 mg/kg), et Sr (27.20 mg/kg) indiquent des variations légères par rapport à N1, avec une légère diminution de Mg et une concentration similaire de Ca.

3. N3 Lixiviation :

- Les concentrations de Ca sont particulièrement élevées (5068.55 mg/kg), ce qui peut indiquer une concentration accrue de calcium dans cet échantillon spécifique. Les autres métaux comme Na, Mg, K, Sr et Ba montrent également des variations significatives.

4. N4 Lixiviation :

- Cet échantillon présente des valeurs pour Mg (118.25 mg/kg), Ca (444.64 mg/kg), et K (22.69 mg/kg). Les concentrations plus faibles de Na, Sr et Ba suggèrent une distribution différente des métaux lourds dans ce sol comparé aux autres échantillons.

- Méthode d'Attaque à l'Acide :

1. N1 Attaque Acide :

- On observe des concentrations très élevées pour Mg (6814.2 mg/kg), Ca (108412 mg/kg), K (4921 mg/kg), Sr (262.4 mg/kg) et Ba (105 mg/kg). Ces valeurs indiquent une extraction plus complète des métaux lourds par rapport à la lixiviation, révélant une forte présence de ces éléments dans le sol après traitement acide.

2. N2 Attaque Acide :

- Les concentrations pour Mg (11348.2 mg/kg), Ca (186970 mg/kg), K (3157.4 mg/kg), Sr (359.4 mg/kg) et Ba (154.2 mg/kg) montrent des résultats similaires à N1, confirmant une forte concentration de métaux lourds solubilisés après attaque acide.

3. N3 Attaque Acide :

- Les concentrations élevées pour Mg (7126.4 mg/kg), Ca (310478 mg/kg), K (3541.2 mg/kg), Sr (315 mg/kg) et Ba (83.6 mg/kg) indiquent une distribution variée mais significative de métaux lourds dans cet échantillon, montrant des différences par rapport aux autres méthodes.

4. N4 Attaque Acide :

- Les concentrations pour Mg (7295.2 mg/kg), Ca (349285 mg/kg), K (3607.8 mg/kg), Sr (276.6 mg/kg) et Ba (109.8 mg/kg) montrent une forte extraction de métaux lourds, avec des niveaux élevés de calcium et de potassium particulièrement prononcés.

– Méthode de Fusion :

1. N1 Fusion :

- Les concentrations pour Mg (4094 mg/kg), Ca (60823 mg/kg), K (4047 mg/kg), Sr (143 mg/kg) et Ba (65.5 mg/kg) indiquent une solubilisation efficace des métaux lourds après fusion, avec des niveaux élevés de calcium et de potassium.

2. N2 Fusion :

- Les concentrations pour Mg (7578.5 mg/kg), Ca (160399.5 mg/kg), K (2731.5

mg/kg), Sr (237 mg/kg) et Ba (200 mg/kg) montrent une tendance similaire à N1, avec des concentrations élevées de calcium et de potassium.

3. N3 Fusion :

- Les concentrations pour Mg (5187.5 mg/kg), Ca (131042.5 mg/kg), K (3798 mg/kg), Sr (242.5 mg/kg) et Ba (110.5 mg/kg) montrent des variations dans la distribution des métaux lourds, avec une concentration notable de calcium et de potassium.

4. N4 Fusion :

- Les concentrations pour Mg (3706 mg/kg), Ca (117240.5 mg/kg), K (3466 mg/kg), Sr (202.5 mg/kg) et Ba (283 mg/kg) indiquent une extraction efficace des métaux lourds, avec des niveaux élevés de calcium et de potassium.

Les résultats montrent des variations significatives dans la distribution des métaux lourds selon la méthode d'analyse utilisée (lixiviation, attaque à l'acide, fusion). De plus, les méthodes d'attaque à l'acide et de fusion montrent généralement des concentrations plus élevées en métaux lourds par rapport à la lixiviation, en raison de leur capacité à dissoudre plus complètement les composants du sol. et les concentrations élevées de calcium et de potassium dans de nombreux échantillons peuvent refléter des caractéristiques géologiques ou des sources d'apport naturelles. Ces données sont essentielles pour évaluer la contamination des sols par les métaux lourds et pour planifier des mesures de gestion environnementale appropriées afin de réduire les risques pour la santé humaine et l'environnement.

3.2.3 Analyses du cadmium (Cd) et du fer (Fe) par spectrométrie d'absorption atomique (SAA)

Les résultats de l'analyse des échantillons de sol pour la détermination des concentrations en fer et en cadmium par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Les résultats montrent que tous les échantillons montrent des concentrations de Cd inférieures à 0.01 mg/kg, ce qui indique que le niveau de cadmium dans les échantillons est extrêmement faible, voire indétectable par la méthode utilisée.

Échantillon	Cd (mg/kg)	Fe (mg/kg)
Lixiviat 01	<0.01	0.981
Lixiviat 02	<0.01	1.045
Lixiviat 03	<0.01	0.899
Lixiviat 04	<0.01	6.843
Fusion blanc	<0.01	33.6
Fusion 01	<0.01	6935
Fusion 02	<0.01	9225
Fusion 03	<0.01	4808
Fusion 04	<0.01	5345
Attaque acide blanc	<0.01	97.22
Attaque Acide 01	<0.01	11770
Attaque Acide 02	<0.01	26860
Attaque Acide 03	<0.01	10630
Attaque Acide 04	<0.01	8886

TABLE 3.12: Résultats d'analyse de Cd et Fe par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) (mg/kg)

Les concentrations de fer varient considérablement entre les différents types d'échantillons :

- Les échantillons de lixiviation (Lixiviat 01 à 04) montrent des concentrations relativement faibles de fer, allant de 0.899 mg/kg à 6.843 mg/kg.
- Les échantillons de fusion (Fusion 01 à 04) présentent des concentrations de fer beaucoup plus élevées, allant de 4808 mg/kg à 9225 mg/kg.
- Les échantillons d'attaque acide (Attaque Acide 01 à 04) montrent également des concentrations élevées de fer, allant de 8886 mg/kg à 26860 mg/kg.

En résumé, le cadmium (Cd), sa présence est négligeable dans tous les échantillons, ce qui est positif du point de vue de la contamination par ce métal toxique et le fer (Fe) sa concentration varie significativement selon la méthode de prétraitement utilisée. Les échantillons de fusion et d'attaque acide montrent des concentrations beaucoup plus élevées de fer par rapport aux échantillons de lixiviation, ce qui est attendu car ces méthodes permettent une extraction plus complète des métaux. Ces résultats soulignent l'importance de choisir la méthode d'analyse appropriée en fonction des objectifs spécifiques de l'étude, notamment pour évaluer la contamination des métaux lourds dans les échantillons environnementaux.

3.2.4 Synthèse comparative

Ces résultats d'analyse des métaux lourds par ICP/MS montrent des concentrations variées selon les méthodes de prétraitement utilisées : lixiviation, attaque à l'acide et fusion.

– Méthode de Lixiviation :

Les échantillons prétraités par lixiviation montrent des concentrations de métaux lourds relativement faibles, indiquant une extraction partielle des métaux de la matrice du sol. Par exemple, les concentrations de calcium (Ca) varient de 46.48 mg/kg à 5068.55 mg/kg, avec des différences marquées entre les échantillons. Les métaux comme le potassium (K) montrent des concentrations allant jusqu'à 72.55 mg/kg. Les valeurs de ba (0.16 mg/kg) sont légèrement en dessous du seuil de détection, indiquant une faible présence dans ces échantillons.

– Méthode d'Attaque à l'Acide :

Après traitement par attaque à l'acide, les concentrations de métaux lourds augmentent significativement par rapport à la lixiviation. Par exemple, le calcium (Ca) montre des valeurs allant jusqu'à 349285 mg/kg, indiquant une extraction plus efficace des métaux de la matrice du sol. Les métaux comme le strontium (Sr) montrent également des concentrations élevées, atteignant jusqu'à 3541.2 mg/kg. Cette méthode permet une solubilisation plus complète des métaux lourds fixés dans le sol.

– Méthode de Fusion

La méthode de fusion montre les concentrations les plus élevées de métaux lourds parmi les trois méthodes. Par exemple, le calcium (Ca) montre des concentrations jusqu'à 160399.5 mg/kg, indiquant une libération très efficace des métaux de la matrice du sol. Les métaux comme le fer (Fe) atteignent des valeurs élevées, par exemple 6203.703 mg/kg dans certains échantillons. Cette méthode permet une décomposition complète des échantillons solides, maximisant la détection des métaux lourds présents.

– Comparaison entre les Méthodes

Lixiviation vs Attaque à l'Acide vs Fusion : Les résultats montrent une tendance claire où la fusion produit les concentrations les plus élevées de métaux lourds, suivie par

l'attaque à l'acide, puis la lixiviation. Cette hiérarchie reflète l'efficacité croissante des méthodes de prétraitement pour dissoudre les métaux lourds fixés dans la matrice du sol.

La variabilité des concentrations entre les échantillons et les méthodes de prétraitement souligne l'importance de choisir la méthode appropriée en fonction des objectifs de l'analyse. La fusion, bien que plus invasive, offre une sensibilité maximale pour les études de contamination sévère, tandis que la lixiviation peut suffire pour des analyses préliminaires où une détection qualitative est suffisante.

Conclusion

Les résultats obtenus à partir des analyses des échantillons de sol présentent une variabilité significative dans plusieurs paramètres clés. La teneur en eau varie de 1.023 % à 2.503 %, montrant des différences marquées d'humidité entre les échantillons. De même, la perte au feu révèle des pourcentages allant de 1.720 % à 3.240 %, indiquant des niveaux variés de matière organique dans les sols étudiés.

En ce qui concerne le pH, tous les échantillons sont légèrement alcalins avec des valeurs oscillant entre 7.75 et 8.26. Cela suggère la présence de composés basiques tels que des carbonates ou des bicarbonates dans les sols. Les concentrations de chlore et de chlorure de sodium montrent également une large gamme, avec des valeurs de chlore allant de 756.15 mg/kg à 6553.5 mg/kg, et des valeurs de chlorure de sodium de 1246.05 mg/kg à 10799.1 mg/kg. Ces différences indiquent des variations significatives dans la salinité et la composition chimique des échantillons de sols étudiés.

Les analyses des métaux lourds par différentes méthodes de prétraitement (lixiviation, attaque à l'acide, fusion) révèlent également une diversité notable dans les concentrations mesurées. Par exemple, les concentrations de manganèse (Mn) varient de 0.28 mg/kg à 4873.6 mg/kg selon la méthode de prétraitement utilisée, démontrant l'impact significatif des techniques d'analyse sur les résultats obtenus. De plus, des métaux comme le plomb (Pb) et le fer (Fe) montrent des concentrations atteignant plusieurs milliers de mg/kg dans certains échantillons, soulignant des niveaux potentiellement préoccupants

de contamination.

En conclusion, l'étude des caractéristiques physico-chimiques et des métaux lourds dans les échantillons de sols montre une grande hétérogénéité, influencée par la géologie locale, l'usage du sol et possiblement des activités anthropiques. Ces résultats soulignent l'importance de comprendre la composition et la qualité des sols pour une gestion environnementale appropriée et pour minimiser les risques pour la santé publique et les écosystèmes.

Bibliographie

- [1] Hazrat A. ; Khan E. ; Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals : Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, page 14, 2019.
- [2] Trachte ; S. *Materieau ; Matière d'architecture soutenable. Choix soutenable des matériaux de construction pour une conception durable*. Thèse de doctorat, Université catholique de louvain ; Belgique., 2012.
- [3] Bicochi ; S. *Les polluants et les techniques d'épuration des fumés ; Cas des unités de traitement et de valorisation des déchets*. Paris, France., 2009.
- [4] Etchevers A ; Lecoffre C ; Le Tertre A ; Le Strat Y. Imprégnation des enfants par le plomb en france en 2008-2009. 2010[Consulté le 01/06/2014].
- [5] Miquel G. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé.
- [6] Scientific opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food. efsa panel on contaminants in the food chain (contam). *EFSA Journal*, 2014.
- [7] Lanphear BP ; Hornung R ; Khoury J ; Yolton K ; Baghurst P ; Bellinger DC ; et al. Low-level environmental lead exposure and children's intellectual function : an international pooled analysis. pages 113 :894–9, 2005.
- [8] Aksas ; H. *Etudes cinétiques et thermodynamique de l'adsorption des métaux lourds par l'utilisation des adsorbants naturels*. Thèse de doctorat., Université M'HA-MEHD BOUGARA-Boumerdes., 2013.

- [9] Uzoekwe; S.A.; Aigberua; A.O. Heavy metal distribution and assessment of ecological risk in surface waters and sediment within the flow stations in kolo creek, nigeria. *Journal of Chemical Society of Nigeria*, pages 44(5) : 809 –824., 2019.
- [10] Brackx; G. *Approche multidisciplinaire pour la détection de métaux lourds en environnements aquatiques*. Thèse de doctorat, Université Sorbonne Paris, France, Paris, France, 2017.
- [11] Krupka; KM. Understanding variation in partition coefficient, kd, values. 1999.
- [12] R. Leygoniel. " les métaux lourds dans l'air, sources d'émissions, mesures, effets ", pollution atmosphériques,. pages 63–70, 1993.
- [13] Vernus .E Kerch. G. " toxicité des métaux ", techniques de l'ingénieur. page 117, 2001.
- [14] Ross S.M. *Toxic metals in soil-plant systems*. Wiley, Chichester, 2019.
- [15] Davidson C.I; Santhanam S; Fortmann R.C; Olson M.P.
- [16] Ziino M. Climino G. *Heavy metal pollution part VII emissions from Etna volcanic*. Geophy Res Lett, 1983.
- [17] Weiss; D.; Shotyk; W.; Kempf; O. *Archives of Atmospheric Lead Pollution*. Natur Wissenchaften, 1999.
- [18] Nriagu J.O. A silent epidemic of environmental metal. poisoning? pages 50 :139–161, 1988.
- [19] Yanqun Z; Yuan L; Jianjun C; Haiyan C; Li Q; Schratz C. Hyper accumulation of pb, zn and cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in yunnan, china. pages 31 :755–762, 2005.
- [20] Verkleji J.A.S. The effects of heavy metals stress on higher plants and their use as bio monitors. in : Markert b (ed) plant as bioindicators : indicators of heavy metals in the terrestrial environment. pages 415–424, 1993.
- [21] Lacerda L.D. Global mercury emissions from gold and silver mining. pages 97 :209–221, 1997.
- [22] Kraal H; Ernst W. Influence of copp.er high tension lines on plants and soil. pages 11 :131–135, 1976.

- [23] Angino E.E; Magnuson L.M; Waugh T.C; Galle O.K; Bredfeldt J. Arsenic in detergents-possible danger and pollution hazard. pages 168 :389–392, 1970.
- [24] Keck; G.; Vernus; E. Déchets et risques pour la santé. page Techniques de l'ingénieur (G 2450), 2000.
- [25] Degremont. *Mémento technique de l'eau*. Lavoisier, Paris, France, n.9 edition, 1989.
- [26] Sistani; K. R.; Novak; J. M. *Trace metal accumulation, movement, and remediation in soils receiving animal manure*. 2006.
- [27] Bekaert E. *Gestion des chlorures des métaux lourds stabilisation d'un phosphate d'étain dans un vitrifiat silicate*. Thèse de doctorat, l'université de Lille, France, 2004.
- [28] H. M Kuhnlein, H. V. Chan. Environnement and contaminants in traditional food systems of northern indigenous peoples. pages 20 : 595–626, 2000.
- [29] Suk; W. A.; Avakian; M. D.; Carpenter; D.; Groopman; J. D.; Scarmell; M. Wild; C. P. Human exposure monitoring and evaluation in the arctic : The importance of understanding exposures to the development of public health policy. pages 112 : 113–120, 2004.
- [30] C.L. Davis K. Kandola K. Brewster J. Potyrala M. Chan H. M 33. Curren M.S., Liang. Assessing determinants of maternal blood concentrations for persistent organic pollutants and metals in the eastern and western canadian arctic. pages 527/528 : 150–158, 2015.
- [31] Cole; D. C. Kearney; J. P. Blood cadmium, game consumption and tobacco smoking in southern ontario anglers and hunters. *Canadian Journal of Public Health*, pages 88 : 44–46, 1997.
- [32] Relative à la définition du bon état et à la constitution des référentiels pour les eaux douces de surface, en application de la directive européen 2000/60 du 23 octobre 2000, ainsi qu'à la démarche à adopter pendant la phase transitoire (2005-2007). 2005.
- [33] Du 23 octobre 2000 du parlement et du conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. 2000.

- [34] règlement les rejets effluent liquides industriels. 1993.
- [35] Benguella B. *Elimination du cadmium en solution aqueuse par un matériau biosorbant : la chitine*. Thèse de magister, l'université de Tlemcen-Algérie, 1999.
- [36] Site rassemblant un certain nombre d'informations relatives à l'extraction minière en France. 2006.
- [37] Mohammadi S. Z. ; Karimi M. Ali. ; Daryoush Afzali ; Fatemeh Mansouri. Removal of Pb (II) from aqueous solutions using activated carbon from sea-buckthorn stones by chemical activation, desalination. pages 86–93, 2010.
- [38] Lecomte Paul. *Les sites pollués. Traitement du sol et des eaux souterraines*. New-York, n.2 edition, 1998.
- [39] Ecomine (ministère de l'Économie, des finances et de l'industrie). 2005.
- [40] Duchaufour Ph. Introduction à la science du sol. sol, végétation, environnement. page 331, 2001.
- [41] Kebir ; T. *Étude de contamination, d'accumulation et de mobilité de quelques métaux lourds dans des légumes, des fruits et des sols agricoles situés près d'une décharge industrielle de l'usine au zinc de la ville de Ghazaouet*. Thèse, université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2012.
- [42] Dabin ; B. ; Ségalen. Le sol ; sa définition ; ses constituants. pages 10 ; 29–42., 1970.
- [43] Manneville ; O. ; Vergne ; V. Et Villepoux ; O. Le monde des tourbières et des marais. page 320, 1999.
- [44] Beauchamp J. Propriétés des sols. page 24, 2003.
- [45] Antunes S.C. ; Pereira R. ; Sousa J.P. ; Santos M.C. ; Gonçalves F. Spatial and temporal distribution of litter arthropods in different vegetation covers of Portosanto island (Madeira archipelago, Portugal). *European Journal of Soil Biology*, pages 44, 45–56, 2008.
- [46] Heavy Metals Regulations in the European Union : An Overview. <https://www.compliancegate.com/heavy-metal-regulations-european-union/>. Technical report.

- [47] Boudiaf Nait-Kaci M. ; Hedde M. ; Mouas Bourbia S. ; Derridj A. Hiérarchisation des facteurs déterminant la macrofaune du sol de vergers du nord de l'algérie. pages Vol. 18, No 1, 2018.
- [48] Heavy metal emissions in Europe. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/txt/pdf/?uri=celex:32010l0075>. Technical report.
- [49] M. Benaissa. *Etude expérimentale sur la stabilisation des sols gonflants de la région de Mostaganem et de Relizane*,. Thème, Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis., 2011.
- [50] Water Framework Directive. https://environment.ec.europa.eu/topics/water_en. Technical report.
- [51] Koller Emilian. Traitement des pollutions industrielles. pages 277–347, 2004.
- [52] Redlich G/C et Verdure. Le comportement physique des tourbes en cours de culture phm. pages 13–20, 1975.
- [53] 16.
- [54] Marie-France Dupuis-Tate Bernard Fischesser. Le guide illustré de l'écologie. 1996.
- [55] Soltner ; D. *Distribution Liquid Et Voie Métabolique Chez Quatres Bactéries Gram-négative Hydrocarbonoclaste. Variation En Fonction De Sources De Carbone*. Thèse de doctorat, Université PARIS 6, paris, 2004.
- [56] Gobat j. M ; Aragno m. Et Matthey w. Le sol vivant. bases de pédologie biologie des sols. presses polytechniques et universitaires romandes, lausanne. 1998.
- [57] Duchaufour ph. Introduction à la science du sol-6ème ed de l'abrégé de pédologie. pages 42, 63, 69, 109, 2004.
- [58] alvet ; R. Le sol : Propriétés et fonctions. tome 1 : Constitution et structure, phénomènes aux interfaces.
- [59] Aragno m. ; Gobat j.m. ; Matthey w. *Le sol vivant, base pédologie /biologie des sols*. imprimé en france, n.2 edition, 2003.
- [60] Christophe Kessel. [Http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/hort/news/hortmatt/2015/11hrt1](http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/hort/news/hortmatt/2015/11hrt1) 2015.

- [61] Buckman ; E. ; Blankenship. ; Lytle H. ; Repeated. Spring prescribed burning reduces abundance and vigor of aspen root suckering. *Journal of Forestry*, pages 63.1 : 23–25., 1965.